

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 18 Выпуск 6/2023
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 18. Выпуск 6
2023**

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

Сквозной номер 175

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 18. Issue 6
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	27.06.2023.
Подписан в свет	30.06.2023.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 22,41. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 181	

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, почетный президент, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Заместители главного редактора

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 Маляян, 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

Армен Завенович Тер-Мартirosян, д-р техн. наук, проректор, главный научный сотрудник научно-образовательного центра «Геотехника», 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: Александр Дмитриевич Федотов

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

зования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Андрей Александрович Морозенко, д-р техн. наук, доц., 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:	27.06.2023

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

Elena A. Korol, 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

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 Gładyszewska-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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

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:** *Aleksandr D. Fedotov*

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

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

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.

Т.В. Иванцык, А.М. Салимов

Дом Д.А. Шепелева в составе главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных по материалам историко-архитектурных исследований 829

А.Ю. Шлепцова, О.Е. Долинина

Особенности формирования архитектурно-планировочной структуры и типологии морских вокзалов России 1950–1990 гг. 841

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

В.В. Надольский

Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой 852

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

М.М. Шахабов, А.Б. Сивенков, Д.А. Корольченко

Эксплуатационные характеристики стальных конструкций длительного срока эксплуатации 864

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В.В. Симонян, А.А. Кочиев, В.И. Волков

Комплексный подход к определению устойчивого равновесного состояния оползня 880

Е.В. Сысоева, М.О. Гельманова

Assessment of PM_{2.5} particulate air pollution near highways
(Оценка загрязнения воздуха твердыми частицами PM_{2.5} вблизи автомагистралей) 889

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А. Тахерифард, В.В. Елистратов

Numerical modelling of multiphase flow hydrodynamics by CFD analysis methods in a double-elbow pipeline
(Численное моделирование гидродинамики многофазного потока методами CFD-анализа в трубопроводе с двойным коленом). 901

Н.А. Анискин, А.В. Ступицев

Влияние факторов на фильтрационный режим земляной плотины при сработке верхнего бьефа 917

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Л. Торопов

Энергетическая эффективность электрического котла с косвенным поверхностным резисторным нагревом теплоносителя 927

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.А. Черенева, А.В. Мишакова, А.Е. Радаев

Оптимизация характеристик организационно-технологических решений, направленных на снижение влияния проектных рисков 935

А.А. Липидус, Ибрагим Ибрагим Фадил Ибрагим, М.А. Фахратов

The role of a quality system in managing interface work
(Роль системы качества в управлении интерфейсными работами) 962

Т.Н. Кисель, Ю.С. Прохорова

Уровень цифровизации российских предприятий инвестиционно-строительной сферы. 971

М.Г. Даниелян, Е.Ю. Васильева, И.Х. Давлетов

Необоснованные заимствования в метаязыке государственного управления в строительстве 988

Требования к оформлению научной статьи 1002

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Timur V. Ivantsyk, Alexey M. Salimov

D.A. Shepelev's house as part of the main house of the Musin-Pushkin estate based on the materials of historical and architectural research 829

Alina Yu. Shleptsova, Olga E. Dolinina

Peculiarities of formation of the architectural-planning structure and typology of Russian marine stations 1950–1990 841

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

Vitali V. Nadolski

Reliability coefficients for nonlinear models of load-bearing capacity of beams with flexible web. 852

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Mayrbek M. Shakhobov, Andrey B. Sivenkov, Dmitriy A. Korolchenko

Operational characteristics of steel structures of long term service life 864

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Vladimir V. Simonyan, Alexey A. Kochiev, Victor I. Volkov

Integrated approach to determining the stable equilibrium state of a landslide. 880

Elena V. Sysoeva, Margarita O. Gelmanova

Assessment of PM_{2.5} particulate air pollution near highways 889

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Alireza Taherifard, Victor V. Elistratov

Numerical modelling of multiphase flow hydrodynamics by CFD analysis methods in a double-elbow pipeline . . . 901

Nikolai A. Aniskin, Andrey V. Stupitvsev

Influence of factors on filtration regime of an earth dam under headwater drawdown. 917

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Alexey L. Toropov

Energy efficiency of an electric boiler with indirect surface resistive heating of the heat carrier 927

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Anastasia A. Chereneva, Anastasia V. Mishakova, Anton E. Radaev

Optimization of the characteristics of organizational and technological solutions aimed at reducing the impact of project risks 935

Azariy A. Lapidus, Ibrahim Ibrahim Fadhil Ibrahim, Mukhammet A. Fakhratov

The role of a quality system in managing interface work 962

Tatiana N. Kisel, Yulia S. Prokhorova

The level of digitalization of Russian enterprises in the investment and construction sector 971

Mary G. Daniyelyan, Elena Yu. Vasilyeva, Islambek H. Davletov

Unreasonable borrowings in the metalanguage of public administration of the construction industry 988

Requirements for research paper design 1002

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 72.03:69.059

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.829-840

Дом Д.А. Шепелева в составе главного дома усадьбы Муслиных-Пушкиных по материалам историко-архитектурных исследований

Тимур Викторович Иванцык, Алексей Маратович Салимов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается один из объектов культурного наследия, формирующего архитектурный облик усадьбы Муслиных-Пушкиных на пересечении Доброслободской и Спартаковской улиц в Москве (ныне комплекс зданий Московского государственного строительного университета), — главный дом ансамбля. Будучи памятником архитектуры федерального значения, это сооружение к настоящему времени претерпело многочисленные преобразования, что отразилось как на фасадах, так и в интерьерах здания. Памятник имеет богатую строительную историю и включает постройки различных эпох и архитектурных стилей. Основная цель исследования — проследить историю формирования главного дома, определиться с его строительной периодизацией, «вычленив» первоначальный объем в структуре данного сооружения и выполнить его реконструкцию.

Материалы и методы. Изучение памятника основано на методе комплексного источниковедения, включающего поиск и анализ источников и литературы, натурные исследования, сопровождавшиеся устройством зондажей, закладкой шурфов и обмерными работами, а также химико-технологическим изучением строительных и отделочных материалов. Используя сравнительный метод, данный объект был рассмотрен в кругу стилистически и типологически близких построек.

Результаты. Выявлена строительная периодизация памятника, датированы его существующие объемы, определено первоначальное ядро постройки, обнаружены и изучены стилиобразующие элементы здания, что позволило разработать графическую реконструкцию памятника на начальный период в его строительной истории.

Выводы. Предложенная реконструкция является результатом комплексных исследований, которые позволяют представить первоначальный облик постройки, ставшей основой для ныне существующего главного дома усадьбы Муслиных-Пушкиных, хотя данная реконструкция не преследует цели его воссоздания, она лишь обозначает первоначальный облик памятника и раскрывает одну из страниц в истории столь значимого для Москвы усадебного комплекса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: усадьба Муслиных-Пушкиных на Разгуляе в Москве, главный дом, М.Ф. Казаков, классицизм, барокко, дом Д.А. Шепелева

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иванцык Т.В., Салимов А.М. Дом Д.А. Шепелева в составе главного дома усадьбы Муслиных-Пушкиных по материалам историко-архитектурных исследований // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 829–840. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.829-840

Автор, ответственный за переписку: Тимур Викторович Иванцык, timurahc@yandex.ru.

D.A. Shepelev's house as part of the main house of the Musin-Pushkin estate based on the materials of historical and architectural research

Timur V. Ivantsyk, Alexey M. Salimov

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

ABSTRACT

Introduction. The article deals with one of the objects of cultural heritage, forming the architectural appearance of the Musin-Pushkin estate at the intersection of Dobroslobodskaya and Spartakovskaya Streets in Moscow (now the building complex of the Moscow State University of Civil Engineering) — the main house of the ensemble. As an architectural monument of federal significance, the structure has undergone numerous transformations to date, affecting both the facades and the interiors of the building. The monument has a rich construction history and includes buildings of different epochs and architectural styles. The main purpose of the research is to trace the history of the formation of the main building, to determine a period of its construction, to “distinguish” the original building volume in the structure and to reconstruct it.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 6, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 6, 2023

Materials and methods. The study of the monument is based on the method of complex source study, including search and analysis of sources and literature, field studies, accompanied by soundings, trenching and measuring works, as well as chemical and technological research of construction and finishing materials. Using a comparative method, the object was studied in a range of stylistically and typologically similar buildings.

Results. The structural periodization of the monument has been revealed, its existing volumes have been dated, the original core of the building has been determined, and its stylistic elements have been studied; thus, a graphic reconstruction of the monument at the initial period of its construction history has been elaborated.

Conclusions. The proposed reconstruction is the result of comprehensive research, which helped present the initial appearance of the building that became the basis for the present main house of the Musin-Pushkin estate, although this reconstruction is not intended to recreate it. It only marks the initial appearance of the monument and reveals one of the pages in the history of the estate complex so important for Moscow.

KEYWORDS: manor complex on Razgulay, homestead Musin-Pushkin in Moscow, main house, M.F. Kazakov, classicism, baroque, D.A. Shepelev's house

FOR CITATION: Ivantsyk T.V., Salimov A.M. D.A. Shepelev's house as part of the main house of the Musin-Pushkin estate based on the materials of historical and architectural research. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):829-840. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.829-840 (rus.).

Corresponding author: Timur V. Ivantsyk, timurahc@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Комплекс зданий Московского государственного строительного университета — один из архитектурных ансамблей Москвы эпохи классицизма, созданный в начале XIX в. стараниями известного вельможи екатерининского времени, коллекционера и ученого Алексея Ивановича Мусина-Пушкина. Согласно сложившейся историографической традиции автором этого комплекса мог быть М.Ф. Казаков или зодчий, «близкий его кругу» [1, 2]. За время своего существования ансамбль на Разгуляе претерпел немало изменений, что способствовало внедрению в структуру классицистической усадьбы ряда дисгармонирующих объемов и утрате отдельных элементов комплекса. Такая ситуация сложилась в отношении ограды по улице Спартаковской [3] северного [4] и восточного [5] флигелей, исторический облик которых был в значительной степени утрачен.

Главный дом данного комплекса также претерпел ряд преобразований, однако его строительную историю есть основание рассматривать в более широких хронологических рамках. В литературе, посвященной усадьбе Мусиных-Пушкиных, наличествует устоявшееся мнение, что в состав ныне существующего главного дома, созданного в 1790-е гг., входят каменные жилые палаты, которые стояли здесь еще в середине XVIII в. [6] будучи выстроенными, возможно, в первой четверти XVIII столетия [7].

В настоящее время главный дом усадьбы Мусина-Пушкина представляет собой классицистического облика четырехэтажное здание, расположенное на углу Спартаковской и Доброслободской улиц. Со стороны площади в застройке отчетливо выделяется трехэтажный объем начала XIX в. и более поздний четвертый ярус, который отделен от основной части здания широким горизонтальным поясом.

По западному (главному) фасаду трехосевые ризалиты фланкируют утопленную семиосевую срединную часть фасада (лоджию), которая по вто-

рому и третьему ярусам акцентирована живописным восьмиколонным портиком с треугольным фронтоном. В основании портика находится семиарочная базовая часть, соотношенная по высоте с первым ярусом здания (рис. 1). Центральная семиосевая часть западного фасада в наибольшей степени насыщена декором. Помимо колонн с коринфскими капителями на стеновой плоскости присутствуют такого же ордера пилястры и развитые рамочные наличники окон второго яруса.

Северный семиосевой фасад дома более сдержан по декорировке. Опуская примитивный по архитектуре четвертый ярус, отметим, что по аналогии с западным фасадом эта плоскость также имеет срединный акцент в виде трехосевого ризалита, украшенного по второму ярусу четырехколонным портиком. Согласно иерархии здесь видны колонны не коринфского ордера, а ионического. В третьем ярусе эту композицию венчает полуциркульное итальянское окно, а базовой частью служит трехколонный рустованный нижний ярус, проемы которого наделены сандриками.

Своеобразным продолжением северного фасада является срезанный северо-восточный угол дома. На уровне первого и второго этажей он оформлен ротондой. По нижнему ярусу она находится в контексте убранства первого этажа здания, а ее второй ярус представлен пятиколонной полуротондой. Между колоннами ионического ордера устроена балюстрада, а стена этого открытого со стороны улицы объема центрирована живописной полуциркульной нишей с фланкирующими ее колонками и кессонированной конхой, помещенной в прямоугольное обрамление.

По сравнению с северным фасадом дома его южный дворовый фасад предельно лаконичен. Здесь у оконных проемов отсутствуют наличники и нет портика, однако в третьем ярусе едва выступающего ризалита устроено полуциркульное трехчастное окно, повторяющее итальянское окно северного фасада.



Рис. 1. Москва. Главный дом усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Вид главного (западного) фасада с площади. Существующее состояние. Фото 2021 г.

Fig. 1. Moscow. Main house of the Musin-Pushkin estate on Spartakovskaya Street. View of the main (western) facade from the square. Existing condition. Photo from 2021

Аналогичен по оформлению и восточный фасад здания, однако его пластика значительно выразительней за счет двух ризалитов, выступающих вглубь двора с северной и южной стороны фасада (рис. 2). В дополнение часть окон третьего яруса имеет арочные сильно поднятые над окнами сандрики, которые увязаны с горизонтальной карнизной тягой. Курдонер, образуемый боковыми риза-

литами восточного фасада, занят входной группой с вестибюлем, внешний облик которого свидетельствует о создании этого сооружения во второй половине XX в.

Интерьеры главной постройки усадьбы Мусиных-Пушкиных свидетельствуют о многочисленных переделках, которые были произведены в этом здании, начиная с послепожарного 1813 г. Тем



Рис. 2. Москва. Главный дом усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Вид дворового (восточного) фасада. Существующее состояние. Фото 2021 г.

Fig. 2. Moscow. Main house of the Musin-Pushkin estate on Spartakovskaya Street. View of the courtyard (east) facade. Existing condition. Photo from 2021

не менее в юго-западном угловом компартименте присутствует парадная чугунная лестница, а в аудитории второго этажа сохранились колонны, некогда украшавшие просторный двусветный зал.

Под восточной частью дома фиксируются подвалы. Это порядка 10 сводчатых помещений, имеющих разные по площади параметры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование данного памятника проведено с использованием комплекса методов, ориентированных на изучение объекта культурного наследия, его истории, этапов формирования и строительной периодизации. Особое внимание уделено архитектурно-археологическому направлению, анализу выявленных объемов, фиксации их объемных параметров и моделированию объемно-пространственной композиции постройки. Материалами для исследования стали выявленные в ходе натурных изысканий фрагменты стен первоначального периода с остатками архитектурного декора, стилистические особенности которого несколько отличаются от общей классицистической концепции, что и легло в основу концептуального решения и графической реконструкции исследуемого здания.

В рамках комплексного подхода проведены исследования в следующих направлениях:

1. Осуществлен поиск и проанализированы источники и литература относительно исследуемого объекта и ансамбля усадьбы в целом.
2. Выполнены натурные исследования, сопровождавшиеся устройством зондажей, закладкой шурфов, обмерными работами и химико-технологическим изучением строительных и отделочных материалов.
3. Используя сравнительно-исторический метод, были подобраны стилистически и типологически близкие аналоги выявленному наиболее раннему объему главного дома.
4. Подготовлена реконструкция здания, вошедшего в начале XIX в. в состав главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эпоха петровских преобразований превратила лежащий между городом и обособленными загородными поселениями район в одну из самых представительных частей Москвы, хотя вплоть до пожара 1735 г. застройка в слободе была в значительной мере деревянной. Но стоящим на главной улице Басманной слободы домам старались придать относительно «порядочный» облик, поскольку Покровская (Басманная), а позже Елоховская улица была

царской магистралью¹. В 1730-е гг. по этой дороге императрица Анна Иоанновна ездила в Рубцово-Покровское, Измайлово, Лефортово.

В середине – второй половине XVIII в. участок, на котором сегодня находится комплекс МГСУ, входил в состав большой усадьбы обер-гофмейстера и генерал-аншефа Д.А. Шепелева, где существовали не только деревянные, но и каменные постройки (рис. 3) [8]. Однако в екатерининское время началось ее дробление и в 1776 г. значительная часть этого домовладения, выходящего своим западным краем на площадь Разгуляй, стала собственностью Мусиных-Пушкиных [9]. Точнее не Мусиных-Пушкиных, а их родственников, поскольку эта усадьба досталась Екатерине Алексеевне Волконской (с 1781 г. по мужу Мусиной-Пушкиной) «от тетки ее родной девицы Марьи Родионовны Кошелевой» [10].



Рис. 3. Домовладение (в будущем) Мусиных-Пушкиных на плане Москвы. 1739 г. Источник: Архив МГСУ. Дом Мусина-Пушкина, три флигеля и ограда. Историко-архитектурное обследование домовладения. Т. 1. М. : ООО «Арсимум», 2011

Fig. 3. Household of the (future) Musin-Pushkin on the plan of Moscow. 1739. Reference: MGSU archive. Musin-Pushkin house, three wings and fence. Historical and architectural survey of the house. Vol. 1. Moscow, LLC Arsimum, 2011

¹ Елоховской (Ехаловской) эту улицу называет Указатель Москвы 1792 г. (Указатель Москвы с приложением иллюминированного плана Москвы, на части разделенной. Ч. 1. М., 1792. С. 55), но на планах 1790-х гг. она названа Басманной (ЦГА Москвы. Ф. 105. Оп. 1. Д. 635. Л. 3; ЦГА Москвы. Ф. 171. Оп. 1. Д. 281. Л. 2), а на планах 1802 и 1824 гг. значится как Большая Покровская (ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291); 1, 2).

В 1790 г. Е.А. Мусина-Пушкина собиралась возвести на этом участке новые здания или перестроить более ранние сооружения. В этом году она намеревалась «*построить господския деревянные хоромы со службами на каменном фундаменте и старое жилое и нежилое строение исправить починкою*» [11].

Судя по тому, что в том же 1790 г. в центре ее углового домовладения был зафиксирован каменный двухэтажный дом (2 на рис. 4) [12], а не каменно-деревянные «хоромы», которые в сентябре 1790 г. только лишь собиралась строить Мусина-Пушкина, то это каменное жилое строение следует считать сооружением, появившимся, возможно, задолго до того, как Е.А. Мусина-Пушкина пожелала обновить застройку своего участка. По крайней мере, его можно отнести к середине XVIII в., когда усадьба принадлежала Д.А. Шепелеву.



Рис. 4. Москва. План домовладения Е.А. Мусиной-Пушкиной. 1790 г.: 1 — «двор и сад вышеписанной госпожи Мусиной Пушкиной»; 2 — «строение каменное в два этажа»; 3 — «строение деревянное жилое и нежилое». ЦГА Москвы. Ф. 105. Оп. 1. Д. 635. Л. 3

Fig. 4. Moscow. Plan of E.A. Musina-Pushkina's house ownership. 1790 г.: 1 — "The yard and garden of the above mentioned Mrs. Musina Pushkina"; 2 — "building stone in two stories"; 3 — "wooden building dwelling and nonresidential". Moscow Central State Archive. Fund 105. L. 1. File 635. Sheet 3

В начале 1790-х гг. хозяином рассматриваемой усадьбы в Басманной части составитель Указателя Москвы называет уже А.И. Мусина-Пушкина — мужа Екатерины Алексеевны [11], хотя вплоть до самого конца XVIII в. каких-либо действий по видоизменению своей московской недвижимо-

сти он не предпринимал. К 1799 г. застройка этого домовладения так в целом и осталась деревянной. Лишь несколько вырос в размерах главный усадебный дом: в 1798 г. к более раннему практически квадратному в плане каменному двухэтажному объему сделали ряд пристроек (2, 3 на рис. 5) [12].

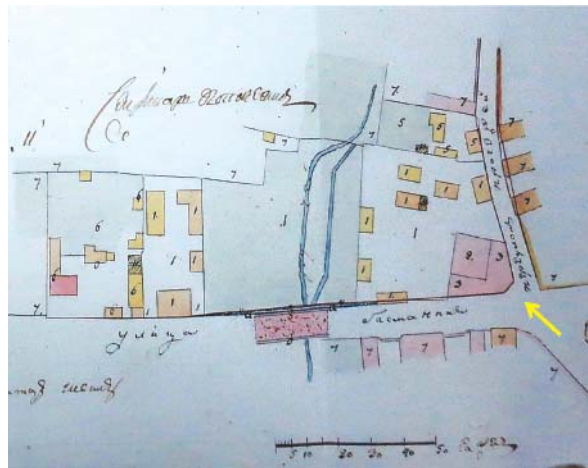


Рис. 5. «План двору господина тайного советника, сенатора и разных орденов кавалера графа Алексея Ивановича Мусина-Пушкина, состоящему за Земляным городом в Басманной части в приходе церкви Богоявления Господня что в Елохове, учинен июня дня 1799 года»: 1 — «двор со строениями и сад его сиятельства графа Алексея Ивановича Мусина-Пушкина»; 2 — «каменный корпус в два жилья, к которому...»; 3 — «пристроены каменные пристройки ... прошлого 1798-го года». ЦГА Москвы. Ф. 171. Оп. 1. Д. 281. Л. 2

Fig. 5. "The plan of the yard of the Privy Councillor, Senator and Knight of various Orders, Count Alexei Ivanovich Musin-Pushkin, which is situated outside the Zemlyanoy Gorod in the Basmannya part of the parish of the Church of the Epiphany in Elokhovo, was made in June 1799": 1 — "a courtyard with buildings and a garden of His Lordship Count Alexey Ivanovich Musin-Pushkin"; 2 — "a stone building with two residential buildings, to which..."; 3 — "stone annexes attached... of the last 1798 year". Moscow Central State Archive. Fund 171. L. 1. File 281. Sheet 2

В 1797 г., после прихода к власти Павла I, Алексей Иванович выходит в отставку, правда, тогда же он становится графом и сенатором. Но эти пожалования не заставили коллекционера продолжить карьеру чиновника. После отставки он навсегда поселяется в Москве (вероятно, в усадьбе на Разгуляе) и перевозит сюда из Петербурга свою богатейшую библиотеку с обширнейшим рукописным отделом и все коллекции. Надо полагать, что именно этим обстоятельством была обусловлена реконструкция его московского дома на Старой Басманной улице, которая была выполнена в 1798 г. на следующий год после выхода А.И. Мусина-Пушкина в отставку [13].

Возвращение Мусина-Пушкина в Москву² стало началом кардинальных перемен в судьбе усадьбы на площади Разгуляй. Если в 1798 г. Алексей Иванович только реконструирует и несколько расширяет главную постройку своего домовладения, то в начале XIX в. было построено новое масштабное жилое здание, а также несколько каменных служебных построек. Об этом свидетельствует план, который датируют 1802 или 1804 г. (рис. 6) [14].

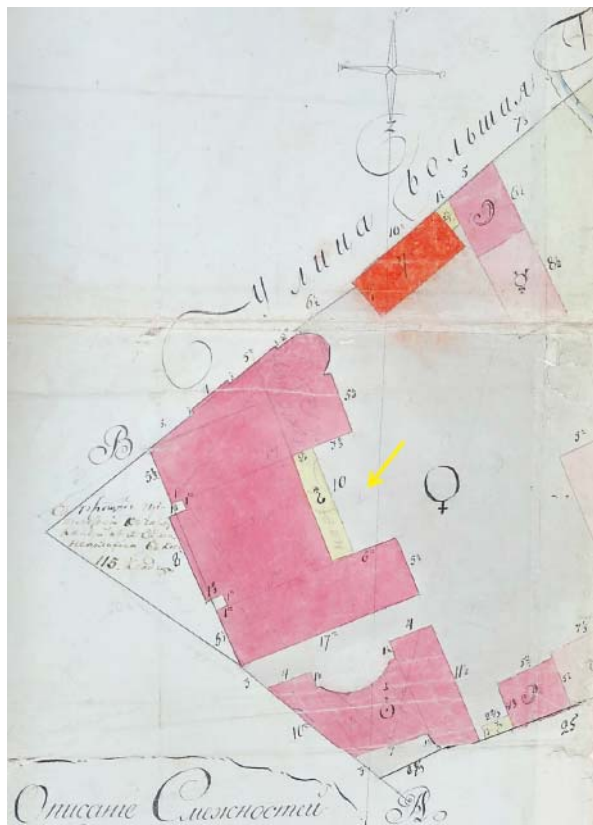


Рис. 6. Москва. Главный дом на «Геометрическом плане» дому состоящему в Басманной части третьем квартале под № 312 и 321-м Его сиятельства графа Алексея Ивановича Мусина Пушкина...». 1802–1804 гг. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 1)

Fig. 6. Moscow. The main house on the “Geometric plan of the house located in the Basmannaya part of the third quarter under No. 312 and 321, and belongs to his Excellency Count Alexei Ivanovich Musin-Pushkin...”. 1802–1804. Moscow Central State Archive. Fund Vol. 1. L. 2. File 173 (437/291; 1)

Автор подготовленной в 1995 г. краткой исторической записки считает, что работы по изменению облика усадьбы, завершившиеся созданием комплекса каменных зданий, пришлось на 1800–1803 гг. [14]. Однако отсутствие на чертеже 1802–1804 гг. ряда каменных построек, которые фиксируются более

поздними документами, позволяет расширить хронологические рамки этих строительных мероприятий. Но весьма незначительно, поскольку к началу 1810-х гг. практически все возведенные по периметру домовладения Мусиных-Пушкиных сооружения уже были каменными. Дело в том, что источник 1813 г. помимо «главного трехэтажного корпуса» отмечает на территории этой усадьбы еще «два жилых и два нежилых одноэтажных флигеля», а план 1814 г. однозначно об этом свидетельствует, где экспликация указывает этажность всех каменных зданий [15]. Лишним подтверждение тому, что к войне 1812 г. все сооружения ядра усадьбы были каменными постройками, служит тот факт, что после пожара их собирались «поправить» и устроить на этих зданиях кровлю [16].

Благодаря стараниям вдовы А.И. Мусина-Пушкина усадебный комплекс на площади Разгуляй после войны был полностью восстановлен, что и было зафиксировано планом 1824 г., где на территории компактного углового домовладения показаны исключительно каменные сооружения, не требующие, как свидетельствует документ, исправления (рис. 7) [17].

Умерла Е.А. Мусина-Пушкина в 1829 г., через несколько лет ее наследники (сыновья Иван и Владимир) решили продать родительское имение. В результате после проведенных в 1833 г. переговоров

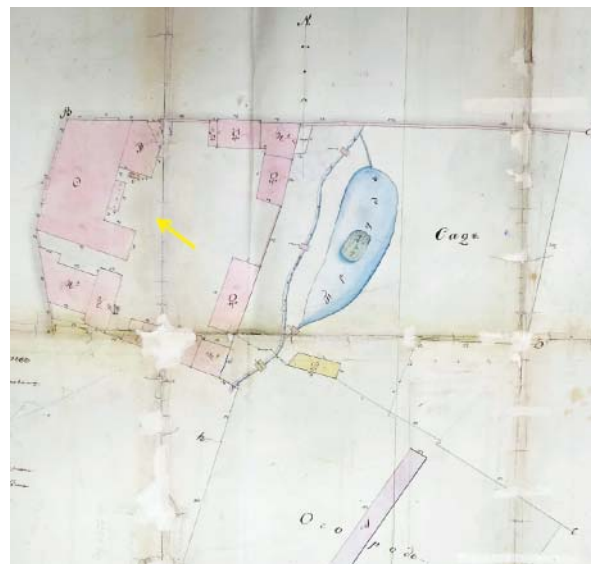


Рис. 7. Москва. Главный дом на плане «дому графини Екатерины Алексеевны Мусиной Пушкиной, состоящему Басманной части 3-го квартала под № прежним 312-м, а ныне 297-м». 5 февраля 1824 г. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 2)

Fig. 7. Moscow. Main house on “The plan of the house of Countess Catherine Alexeevna Musina Pushkina, located in Basmannaya part of the 3rd quarter, number 312 formerly, and now 297”. 5 February 1824. Central State Archive of Moscow. Fund Vol. 1. L. 2 File 173 (437/291; 2)

² Он родился в Москве в марте 1744 г. (Калайдович К.Ф. Биографические сведения о жизни, ученых трудах и собрании российских древностей гр. А.И. Мусина-Пушкина).

в январе 1834 г. усадьба была приобретена Московским учебным округом за 130 тысяч рублей для открытия здесь гимназии.

В дальнейшей судьбе домовладения происходило еще немало преобразований, однако в рамках данной статьи рассмотрим лишь первые этапы формирования главного дома усадьбы, где можно выделить следующие основные периоды.

I строительный период можно отнести к середине XVIII в., когда на месте существующего ныне главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных, по заказу Д.А. Шепелева возводится близкое в плане к квадрату двухэтажное строение. В таком виде оно, по всей видимости, и было зафиксировано планом 1790 г. (2 на рис. 4).

II строительный период следует соотносить с концом 1790-х гг., когда к двум фасадам (северному и западному) дома Д.А. Шепелева был пристроен значительный по площади объем, который увязал здание с красными линиями двух улиц, формирующих северо-западный угол домовладения (2, 3 на рис. 5).

III строительный период охватывает первое десятилетие XIX в. Это время кардинальной перестройки здания середины XVIII столетия. Главный дом усадьбы получил П-образную в плане форму и приобрел классицистический облик, зримыми атрибутами которого стали высокий восьмиколонный портик западного фасада и изящная полуротонда на северо-восточном углу здания. Это обновле-

ние, по сути, навсегда скрыло в недрах масштабного сооружения начала XIX в. дом Д.А. Шепелева.

На этом видоизменения главного дома усадьбы не закончились, но в рамках данной статьи будет уделено внимание только начальному этапу в судьбе этого многосоставного памятника, а именно дому генерала Шепелева.

В результате проведенных натурных исследований удалось выявить значительное количество артефактов, указывающих на объемно-планировочную структуру и стилистические особенности данной постройки. В частности, был обнаружен периметр несущих кирпичных стен строения XVIII столетия, вошедшего в начале XIX в. в состав главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных. Эти стены под наслоением поздних штукатурок сохранили следы декоративно-художественного оформления и отделки своих фасадных поверхностей.

Стеновые конструкции, обладающие признаками более ранней постройки, обнаружены в центральной части здания — на первом и втором этажах дома; увязанные между собой, они являют почти квадратный в плане объем (рис. 8). С внешней стороны его стены обильно украшены остатками срубленного фасадного декора, а по первому ярусу (и отчасти второму) фиксируется первоначальная рустовка. Обнаруженные данные позволяют представить габариты постройки, местоположение проемов и указать на откровенно барочную стилистику ее фасадов.

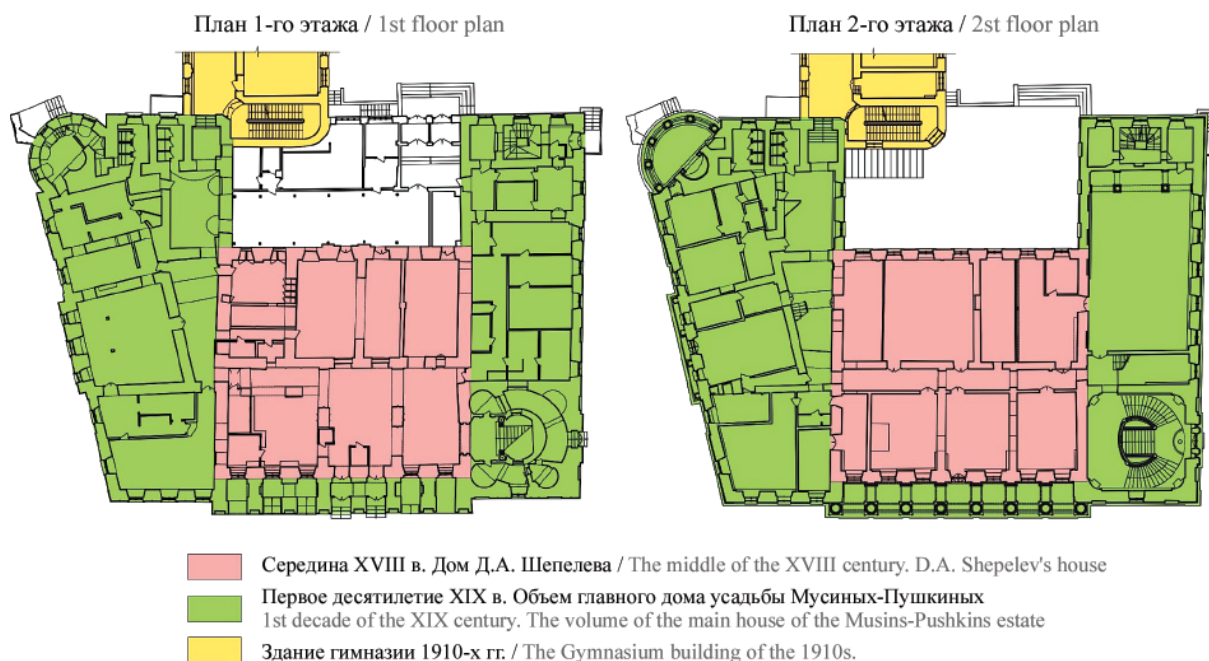


Рис. 8. Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Строительная периодизация главного дома усадьбы. Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 8. Moscow. The Musin-Pushkin estate. Construction periodization of the main house of the estate. Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

В частности, исследования северной стены дома Д.А. Шепелева показали, как в рамках рустовки первого яруса устроены оконные и дверные проемы, наделенные лучковыми переемычками и оформленные по периметру четвертью с венчающим замковым камнем (рис. 9). Рустовка стен, примыкая в районе четвертей, крепится, что делает фасады здания более пластичными. Примечательно, что в четвертях оконных проемов первого этажа сохранились подставы, что свидетельствует о наличии ставень на окнах эпохи барокко. Такое решение достаточно характерно для построек данного периода и имеет немало аналогов. У западного угла «шепелевского» дома фиксируется срубленная пилястра (рис. 9), что позволяет предполагать существование подобного элемента и у восточного угла северного фасада.



Рис. 9. Москва. Главный дом усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Зондаж по первому этажу северного фасада дома Д.А. Шепелева, где фиксируются оконный и дверной проемы, рустовка и фрагмент стесанной пилястры. Фото 2022 г.

Fig. 9. Moscow. Main house of the Musin-Pushkin estate on Spartakovskaya Street. Probing the ground floor of the northern facade of D.A. Shepelev's house, where window and door openings, rustication and a fragment of embossed pilasters are fixed. Photo 2022

Стены второго этажа северного фасада тоже имели руст, однако располагался он только в центральной части (рис. 10). Его фланкировали более протяженные и лишенные руста прясла, которые были пробиты высокими оконными проемами с развитыми барочными наличниками. И хотя последние срублены (рис. 11), можно не только в деталях представить их облик, но и указать на некоторые отличия. К примеру, кирпичные с белокаменными вставками наличники центрального двухосевого ризалита имели завершение в виде треугольного фронтона, а наличники окон во фланкирующих плоскостях венчались лучковым очельем.



Рис. 10. Москва. Главный дом усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Зондаж по второму ярусу северного фасада дома Д.А. Шепелева. Фрагмент срубленного оконного наличника из белого камня с сандриком в виде фронтона и отделка плоскости стены рустом. Фото 2022 г.

Fig. 10. Moscow. Main house of the Musin-Pushkin estate on Spartakovskaya Street. Probe of the second tier of the northern facade of D.A. Shepelev's house. Fragment of cut down window trim of white stone with a fronton and finish the plane of the wall with rustication. Photo 2022



Рис. 11. Москва. Главный дом усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице: а — зондаж по второму ярусу северного фасада дома Д.А. Шепелева. Срубленный оконный наличник. Фото 2022 г.; б — фиксация зондажа по второму ярусу северного фасада дома Д.А. Шепелева. Оконный наличник

Fig. 11. Moscow. Main house of the Musin-Pushkin estate on Spartakovskaya Street: a — probe on the second tier of the northern facade of the house of D.A. Shepelev. Cut window casing. Photo of 2022; b — probe on the second tier of the northern facade of the house of D.A. Shepelev. Window casing

Восточная стена дома Д.А. Шепелева также сохранила рустовку стен первого этажа, и его оконные и дверные проемы аналогичны обнаруженным на северной стене постройки. Однако фасадный декор второго этажа представлен в данном случае в несколько ином исполнении. Помимо следов от срубленных наличников кирпичная кладка сохранила и фрагменты срубленных пилястр (рис. 12). Их мож-



Рис. 12. Москва. Главный дом усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице: а — зондаж по второму ярусу восточного фасада дома Д.А. Шепелева. Следы срубленных оконных наличников, пилястры с белокаменной базой и капителью и венчающего карниза. Фото 2022 г.; б — фиксация зондажа по второму ярусу восточного фасада дома Д.А. Шепелева. Следы срубленных оконных наличников, пилястры с белокаменной базой и капителью и венчающего карниза

Fig. 12. Moscow. Main house of the Musin-Pushkin estate on Spartakovskaya Street: а — probe on the second tier of the eastern facade of the house of D.A. Shepelev. Traces of cut window cills, pilasters with white-stone base and capitals and crowning cornice. Photo 2022; б — Probing fixation on the second tier of the eastern facade of D.A. Shepelev's house. Traces of cut window cills, pilasters with white-stone base and capitals and the crowning cornice

но идентифицировать по закладным белокаменным элементам и срубленной кирпичной поверхности пилястры. Данные элементы располагались в простенках между оконными проемами и формировали пластику паркового фасада постройки. Завершал композицию широкий венчающий карниз, рисунок которого читается в кладке стен как на западном, так и на северном фасадах здания (рис. 12).

Что касается цветового решения постройки середины XVIII в., то его также удалось выявить при проведении натурных исследований. Покраска стен дома была выполнена нежно-розовым цветом по тонкой известковой обмазке (рис. 13). В сочетании с белым декором такое цветовое решение было достаточно распространено в барочных постройках середины XVIII в.

Рассмотрев все материалы исследования, можно констатировать, что дом генерала Шепелева не был ликвидирован после покупки его в конце XVIII в. Мусиными-Пушкиными. Более того, он стал основой для классицистического здания начала XIX в., хотя, будучи встроенным в новый объем естественным образом, утратил свое богатое барочное убранство. Заметим, что подобный подход к архитектурному наследию был достаточно распространен в эпоху Мусиных-Пушкиных. Также поступил и автор архитектурного ансамбля на Разгуляе [18–21].

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить в структуре классицистического дома начала XIX в. постройку середины XVIII столетия, которая практически полностью сохранила



Рис. 13. Москва. Главный дом усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Зондаж по первому этажу северного фасада дома Д.А. Шепелева. Рустовка стен со следами обмазки и цветового решения фасада. Фото 2022 г.

Fig. 13. Moscow. Main house of the Musin-Pushkin estate on Spartakovskaya Street. Probing along the ground floor of the northern facade of D.A. Shepelev's house. Walls rustication with traces of plastering and colour of the facade. Photo 2022

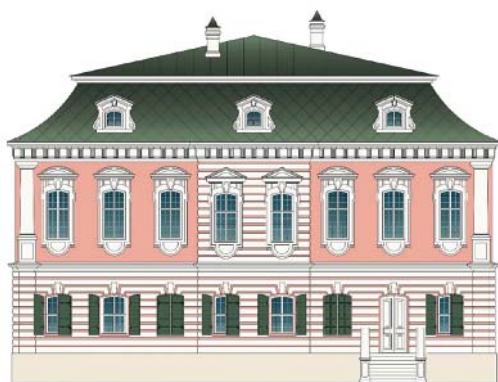


Рис. 14. Москва. Северный фасад дома Д.А. Шепелева, существовавшего на месте основной постройки усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской (Елоховской) улице. Графическая реконструкция на I строительный период (середина XVIII в.). Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 14. Moscow. Northern facade of D.A. Shepelev's house, which existed on the site of the main building of the Musin-Pushkin estate on Spartakovskaya (Elokhovskaya) Street. Graphic reconstruction for the first construction period (the middle of the 18th century). Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

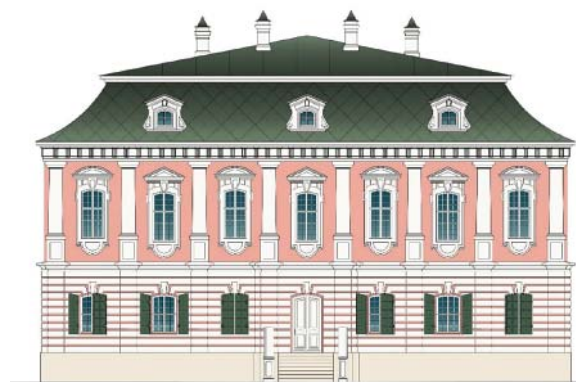


Рис. 15. Москва. Восточный фасад дома Д.А. Шепелева, существовавшего на месте основной постройки усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской (Елоховской) улице. Графическая реконструкция на I строительный период (середина XVIII в.). Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 15. Moscow. East facade of D.A. Shepelev's house, which existed on the site of the main building of the Musin-Pushkin estate on Spartakovskaya (Elokhovskaya) Street. Graphic reconstruction for the first construction period (the middle of the 18th century). Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

первоначальное объемно-пространственное решение и следы фасадного убранства. Их «читаемость» дала возможность предложить реконструкцию интересного памятника эпохи барокко (рис. 14, 15).

В качестве аналогов дому Д.А. Шепелева можно привести ряд в первую очередь московских построек, которые стилистически, типологически и хронологически близки интересующей авторов постройке и позволяют более предметно представить ее облик. Это палаты Щербакова на Бакунинской улице, Птицына на Николоямской, главный дом усадьбы Ясенево, дом Долгоруковых в Колпачном переулке, главная постройка в усадьбе Грибоедова Хмелита, основное сооружение усадьбы Лопасня-Зачатьевское в Чехове. Более подробно приведенные постройки и ряд других аналогичных памятников целесообразно рассмотреть в рамках отдельной статьи, посвященной аналогам предложенной графической реконструкции дома Д.А. Шепелева.

Опираясь на эти аналоги, стало возможным представить недостающие элементы исследуемой постройки. Прежде всего, это крыша главного дома, точнее ее облик. Моделируя утраченный объем, в рамках выявленной стилистики целесообразно предположить ломаную кровлю с мансардой, аналогичную той, что существует на доме Долгоруковых в Колпачном переулке и главном сооружении в вяземской усадьбе Грибоедова. Такое решение

обусловлено, конечно, габаритами исследуемого строения и характером декоративно-художественного убранства фасадов. Ориентируясь на эти аналоги, можно представить и форму люкарн на кровле главного дома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вполненная по результатам исследований реконструкция дома генерала Шепелева, вне всякого сомнения, содержит ряд допущений, однако выявленные детали фасадного убранства, а также многочисленный архитектурный контекст, состоящий из хронологически, стилистически и типологически близких сооружений, дают основание рассматривать ее в качестве наиболее вероятного облика некогда утраченного памятника.

Данная реконструкция ни в коей мере не претендует на ее воплощение в жизнь, а лишь раскрывает историю столь значимого сооружения. В то же время отдельные архитектурные раскрытия I строительного периода, вероятно, обогатили бы архитектурный облик существующего здания и напомнили бы о ранней истории этого домовладения. Однако, учитывая многообразие поздних, в том числе ценных, напластований, возможность выполнения таких архитектурных раскрытий следует определить в контексте общей концепции реставрации памятника.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М., 1986. С. 10–11.
2. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1730. 1995 г. Л. 4.
3. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Ограда усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 3. С. 265–278. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.265-278
4. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Северный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 5. С. 547–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.547-558
5. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Восточный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1307–1323. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1307-1323
6. ЦГА Москвы. Ф. Т-64. Оп. 1. Д. 1059. 1975 г. Л. 3.
7. Архив МГСУ. Дом Мусина-Пушкина, три флигеля и ограда. Историко-архитектурное обследование домовладения. Т. 1. М. : ООО «Арсимум», 2011. С. 52.
8. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М., 1986. С. 12.
9. Сытин П.В. Из истории московских улиц. М., 1958. С. 673.
10. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М., 1986. С. 9–10.
11. ЦГА Москвы. Ф. 105. Оп. 1. Д. 635. 1790 г. Л. 1.
12. ЦГА Москвы. Ф. 105. Оп. 1. Д. 635. 1790 г. Л. 3.
13. Указатель Москвы. М., 1793 г. С. 55.
14. ЦГА Москвы. Ф. 171. Оп. 1. Д. 281. 1799 г. Л. 2.
15. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 1). 1802–1804 гг. (датировку плана см.: Архив МГСУ. Дом Мусина-Пушкина, три флигеля и ограда. Историко-архитектурное обследование домовладения. Т. 1. М. : ООО «Арсимум», 2011).
16. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М., 1986. С. 11.
17. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1730. 1995 г. Л. 4.
18. ЦГА Москвы. Ф. 163. Оп. 5. Д. 18. 1814 г. Л. 22.
19. РГАДА. Ф. 1270. Оп. 1. Д. 756. 1813 г. Л. 9 об.
20. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 2).
21. Белецкая Е.А. Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова. М., 1956. С. 19–20.

Поступила в редакцию 4 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 6 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Тимур Викторович Иванцык — архитектор-реставратор I категории, член Союза реставраторов России, главный архитектор проектов; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; timurahc@yandex.ru;

Алексей Маратович Салимов — доктор искусствоведения, профессор кафедры основ архитектуры и художественных коммуникаций, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН); Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 428091; sampochta@mail.ru.

Вклад авторов:

Иванцык Т.В. — концепция исследования, автор натурных исследований и концепции проекта реставрации.

Салимов А.М. — научное руководство, автор историко-архивных и библиографических исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; Sheet 10-11. (rus.).
2. *Moscow Central State Archive*. Fund T-125. L. 4. File 1730. 1995; Sheet 4. (rus.).
3. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. The fence of Musin-Pushkin estate in Moscow based on historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):265-278. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.265-278 (rus.).
4. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. The north wing of the Musin-Pushkin estate in Moscow: historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):547-558. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.547-558 (rus.).
5. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. The Eastern wing of the Musin-Pushkin estate in Moscow based on historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):829-840. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.829-840 (rus.).

ecture]. 2022; 17(10):1307-1323. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1307-1323 (rus.).

6. *Moscow Central State Archive*. Fund T-64. L. 1. File 1059. 1975; Sheet 3. (rus.).

7. *Archive of the Moscow State University of Civil Engineering (MGU). The Musin-Pushkin Estate, three wings and the fence. Historical and architectural study of the house and grounds. Vol. 1. Arsimum LLC*. Moscow, 2011; 52. (rus.).

8. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; 12. (rus.).

9. Sitin P.V. *From Moscow streets history*. Moscow, 1958 y. Sheet 673. (rus.).

10. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; Sheet 9-10. (rus.).

11. *Moscow Central State Archive*. Fund 105. L. 1. File 635. 1790; Sheet 1. (rus.).

12. *Moscow Central State Archive*. Fund 105. L. 1. File 635. 1790; Sheet 3. (rus.).

13. *Moscow Index*. Moscow, 1793; Sheet 55. (rus.).

14. *Moscow Central State Archive*. Fund 171. L. 1. File 281. 1799; Sheet 2. (rus.).

15. *Moscow Central State Archive*. Fund T-1. L. 2. File 173 (437/291; 1). 1802-1804 y. The dating of the plan can be viewed in: *Archive of the MGU. The Musin-Pushkin Estate, three wings and the fence. Historical and architectural study of the house and grounds*. T. 1. Arsimum LLC. Moscow, 2011. (rus.).

16. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; Sheet 11. (rus.).

17. *Moscow Central State Archive*. Fund T-125. L. 4. File 1730. 1995; Sheet 4. (rus.).

18. *Moscow Central State Archive*. Fund 163. L. 5. File 18. 1814; Sheet 22. (rus.).

19. *Russian state archive of ancient documents*. Fund 1270. L. 1. File 756. 1813; Sheet 9 back. (rus.).

20. *Moscow Central State Archive*. Fund T-1. L. 2. File 173 (437/291; 2). (rus.).

21. Beletskaya E.A. *Architectural albums* M.F. Kazakov. Moscow, 1956; Sheet 19-20. (rus.).

Received November 4, 2022.

Adopted in revised form on April 6, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

B I O N O T E S: **Timur V. Ivantsyk** — architect-restorer of the 1st category, member of the Union of Restorers of Russia, chief architect of projects; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; timurahc@yandex.ru;

Aleksey M. Salimov — Doctor of Arts, Professor of the Department of Basics of Architecture and Artistic Communication, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 428091; sampochta@mail.ru.

Contribution of the authors:

Timur V. Ivantsyk — research concept, author of full-scale research and the concept of the restoration project.

Aleksey M. Salimov — scientific guidance, author of historical and bibliographic studies.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 72:627.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.841-851

Особенности формирования архитектурно-планировочной структуры и типологии морских вокзалов России 1950–1990 гг.

Алина Юрьевна Шлепцова, Ольга Евгеньевна Долинина

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Морские пассажирские перевозки в России обладают большим потенциалом развития. Инфраструктура по обслуживанию морского пассажирского сообщения была сформирована в советский период, большинство ее объектов нуждается в модернизации, так как они перестали отвечать современным требованиям по обеспечению комплексного и высококачественного обслуживания пассажиров. Цель исследования — проанализировать советский опыт проектирования и строительства морских вокзалов для определения основных исторических этапов формирования архитектуры морских вокзалов, особенности которых могут быть учтены при разработке рекомендаций по их реконструкции.

Материалы и методы. Для выявления исторических этапов формирования архитектуры морских вокзалов на территории Советского Союза использован комплексный подход, включающий ретроспективный анализ, изучение литературных, нормативно-правовых актов, иллюстративных, графических источников, относящихся к подобным объектам.

Результаты. Отражен опыт строительства морских вокзалов в советское время и выделены два исторических периода в формировании их архитектуры. Дана характеристика каждого из этапов исходя из особенностей функциональной организации и архитектурно-планировочных решений морских вокзалов. Выделены предпосылки к преобразованию и реконструкции существующих объектов, приведены примеры данных процессов в России.

Выводы. Проектирование новых морских вокзальных комплексов (МВК), а также модернизация имеющихся вокзалов должны отвечать современным требованиям международного уровня для развития туристической индустрии, а также учитывать исторические особенности их формирования. Потребность в преобразованиях обусловлена техническим и технологическим прогрессом, изменениями в социально-экономической сфере. Первостепенными являются определение места вокзала в системе внешнего и внутреннего пассажирского транспорта города и создание условий для эксплуатации МВК не только как мультимодальных объектов транспортной инфраструктуры, но и важных узлов в системе общественных пространств города.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морской вокзал, типология морских вокзалов, функциональная организация морских вокзальных комплексов, архитектурно-планировочные решения морских вокзальных комплексов, транспортный узел, инженерно-технологическое решение, транспортная инфраструктура

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шлепцова А.Ю., Долинина О.Е. Особенности формирования архитектурно-планировочной структуры и типологии морских вокзалов России 1950–1990 гг. // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 841–851. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.841-851

Автор, ответственный за переписку: Алина Юрьевна Шлепцова, alina.shleptsova@yandex.ru.

Peculiarities of formation of the architectural-planning structure and typology of Russian marine stations 1950–1990

Alina Yu. Shleptsova, Olga E. Dolinina

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Maritime passenger transportation in Russia has a great potential for development. However, the infrastructure for servicing sea passenger traffic was formed during the Soviet period and most of its facilities need modernization and transformation, since they no longer meet modern requirements for providing comprehensive and high-quality passenger service. The purpose of the study is to analyze the Soviet experience of design and construction of sea stations to identify the main historical stages in the formation of the architecture of marine stations, the features of which can be taken into account when developing recommendations for their reconstruction.

Materials and methods. To identify the historical stages of the formation of the architecture of marine stations on the territory of the Soviet Union, a complex approach was used, including a retrospective analysis, the study of literary, regulatory and legal acts, illustrative, graphic sources related to such objects.

Results. The article reflects the experience of the construction of marine stations in the Soviet period and identifies two historical periods of the formation of their architecture. The characteristic of each of the stages is given based on the features

of the functional organization and architectural and planning solutions of marine stations. The prerequisites for the transformation and reconstruction of existing facilities are highlighted and examples of these processes in Russia are given.

Conclusions. The design of new marine station complexes, as well as the modernization of existing stations should meet the most modern international requirements for the development of the tourism industry, as well as take into account the historical features of their formation.

KEYWORDS: marine station, typology of marine stations, functional organization, architectural and planning solutions of marine terminal complexes, transport node, engineering and technological solution, transport infrastructure

FOR CITATION: Shleptsova A.Yu., Dolinina O.E. Peculiarities of formation of the architectural-planning structure and typology of Russian marine stations 1950–1990. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):841–851. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.841-851 (rus.).

Corresponding author: Alina Yu. Shleptsova, alina.shleptsova@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В середине прошлого века наблюдался рост популярности морских круизов: СССР обладал одним из крупнейших пассажирских флотов в мире, все больше отечественных судов переводилось на круизные направления. За последние десятилетия сфера морских пассажирских перевозок стагнировала: если в 1980-е гг. морские порты и терминалы СССР в год принимали более 2 млн человек, на сегодняшний день пассажиропоток снизился практически в 20 раз. Здания морских вокзалов выполняют в основном роль пересадочных пунктов пассажиров на различные виды транспорта, многие из них используются не по назначению, так как перестали соответствовать требованиям комплексного и высококачественного обслуживания пассажиров.

Для того чтобы правильно трансформировать существующие здания морских вокзалов на территориях российских городов, необходимо изучить исторический опыт их проектирования.

Актуальность выбранного направления исследования подтверждает разработанный ФГУП «Росморпорт» проект Концепции развития круизного туризма в Российской Федерации на период до 2024 года, в котором указано, что одной из основных задач развития морского круизного туризма является создание современной комфортной среды береговой линии и развитие инфраструктуры круизного туризма на территории субъектов Российской Федерации¹.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Накопленная теоретическая база по теме исследования представлена материалами конференций, научными статьями и диссертациями, которые можно сгруппировать по следующим направлениям: вопросы архитектурной типологии морских вокзалов (Н.Н. Майоров, В.А. Фетисов [1], А.В. Котельникова [2], А.В. Королькова [3]); проблемы реконструкции морских вокзалов (А.В. Котельникова [4], С.А. Коршунова [5], И.С. Шарцев [6],

С. Кондрашина [7], Н.А. Василенко, Н.Д. Черныш [8]). Также использованы нормативно-правовые акты и справочники по проектированию морских вокзалов: СНиП II-B.11–54 «Часть II. Нормы строительного проектирования»², СНиП II-B.11–58 «Часть II. Раздел В. Глава 11. Общественные здания»³, СНиП II-85–80 «Вокзалы»⁴, Санитарные правила для морских и речных портов СССР⁵.

Труды первой группы авторов позволили выполнить ретроспективный анализ развития морских вокзалов и сформулировать требования к проектированию современных морских вокзальных комплексов (МВК). Работы второй группы авторов дали возможность разобраться в вопросах трансформации морских вокзалов в современные МВК.

Рассматриваемые примеры подобраны по принципу разнообразия их схем и иллюстрируют наиболее характерные для строительной практики черты морских вокзалов СССР.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все здания транспортного назначения изначально несут в себе функции таких операций, как отправление, прибытие или пересадка пассажиров. Планировочная структура первых морских вокзалов выполнялась по принципу железнодорожных. Морские вокзалы начала XIX в. были скромными

² СНиП II-B.11–54. Часть II. Нормы строительного проектирования : утв. по поручению Совета Министров СССР Государственным комитетом Совета министров СССР по делам строительства для обязательного применения с 1 января 1955 г. всеми министерствами, ведомствами и Советами Министров союзных республик. URL: https://norm-load.ru/SNiP/old-snip/snip_54/1-5.htm

³ СНиП II-B.11–58. Часть II. Раздел В. Глава 11. Общественные здания : утв. Госстроем СССР 11.04.1958. 2-е исправл. изд-е. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/b10/4293781311.pdf>

⁴ СНиП II-85–80. Вокзалы. URL: <https://gostrf.com/norm-data/1/4293793/4293793679.pdf>

⁵ Санитарные правила для морских и речных портов СССР : утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 02.06.1989 № 4962–89. URL: <https://legalacts.ru/doc/sanitarnye-pravila-dlja-morskikh-i-rechnykh-portov/>

¹ Концепция развития круизного туризма в Российской Федерации на период до 2024 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/uXXZ3AvF4jE0Zq3f7xBCP9gL9RjBfaRH.pdf>

практичными сооружениями, но с развитием железнодорожного и водного сообщения они трансформировались в узнаваемые «ворота» города: архитектура данных объектов стала частью их визуального образа [2]. Однако такие внешние и внутренние факторы, как удобство совершаемого путешествия, увеличение срока пребывания пассажиров в посещаемых городах и промежутков между пересадками, привели к необходимости расширения функциональной программы морских вокзалов.

Строительство морских вокзалов в мире стало массовым с 30-х гг. XX в. Опыт проектирования морских вокзалов в СССР характеризуется разнообразием архитектурно-планировочных решений. Особо крупные масштабы строительства в СССР были достигнуты по окончании восстановительного периода после Второй мировой войны. Родоначальниками морских вокзалов на территории Советского Союза стали вокзалы на Черноморском побережье (например, в таких городах, как: Новороссийск, Сочи, Сухум, Батуми). В советское время активизировалась деятельность Крымско-Кавказской круизной линии. Популярность она обрела в 1970–1988 гг.: за год по ней обслуживалось до 130 тыс. пассажиров, в том числе 10–15 тыс. иностранцев. На Балтийском побережье было востребовано направление в страны Европы — Германию, Финляндию и Швецию. Также планировалось построить крупные морские вокзалы в портах Черного, Каспийского и Балтийского морей, а также на Тихом океане [9].

Таким образом, морские путешествия, осуществляемые в СССР, можно разделить на четыре типа:

- европейские круизы для советских граждан;
- международные круизы для иностранцев;
- круизы по Черному морю для советских граждан и иностранцев;
- круизы по Тихому океану для советских граждан и иностранцев.

Как правило, здания морских вокзалов проектировались с учетом преобладающего вида пассажирского сообщения и соответствующих категорий обслуживаемых пассажиров. В частности, различа-

ли следующие виды сообщений исходя из протяженности их следования:

- дальние;
- местные;
- пригородные;
- смешанные⁶.

Архитектура морских вокзалов диктовалась теми же композиционными принципами, что и архитектура объектов, являющихся ландшафтно-градостроительными акцентами. Отечественному опыту исторического развития архитектуры морских вокзалов характерно несколько этапов исходя из особенностей архитектурно-типологических разновидностей вокзальных объектов. Эволюция последних шла от простых площадей с навесами в XIX–XX вв. до самодостаточных инновационных зданий и комплексов, удовлетворяющих требованиям времени. В рамках СССР архитектура морских вокзалов стала распространенным объектом проектирования после окончания Второй мировой войны. Можно выделить два этапа данного процесса:

- I этап — 1950-е гг.;
- II этап — 1960–1980-е гг.

Характеристика каждого из этапов приведена ниже.

I этап

Зданиям морских вокзалов первого этапа (1950-е гг.) присущи прямоугольные одноэтажные или двухэтажные корпуса в разных исторических стилях, которые получали завершение в виде центральной башни, деление на функциональные блоки и симметричность объемов: главный вход и вестибюль располагались в центре здания, по бокам размещались залы ожидания, служебные помещения и кассы. При этом залы для пассажиров эконом-класса отделялись от помещений для ожидания высших классов [4].

Примером служит морской вокзал в г. Сочи, построенный в 1955 г. по проекту К. Алабяна и Л. Карлика с привлечением скульптора В. Ингала (рис. 1).

⁶ Пособие по проектированию вокзалов (к СНиП II-85–80). URL: <https://gostrf.com/normadata/1/4294813/4294813130.pdf>

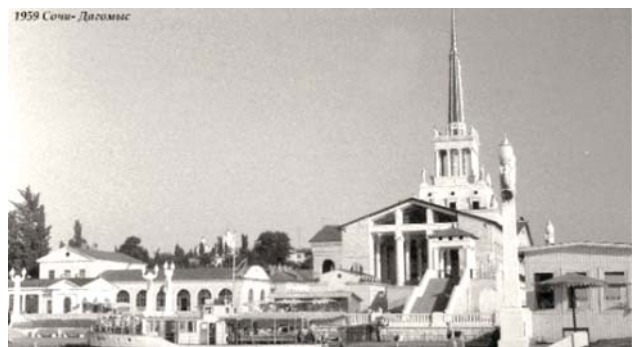


Рис. 1. Здание морского вокзала в г. Сочи, 1956 г.

Fig. 1. The building of the marine station in Sochi, 1956



a



b

Рис. 2. Здание морского вокзала в г. Батуми (a) и здание первого морского вокзала в г. Находке (b)

Fig. 2. The building of the marine station in Batumi (a) and the building of the first marine station in Nakhodka (b)

Комплекс выполнен в стилистике сталинского ампира, состоит из двухэтажного корпуса и галереи Г-образной формы. В центре здания располагается просторный зал ожидания, декорированный лепниной, картинами, часами и цветной керамикой. Здание венчает 71-метровая башня со шпилем. Анфилада колонн из белого мрамора придает морскому вокзалу строгий, но облегченный облик [10, 11].

По аналогичному принципу организовано архитектурно-планировочное решение морских вокзалов в г. Батуми и Находке (рис. 2).

Таким образом, в период 1950-х гг. приемы формообразования зданий морских вокзалов были ограничены одним типом, однако оформление фасадов и декорирование интерьеров выполнялись в различных стилистических решениях. Функциональная программа морских вокзалов также была направлена только на обслуживание пассажиров преимущественно кратковременного пребывания.

II этап

Более разнообразны архитектурно-планировочные решения морских вокзалов периода модернизма, преобладающее количество которых было реализовано в 1970-х гг. Для проектирования морских вокзалов Государственным комитетом СССР по строительству была разработана нормативная документация: СНиП II-B.11–54 «Часть II. Нормы строительного проектирования»², СНиП II-B.11–58 «Часть II. Раздел В. Глава 11. Общественные здания»³, которые затем были заменены на СНиП II-85–80 «Вокзалы»⁴, Санитарные правила для морских и речных портов СССР от 02.06.1989 № 4962–89⁵, по ним морские вокзалы были систематизированы по характеру основных операций на пассажирские и грузопассажирские, по месту расположения на морских линиях — на конечные и промежуточные. Морские вокзалы возводились по индивидуальным проектам в связи с уникальностью исходных данных, определяющих компоновку будущих зданий; многообразием габаритов обслужи-

ваемых судов; разностью отметок прилива и отлива; сезонностью судоходства, навигационными и погодными условиями и др.

Так, для одновременного обслуживания нескольких крупных судов здания многих морских вокзалов проектировались значительной протяженностью. В зависимости от этих условий здание могло размещаться вдоль набережной, на выступающих в акваторию пирсах; на эстакаде, вынесенной в море; плавучей пристани и т.д. Например, здание морского вокзала в г. Сухуме (СССР) выступает на сваях в акваторию (рис. 3).

Морской вокзал в г. Новороссийске, построенный в 1974 г. на месте старого вокзала, располагается на выступающем в море искусственно насыпном Каботажном моле № 34 длиной 240 м и шириной 100 м. Юго-западная граница участка стыкуется с городом посредством благоустроенной набережной, которая плавно перетекает в привокзальную Форумную площадь (рис. 4). Вокзал имеет внутренний атриум, один из торцов здания акцентируется смотровой башней — ее нависающий объем в форме летающей тарелки создает его узнаваемый образ [12].



Рис. 3. Здание морского вокзала, г. Сухум

Fig. 3. The building of the sea station, Sukhum



Рис. 4. Здание морского вокзала, г. Новороссийск

Fig. 4. The building of the sea station, Novorossiysk

В 1970-е гг. наибольшее распространение получило 2–3-этажное решение зданий морских вокзалов. Это связано с популяризацией строительства грузопассажирского типа морских вокзалов, для которых характерно расположение грузовых складов на уровне причалов. Помещения обслуживания пассажиров находились на уровне второго либо третьего этажа⁷. Так, например, были решены морские вокзалы во Владивостоке, Ленинграде, Холмске (о. Сахалин) и Сухуме (СССР).

Требования по безопасности и сокращению пассажирских маршрутов минимизировали пересечения либо встречное движение людских потоков с транспортом на одном уровне территории морских вокзалов. Помещения и оборудование здания морских вокзалов располагали с учетом рациональной технологической последовательности совершаемых пассажирами операций, при которой возвратные движения и массовое скопление пассажиров должны быть сведены к минимуму⁸. Длительность пребывания в порту транзитных пассажиров и пассажиров дальнего следования вызывала необходимость создания комфортных условий для ожидания и отдыха на морском вокзале. Удобства, предоставляемые пассажирам, должны были соответствовать условиям пребывания на современных комфортабельных теплоходах.

Морские вокзалы делились на определенные разряды, классификация которых была предложена Союзморпроектом исходя из общей вместимости зданий:

- I разряд — вокзалы вместимостью более 1000 пассажиров;
- II разряд — от 500 до 1000 пассажиров;
- III разряд — от 200 до 500 пассажиров;

⁷ Большая советская энциклопедия. URL: https://bse.slovaronline.com/22353-morskoy_vokzal

⁸ РД 31.3.05–97. Нормы технологического проектирования морских портов. URL: <https://specrazdel.ru/uploaded/doki/rd-31-3-05-97.pdf>

• IV разряд — менее 200 пассажиров (данные вокзалы-павильоны обслуживают преимущественно местные линии).

Следует отметить, что в отличие от других видов транспорта, которые специально приспособлены только для обслуживания пассажиров, в морском судоходстве практически не использовались морские суда, единственная функция которых была перевозка людей. Рентабельность морских перевозок требовала дополнение пассажирских перевозок услугами грузовой логистики, что повлияло на просторанственную организацию морских вокзалов.

В целях организации рациональной транспортировки и распределения грузов, пересадки пассажиров большинство морских вокзалов спроектированы в комплексе с железнодорожными вокзалами. Здания морских вокзалов стали уникальными объектами общегородского значения, мультимодальными транспортными узлами с развитым железнодорожным и автомобильным сообщением [13, 14]. Прямой связью с железнодорожным вокзалом обладает морской вокзал во Владивостоке (СССР, 1964 г.) (рис. 5). Морские вокзалы Находки (СССР, 1970 г.) и Мурманска (СССР, 1961 г.) (рис. 6) также находятся в пешей доступности от железнодорожных.



Рис. 5. Морской вокзал в г. Владивостоке

Fig. 5. Marine station in Vladivostok

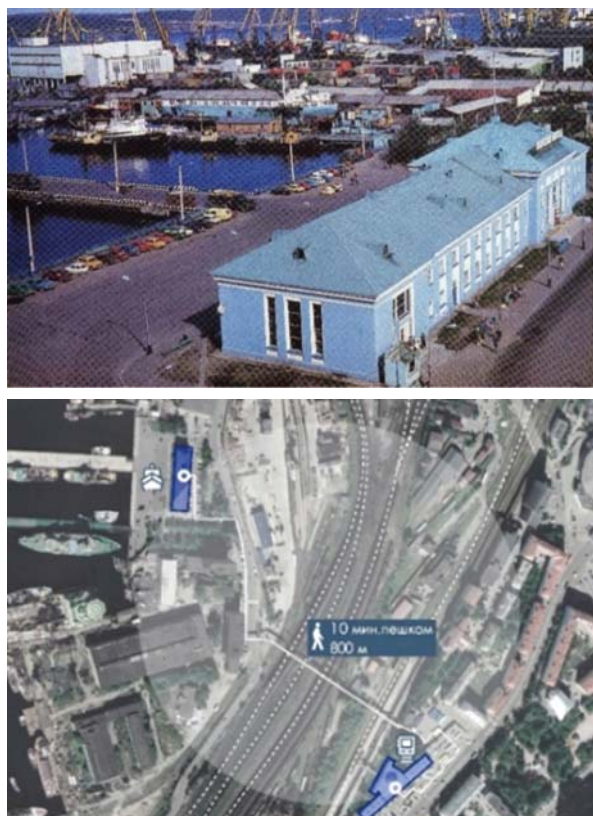


Рис. 6. Морской вокзал в г. Мурманске

Fig. 6. Marine station in Murmansk

Обусловленность функционально-технологической организации морских вокзалов от градостроительных особенностей портов и подъездных дорог, местных климатических и гидрогеологических условий, категорий обслуживаемых пассажиров и перечня преобладающих грузов привела к усложнению их архитектурно-планировочных решений и возникновению особого технологического оборудования, облегчающего логистику пассажиров. Для удобного прохода пассажиров на судно над грузовыми площадками, автомобильными проездами и железнодорожными путями стали применяться специальные посадочные устройства, такие как подъемно-поворотные краны и крытые телескопические трапы⁷ (рис. 7).

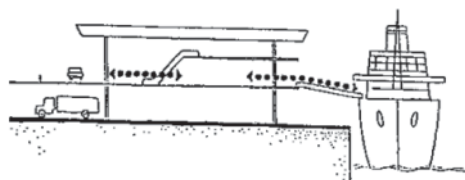


Рис. 7. Схема вертикального разделения пассажирских и грузовых операций

Fig. 7. Scheme of vertical separation of passenger and cargo operations

Большинство зданий морских, речных и железнодорожных вокзалов российских городов, построенных в стиле позднесоветского модернизма, представляли собой массивные сооружения. Внутреннее инженерно-технологическое решение было выполнено с применением последних строительных технологий [15, 16]. Фасады морских вокзалов решены в характерном для модернизма сочетании стеклянных витражей и железобетонных панелей, в оформлении интерьеров широко использовался натуральный камень. Архитектурно-планировочной структуре морских вокзалов позднего советского периода присущи просторные зальные помещения для обслуживания пассажиров; ленточное остекление фасадов, раскрывающее внутреннее пространство здания в сторону моря; использование навесов и балконов для пассажиров и посетителей.

Художественно-архитектурный образ ряда морских вокзалов 70-х гг. XX в. отсылал к характерным для водных судов элементам: окна-иллюминаторы, «корабельные» ограждения балконов и лоджий, белоснежные фасады океанских лайнеров. Стихия воды и образ скользящего по ней корабля вдохновляли архитекторов морских вокзалов в Ленинграде (СССР, Северо-Западный регион), Одессе (СССР, Северное Причерноморье на юго-западе Украины). Морской вокзал в Сухуме (СССР, Абхазия) напоминает своими очертаниями белоснежный лайнер, пришвартованный к причалу.

Фасады морского вокзала в г. Ленинграде (рис. 8), построенного в 1973–1983 гг. по проекту архитекторов В.А. Сохина и Л.В. Калягина, облицованы объемными панелями, напоминающими наполненные ветром паруса. Здание венчает 78-метровый титановый шпиль с изображением корабля на его острие. Вокзальный комплекс включает пять причалов, место для пограничного и таможенного досмотра, ресторан, гостиницу «Морская» на седьмом этаже главного корпуса и конференц-комплекс. Суммарная длина причалов составляет 720 м, глубина у причалов достигает 9 м, что позволяет принимать суда всех типов, включая крупнотоннажные. По своим техническим возможностям морской вокзал в г. Ленинграде способен был принять до 1 млн пассажиров, прибывающих морским путем.

Морской вокзал в г. Одессе (рис. 9) был сооружен на молу — специальном гидротехническом ограждающем сооружении-насыпи для защиты акватории порта от волнений — размером 420 × 110 м. Основной идеей проекта пассажирского здания стало полное разделение грузовых и пассажирских операций с учетом тесных технологических связей мола и расположенных поблизости грузовых терминалов. Первый этаж морского вокзала отведен под грузовые склады. Перекрытие складов образовывало обширную платформу, на которой размещен основной объем морского вокзала. Трехуровневый вестибюль объединен с операцион-



Рис. 8. Морской вокзал в г. Ленинграде (СССР)

Fig. 8. Marine station in Leningrad (USSR)

ным залом, к которому примыкали ресторан, кафе и другие обслуживающие помещения. Посадка пассажиров на судно обеспечивалась с уровня пассажирской платформы по передвижным трапам (рис. 9) [4].

В связи с тем, что ценность советского и позднесоветского модернизма до сих пор в дискурсе профессионального поля неоднозначна, здания морских вокзалов рассматриваемого периода подвергались радикальным изменениям (морские вокзалы в Сочи, Санкт-Петербурге, во Владивостоке, Мурманске и других городах) [5, 17]. Анализ современного состояния зданий морских вокзалов в России показывает, что сохраняется необходимость в деликатной реконструкции существующих объектов советского этапа и их адаптации к расширенной функциональной программе [1, 12].

Очевидно, что нужен более комплексный подход к решению современных проблем: значительно возросла вместимость круизных лайнеров по сравнению с советским периодом, что обусловило увеличение пассажиропотока, с которым не может справиться большинство зданий имеющихся морских вокзалов [18, 19]. Кроме того, появилась более развитая транспортная сеть, которая требу-

ет от старых зданий морских вокзалов создания усовершенствованных развязок и эстакад. Следует также предусмотреть, чтобы здание использовалось в свободный от навигации период и сочетало в целях рентабельности в себе не только транспортную, но и жилую, рекреационную, торговую, а также общественно-развлекательную функции [19, 20].

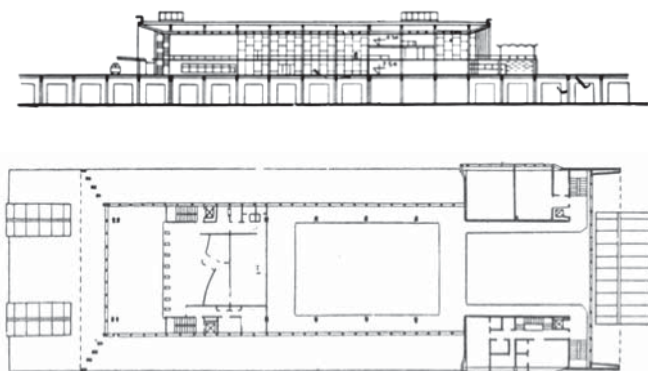
Сейчас появляется ряд объектов, которые удовлетворяют данным требованиям. Например, в целях модернизации старого морского вокзала во Владивостоке после реконструкции здания была предложена концепция новой набережной с комплексом общественных зданий над железной дорогой. Проект предполагает объединение морского, железнодорожного и автовокзалов (рис. 10) [21].

Строительство нового морского пассажирского терминала в г. Санкт-Петербурге было вызвано неспособностью советского вокзала 1983 г. постройки принимать круизные пассажирские суда длиной более 200 м, которые ранее прибывали в торговый порт города (рис. 11). Сейчас новый круизный порт Морской фасад в г. Санкт-Петербурге — это единственный в Северо-Западном регионе России специализированный пассажирский порт, включающий семь причалов общей длиной более 2200 м для приема



Рис. 9. Морской вокзал в г. Одессе (СССР)

Fig. 9. Marine station in Leningrad (USSR)



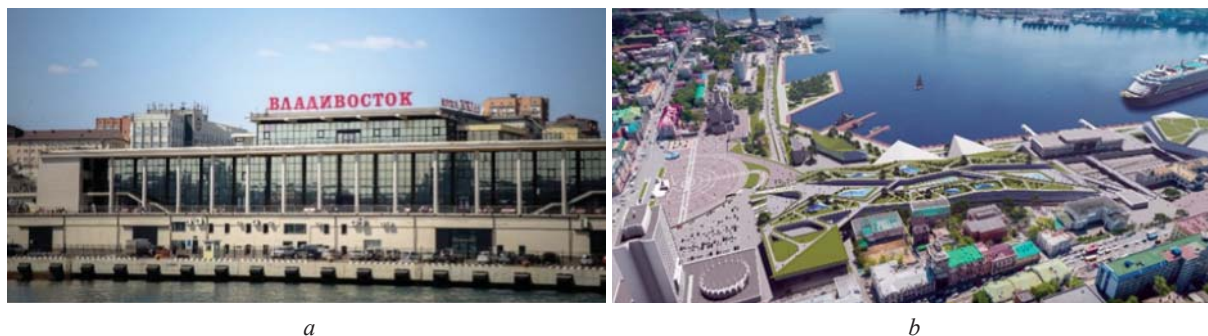


Рис. 10. Здание морского вокзала в г. Владивостоке после реконструкции (а) и концепция модернизации территории рядом с вокзалом (б)

Fig. 10. The building of the marine station in Vladivostok after reconstruction (a) and the concept of modernization of the territory next to the station (b)



Рис. 11. Пассажирский порт Морской фасад, г. Санкт-Петербург

Fig. 11. Passenger port Marine Facade, St. Petersburg

круизных лайнеров и грузопассажирских паромов длиной до 340 м, а также три круизных и один специализированный круизно-паромный терминал [17]. Территория бывшего морского вокзала в г. Санкт-Петербурге также подверглась реконструкции.

Создание многофункциональных вокзальных комплексов способствует эффективному использованию ресурсов территории и вложению инвестиций, повышению комплексности предоставления услуг, улучшению обслуживания пассажиров [22–26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования исторического опыта формирования и становления архитектуры морских вокзалов на территории Советского Союза установлены два этапа их развития. Здания морских вокзалов советского периода различались как объ-

емно-планировочными решениями, так и функционально-технической организацией. Ряд морских вокзалов советского времени в настоящее время используется не по прямому назначению, что вызвано проблемами в круизной индустрии, возникшими после распада Советского Союза.

Трансформация морских вокзалов в современные МВК необходима для дальнейшего развития отрасли в современных условиях. Потребность в преобразованиях обусловлена техническим и технологическим прогрессом, изменениями в социально-экономической сфере. Первостепенными являются определение места вокзала в системе внешнего и внутреннего пассажирского транспорта города и создание условий для эксплуатации МВК не только как мультимодальных объектов транспортной инфраструктуры, но и важных узлов в системе общественных пространств города.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Майоров Н.Н., Фетисов В.А. Морские пассажирские терминалы: современные тенденции развития // Логистика: современные тенденции развития : мат. VII Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 312–315.
2. Котельникова А.В. Морской вокзал как символ культуры города // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 6–4. С. 96–99.
3. Королькова А.В. Принципы формирования архитектуры современных морских вокзальных ком-

плексов // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2017. № 1 (38). С. 200–212. EDN YGILBJ.

4. Котельникова А.В. Особенности развития архитектурно-планировочной организации морского вокзала // *Архитектура и современные информационные технологии*. 2016. № 1 (34). С. 7. EDN VLOEGX.

5. Коришкова С.А. Концепция развития транспортных узлов на примере реконструкции морского порта в г. Сочи // *Мир современной науки*. 2011. № 4 (7). С. 27–30.

6. Шарцев И.С. Реконструкция морских пассажирских терминалов // *Наука, образование и экспериментальное проектирование : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф.* 2014. С. 180. EDN ROFGOP.

7. Кондрашина С. Комплекс зданий и сооружений морского пассажирского терминала // *Tatlin Mono*. 2013. № 4 (37, 124). С. 74–85.

8. Василенко Н.А., Черныш Н.Д. Функционально-планировочная структура транспортных зданий и сооружений на примере морских пассажирских терминалов // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020. № 3 (52). С. 58–83. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15204

9. Селиванов В.В. Международный морской туризм: основы организации и методология : учебное пособие. Симферополь : Издательство Типография «Ариал», 2015. 296 с.

10. Багдасарян С.Д., Самсоненко Т.А., Рагер Ю.Б. Развитие инфраструктуры города-курорта Сочи в 1945–1960 гг. // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Гуманитарные науки*. 2017. № 9. С. 4–9. EDN ZHNWEX.

11. Маркова О.Н. Монументальные «морские ворота» курорта Сочи: история создания // *Черноморско-Средиземноморский регион в системе национальных интересов России: история и современность: к 80-летию начала Великой Отечественной войны : мат. Междунар. науч.-практ. конф.* 2021. С. 579–584.

12. Шлепцова А.Ю. Структура и архитектурный облик круизных портов // *Строительство: наука и образование*. 2021. Т. 11. № 3. С. 41–57. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.3.3

13. Голубев Г.Е. Многоуровневые транспортные узлы. М. : Стройиздат, 1981. 152 с.

14. Явейн И.Г. Вокзал и площадь — узел единой транспортной системы страны // *Архитектура СССР*. 1961. № 3.

15. Васильев Е.В., Щетинин Н.Н. Архитектура железнодорожных вокзалов. М. : Издательство литературы по строительству, 1967. 273 с.

16. Батырев В.М. Вокзалы. М. : Стройиздат, 1988. 214 с.

17. Smirnov A., Zenkin M. The role of water transport in the formation of the brand of the coastal regions: The example of St. Petersburg // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019*. 2021. Pp. 399–408. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_34

18. Королькова А.В. Формирование архитектурно-компоновочных решений морских вокзалов // *Наука, образование и экспериментальное проектирование : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф.* 2017. С. 487–488.

19. Королькова А.В. Архитектурно-планировочная организация современных морских вокзальных комплексов : дис. ... канд. архитектуры. М., 2019.

20. Pollock N. Yokohama port terminal // *Architectural record*. 2002. № 11. Pp. 142–149.

21. Мартышенко Н.С. Владивосток — новый центр развития круизного туризма в Северо-Восточной Азии // *Вестник современных исследований*. 2018. № 3.2 (18). С. 169–171. EDN XPHZVR.

22. Jones W. New transport architecture: Travel hubs in the 21st Century. London : Mitchell Beazley, 2006. 272 p.

23. Yashu F. Urban and traffic design of shanghai port international passenger transport center // *Architecture technology & design*. 2009. Vol. 5. Pp. 74–81.

24. Pallis A.A., Rodrigue J.-P., Notteboom T.E. Cruises and cruise ports: Structures and strategies // *Research in Transportation Business & Management*. 2014. Vol. 13. Pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.12.002

25. Pallis A.A., Vaggelas G.K. Cruise shipping and green ports // *Green Ports*. 2019. Pp. 255–273. DOI: 10.1016/b978-0-12-814054-3.00013-x

26. Cheng Z., Gong L., Li C. Design and practice of cruise ports. Singapore : Springer, 2020.

Поступила в редакцию 20 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Алина Юрьевна Шлепцова — магистрант Инженерной академии; Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН); 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; alina.shleptsova@yandex.ru;

Ольга Евгеньевна Долинина — кандидат архитектуры, старший преподаватель Инженерной академии; Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН); 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; 3380838@gmail.com.

Вклад авторов:

Шлепцова А.Ю. — концепция исследования, написание исходного текста, доработка текста, итоговые выводы.

Долинина О.Е. — научное руководство, развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Maiorov N.N., Fetisov V.A. Marine passenger terminals: modern trends. *Logistics: modern development trends : materials of the XVII International Scientific and Practical Conference*. 2018; 312-315. (rus.).
2. Kotelnikova A.V. The Sea station as a symbol of the city's culture. *Theoretical and Applied Aspects of Modern Science*. 2014; 6-4:96-99. (rus.).
3. Korolkova A. Principles of architectural design of modern marine terminal complexes. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2017; 1(38):200-212. EDN YGILBJ. (rus.).
4. Kotelnikova A.V. Features of the development of the architectural and planning organization of the sea station. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2016; 1(34):7. EDN VLOEGX. (rus.).
5. Korshunova S.A. The concept of development of transport hubs on the example of reconstruction of the seaport in Sochi. *The world of modern science*. 2011; 4(7):27-30. (rus.).
6. Shartsev I.S. Reconstruction of marine passenger terminals. *Science, education and experimental design : abstracts of reports of the international scientific and practical conference*. 2014; 180. EDN ROFGOP. (rus.).
7. Kondrashina S. Complex of buildings and structures of the marine passenger terminal. *Tatlin Mono*. 2013; 4(37,124):74-85. (rus.).
8. Vasilenko N.A., Chernysh N.D. Functional planning structure of transport buildings and structures on the example of marine passenger terminals. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020; 3(52):58-83. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15204 (rus.).
9. Selivanov V.V. *International sea tourism: basics of organisation and methodology : textbook*. Simferopol, Limited Liability Company Publishing House Printing House "Arial", 2015; 296. (rus.).
10. Bagdasaryan S., Samsonenko T., Rager U. The infrastructure of the city-resort of Sochi in 1945-1960-s. *Modern Science: actual problems of theory and practice. Series: Humanities*. 2017; 9:4-9. EDN ZHNWEX. (rus.).
11. Markova O.N. Monumental "sea gates" of Sochi resort: the history of creation. *The Black Sea-Mediterranean region in the system of national interests of Russia: history and modernity: to the 80th anniversary of the beginning of the Great Patriotic War : materials of the International Scientific and Practical Conference*. 2021; 579-584. (rus.).
12. Shleptsova A.Yu. Structure and architectural appearance of cruise ports. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(3):41-57. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.3.3 (rus.).
13. Golubev G.E. *Multilevel transport hubs*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981; 152. (rus.).
14. Yavein I.G. Station and square — the node of the unified transport system of the country. *Arhitektura SSSR*. 1961; 3. (rus.).
15. Vasiliev E.V., Shchetin N.N. *Architecture of railway stations*. Moscow, Construction Literature Publishing House, 1967; 276. (rus.).
16. Batyrev V.M. *Railway stations*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 214. (rus.).
17. Smirnov A., Zenkin M. The role of water transport in the formation of the brand of the coastal regions: The example of St. Petersburg. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019*. 2021; 399-408. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_34
18. Korolkova A.V. Formation of architectural and layout solutions of sea stations. *Science, education and experimental design : abstracts of reports of the International Scientific and Practical Conference*. 2017; 487-488. (rus.).
19. Korolkova A.V. *Architectural and planning organization of modern sea station complexes : dissertation ... candidate of architecture*. Moscow, 2019; 227. (rus.).
20. Pollock N. Yokohama port terminal. *Architectural record*. 2002; 11:142-149.
21. Martyshenko N.S. Vladivostok — a new center for the development of cruise tourism in Northeast Asia. *Bulletin of Modern Research*. 2018; 3.2(18):169-171. EDN XPHZVR. (rus.).
22. Jones W. *New Transport Architecture: Travel Hubs in the 21st Century*. London, Mitchell Beazley, 2006; 272.
23. Yashu F. Urban and traffic design of shanghai port international passenger transport center. *Architecture technology & design*. 2009; 5:74-81.
24. Pallis A.A., Rodrigue J.-P., Notteboom T.E. Cruises and cruise ports: Structures and strategies. *Research in Transportation Business & Management*. 2014; 13:1-5. DOI: 10.1016/j.rtbm.2014.12.002
25. Pallis A.A., Vaggelas G.K. Cruise shipping and green ports. *Green Ports*. 2019; 255-273. DOI: 10.1016/b978-0-12-814054-3.00013-x
26. Cheng Z., Gong L., Li C. *Design and Practice of Cruise Ports*. Singapore, Springer, 2020.

Received March 20, 2023.

Adopted in revised form on April 6, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

B I O N O T E S: **Alina Yu. Shleptsova** — master's student of the Department of Architecture, Engineering Academy; **Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN)**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; alina.shleptsova@yandex.ru;

Olga E. Dolinina — Candidate of Architecture, Senior Lecturer of the Department of Architecture, Engineering Academy; **Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN)**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; 3380838@gmail.com.

Contribution of the authors:

Alina Yu. Shleptsova — research concept, writing the source text, revision of the text, final conclusions.

Olga E. Dolinina — scientific guidance, development of methodology, revision of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.046:624.014

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.852-863

Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой

Виталий Валерьевич Надольский^{1,2}

¹ Брестский государственный технический университет (БрГТУ); г. Брест, Республика Беларусь;

² Белорусский национальный технический университет (БНТУ); г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Среди стальных конструкций можно выделить особый класс тонкостенных стальных элементов, для которых характерные формы отказа сопровождаются потерей местной устойчивости стенки с последующим развитием критической стадии работы отсека, так называемые балки с гибкой стенкой. Эффективность применения, в том числе с практической апробацией на опытных объектах, этих видов конструкций была подтверждена в 1970-е гг. Широкое распространение таких балок сдерживается недостаточной степенью проработанности расчетных зависимостей для проверки их несущей способности и эксплуатационной пригодности. Развитие аналитических и эмпирических расчетных зависимостей существенно осложнено из-за стадийного процесса деформирования и изменения схемы работы отсека. В связи с развитием более универсального подхода для определения несущей способности на основе численных моделей, в которых консерватизм результатов практически исключается, формат проверки безопасности элементов с выраженным нелинейным поведением становится критичным. Для проверки безопасности стропильных конструкций, как правило, используют метод предельных состояний в постановке метода коэффициентов надежности. Однако методы определения и калибровки значений коэффициентов надежности сформулированы и в наибольшей степени развиты для линейных расчетных зависимостей.

Материалы и методы. Представлены предложения по развитию метода коэффициентов надежности на основе аналитической зависимости с обоснованием необходимого квантиля для расчетного значения несущей способности на базе методов теории надежности первого порядка с последующей верификацией посредством симуляционных методов.

Результаты. Приведены вероятностные модели несущей способности балки с гибкой стенкой и обоснованы вероятностные модели базисных переменных. Представлена аналитическая зависимость для определения значений коэффициентов надежности с учетом изменчивости базисных переменных и погрешности моделирования. Получены значения коэффициентов надежности для вычисления расчетных значений несущей способности.

Выводы. Обоснована аналитическая зависимость для определения расчетных значений для регламентированного уровня надежности. Получены численные значения коэффициентов вариации несущей способности для балок с гибкой стенкой для разных видов отказа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод конечных элементов, коэффициент вариации, численная модель, расчетное значение, коэффициент надежности, безопасность, нелинейная модель, вероятностная модель

Благодарности. Автор выражает благодарность своим наставникам: профессорам Юрию Семеновичу Мартынову и Виктору Владимировичу Туру, а также анонимным рецензентам за конструктивные замечания и предложения.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Надольский В.В. Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 852–863. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.852-863

Автор, ответственный за переписку: Виталий Валерьевич Надольский, Nadolskiv@mail.by.

Reliability coefficients for nonlinear models of load-bearing capacity of beams with flexible web

Vitali V. Nadolski^{1,2}

¹ Brest State Technical University (BrSTU); Brest, Republic of Belarus;

² Belarusian National Technical University (BNTU); Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. A special class of thin-walled steel elements can be singled out, for which characteristic failure forms are accompanied by loss of local web stability with subsequent development of the post-critical stage, the so-called beams with flexible web. The effectiveness of application, including practical approbation at pilot sites, of such types of structures was confirmed as early as the 1970s. However, the widespread dissemination is constrained by the complexity and uncertainty of the calculated dependences. The development of analytical and empirical resistance models is considerably complicated because of the stage process of deformation and the change in the compartment operation scheme. Due to the development of a more universal approach for determining the bearing capacity based on numerical models, in which conservatism of the results is practically eliminated, the format of checking the safety of elements with pronounced nonlinear behavior becomes critical. To verify the safety of rafter structures, as a rule, the method of limit states in the formulation of the method of reliability factors is used. However, the methods for determining and calibrating reliability coefficient values are focused and most developed for linear models.

Materials and methods. The paper presents proposals on the development of the method of reliability factors on the basis of analytical dependence with justification of required quantile for calculated values of load-carrying capacity on the basis of first-order reliability theory methods with subsequent verification by means of simulation methods.

Results. The paper presents probabilistic models of the bearing capacity of a beam with a flexible web and substantiates probabilistic models of basic variables. The values of reliability factors for calculating the calculated values of bearing capacity have been obtained.

Conclusions. The analytical dependence for determining design values for the regulated level of reliability has been substantiated. Numerical values of coefficients of variation of bearing capacity for beams with flexible wall for different kinds of failure have been obtained.

KEYWORDS: finite element method, coefficient of variation, numerical model, design value, reliability coefficient, safety, nonlinear model, probabilistic model

Acknowledgements. The author would like to thank his mentors, Professors Yuri Semenovich Martynov and Viktor Vladimirovich Tur, as well as anonymous reviewers for their constructive feedbacks and suggestions.

FOR CITATION: Nadolski V.V. Reliability coefficients for nonlinear models of load-bearing capacity of beams with flexible web. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):852-863. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.852-863 (rus.).

Corresponding author: Vitali V. Nadolski, Nadolskivv@mail.by.

ВВЕДЕНИЕ

Среди стальных конструкций можно выделить особый класс тонкостенных стальных элементов, для которых характерные формы отказа сопровождаются потерей местной устойчивости стенки с последующим развитием закритической стадии работы отсека, так называемые балки с гибкой стенкой [1, 2]. Эффективность применения, в том числе с практической апробацией на опытных объектах, таких видов конструкций была подтверждена еще в 1970-е гг. [3–5]. Наибольшая эффективность их использования достигается для рамных, большепролетных и мостовых конструкций. Из-за стадийного процесса деформирования и изменения схемы работы отсека расчетные зависимости (формульные модели несущей способности) приобретают нелинейный вид [6–8], однако существующий формат проверки безопасности и значения коэффициентов надежности не учитывают эту особенность [9, 10]. При этом надежность обеспечена главным образом консерватизмом расчетных зависимостей [11, 12]. В связи с развитием более универсального подхода для определения несущей способности на основе численных моделей [13–25] (в которых консерватизм расчетных моделей несущей способности практически исключается) формат проверки безопасности становится критичным. В работе [26] показано, что использование стандартных значений коэффициентов надежности для «точных» моделей

несущей способности приводит к значительному снижению надежности.

Цель данного исследования направлена на разработку метода определения коэффициентов надежности для нелинейных моделей несущей способности стальных конструкций с учетом заданных значений индекса надежности. Представлены предложения по установлению коэффициентов надежности на основе аналитической зависимости с обоснованием необходимого квантиля для расчетного значения несущей способности на базе методов теории надежности первого порядка с последующей верификацией посредством симуляционных методов. В качестве объекта исследования приняты балки с гибкой стенкой, так как для этих элементов характерно нелинейное поведение. Предложенный метод определения коэффициентов надежности может быть адаптирован и для других видов конструкций, для которых наблюдается выраженный нелинейный характер работы, например для холодноформованных тонкостенных элементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Одним из первых этапов определения коэффициентов надежности является разработка (обоснование) вероятностной модели несущей способности [27–29]. Несущую способность тонкостенных элементов, в том числе балок с гибкой стенкой или холодноформованных элементов, можно установить

или с помощью формульных проверок, или с помощью численных моделей. Так как формульные¹ модели, учитывающие потерю местной устойчивости и последующее изменение схемы деформирования, представлены в неявном виде, то результаты анализа можно получить только для частных случаев, что затрудняет обобщение и разработку рекомендаций по назначению формата безопасности и значений коэффициентов надежности. Поэтому для разработки метода определения коэффициентов надежности выделены обобщенные модели несущей способности, учитывающие потерю местной устойчивости и закритическую стадию работы. Это позволит в простом виде учесть нелинейный характер взаимосвязи базисных переменных и соответственно установить результирующую изменчивость (неопределенность) несущей способности. Анализ моделей несущей способности [30, 31] показал, что обобщенно можно выделить несколько основных видов (форм) отказа, характерных для балок, в том числе с гибкой стенкой:

- вид отказа 1 — по прочности материала (достижение предельных напряжений). Характерен для стальных элементов с жесткими стенками. В этом случае на неопределенность несущей способности доминирующее влияние оказывают предел текучести f_{yw} и толщина стенки t_w :

$$r = f\{f_{yw} \cdot t_w\}, \quad (1)$$

где $r = f\{X_i\}$ — несущая способность как функция от переменной X_i ;

- вид отказа 2 — по прочности материала с учетом влияния полок балки. В этом случае на неопределенность несущей способности доминирующее влияние оказывают предел текучести f_{yw} и толщина стенки t_w , а сопутствующее — предел текучести f_{yf} и толщина полок t_f . Прирост несущей способности за счет поясов составляет порядка 20–30 % [30, 31], поэтому вклад поясов в общую изменчивость несущей способности уменьшается введением коэффициента k :

$$r = f\{f_{yw} \cdot t_w + k \cdot f_{yf} \cdot t_f^2\}; \quad (2)$$

- вид отказа 3 — вследствие потери устойчивости стенки с последующим развитием закритической стадии работы (изменение схемы) отсека, но без учета влияния поясов. В этом случае на неопределенность несущей способности доминирующее влияние оказывают толщина стенки в квадрате и предел текучести в степени 0,5:

$$r = f\{t_w^2 \cdot \sqrt{f_{yw}}\}; \quad (3)$$

- вид отказа 4 — вследствие потери устойчивости стенки с последующим развитием закрити-

ческой стадии работы (изменение схемы) отсека с учетом дополнительной несущей способности, обеспечиваемой поясами балки:

$$r = f\{\sqrt{f_{yw}} \cdot t_w^2 + k \cdot f_{yf} \cdot t_f^2\}; \quad (4)$$

- вид отказа 5 — вследствие упругой потери устойчивости стенки для очень гибких стенок и слабых поясов. Данный случай не представляет большого практического интереса в строительстве из-за редкости распространения таких решений и значительного консерватизма рассматриваемого критерия отказа. Однако анализ интересен для понимания всей области возможных конструктивных решений и может быть полезен для отдельных расчетных ситуаций, например при временной надвижке мостов на опоры, когда возникают большие сдвигающие и локальные усилия, а гибкость стенки определялась из работы балки на изгиб в стадии эксплуатации. В этом случае несущая способность определяется исходя из критических напряжений потери устойчивости, а на неопределенность доминирующее влияние оказывают толщина стенки в кубе и модуль упругости стали:

$$r = f\{E \cdot t_w^3\}; \quad (5)$$

- вид отказа 6 — сопровождающийся потерей устойчивости стенки балки и образованием механизма, при котором полка балки работает как элемент на упругом основании. Характерный вид отказа для локальной нагрузки, при котором происходит увеличение ширины передачи (распределения) нагрузки s_s . В этом случае модель несущей способности можно представить в следующем виде:

$$r = f\{f_{yw} \cdot t_w \cdot (s_s + k \cdot t_f)\}. \quad (6)$$

Виды отказа 2 и 4 являются наиболее характерными для балок с гибкими стенками и преобразуются в 1 и 3 при значениях коэффициента k , равных 0. В исследовании выполнено их разделение для более наглядного представления влияния полок на изменчивость (неопределенность) несущей способности.

На следующем этапе возникает вопрос — как определить нормативное (характеристическое) и расчетное значения несущей способности для таких видов зависимостей. Для несущей способности или для базисных переменных, входящих в модель несущей способности, например для предела текучести, нормативное значение принимается как 5 % квантиль² распределения. Нормативное значение несущей способности можно определять следующими методами:

² Общепринят 5%-ный квантиль, например, согласно ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» или СН 2.01.01–2019 «Основы проектирования строительных конструкций». Однако строгих математических обоснований этого выбора нет.

¹ Например, для балок с гибкими (неустойчивыми) стенками, согласно СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции».

- на основании *испытаний*, при этом применяют некоторые предположения о результирующем законе распределения несущей способности, а статистические характеристики (среднее и коэффициент вариации) оценивают на основании экспериментальных данных;

- на основании *аналитических решений*, например, как для произведения или суммы нескольких случайных величин. Этот метод является наиболее распространенным и классическим для установления нормативного значения несущей способности для стальных конструкций, при этом вносятся некоторые предположения о результирующем законе распределения несущей способности, а статистические характеристики несущей способности оценивают исходя из статистических характеристик базисных переменных и аналитических предпосылок;

- на основании *симуляционных методов* (сгенерированной выборки). Для оценки несущей способности на основе симуляционных методов необходимо сгенерировать выборку значений базисных переменных с последующим вычислением значений несущей способности. Далее на основании выборки значений несущей способности можно оценить нормативное значение как квантиль распределения;

- с использованием *нормативных значений базисных переменных*, входящих в модель несущей способности. При этом следует понимать и учитывать, что результирующее значение несущей способности (в особенности при нелинейных функциях несущей способности и нескольких базисных переменных) не будет равно «истинному» нормативному значению, что требует пренебрежения этим фактом (в случае малой ошибки) или введения дополнительного коэффициента надежности. Однако данный метод наиболее простой и во многих случаях отмеченное несоответствие не приводит к существенным ошибкам, поэтому этот метод нашел распространение в установившейся практике нормирования и проектирования;

- для численных моделей несущей способности можно выделить еще один метод определения нормативного значения — на основании *проверки соответствия формульным моделям несущей способности*, закрепленным в нормативных документах. В этом методе для верификации (калибровки) численной модели используется модель несущей способности из нормативного документа. Параметры численной модели, например тип конечного элемента, размер сетки, кривая деформирования материала, несовершенства, остаточные напряжения и т.д., должны быть выбраны таким образом, чтобы численная модель обеспечивала значение несущей способности, наиболее близкое к значению, вычисленному согласно нормативному документу. Однако для этого метода следует учитывать, что нормативное значение несущей способности, ука-

занное в нормативных документах, определяется также с учетом других критериев (аспектов, факторов), помимо максимального значения несущей способности, например с учетом ограничения развития пластических деформаций [32, 33]. Необходимо, чтобы аналогичные критерии учитывались при определении несущей способности на основе численных моделей.

Расчетное значение наиболее точно можно установить на основании калибровки с использованием вероятностных методов для целевого индекса надежности с учетом изменчивости базисных переменных моделей эффектов воздействий и моделей несущей способности³ [34, 35]. Однако «следует отметить, что вероятностное моделирование хотя и позволяет напрямую получить расчетное значение сопротивления, но является трудоемкой процедурой, требующей не только существенных затрат времени, но и соответствующей подготовки специалистов» [36]. Приблизительно расчетное значение можно оценить всеми теми же методами, как и нормативное значение, если знать необходимый квантиль для расчетного значения. Требуемый квантиль расчетного значения можно установить с помощью методов теории надежности первого порядка исходя из коэффициента чувствительности и целевого значения индекса надежности [37, 38]. Значение коэффициента чувствительности принято на основании работы [34] равным 0,6 (необходимо указать, что это значение справедливо только для стальных конструкций). Целевое значение индекса надежности принято равным 3,0 [35, 39]. Тогда требуемый квантиль расчетного значения p_d равен 3,5 %, что соответствует $\alpha_R \cdot \beta = 0,6 \cdot 3,0$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Чтобы определить расчетные значения несущей способности, необходимо знать вероятностные модели базисных переменных, таких как предел текучести и геометрические характеристики сечения. Общие подходы к вероятностному моделированию несущей способности стального элемента представлены в труде [34]. Для вероятностного описания предела текучести принят логнормальный закон распределения с коэффициентом вариации $V_{fy} = 7\%$ [34]. Для вероятностного описания модуля упругости стали коэффициент вариации принят 3% [35]. Необходимо внести дополнительные уточнения, касающиеся статистических характеристик для толщины стального проката, для рассматриваемых численных моделей. С целью вероятностных расчетов геометрические характеристики принимают, как правило, детерминированными. Для модели несущей способности, учитывающей потерю местной устойчивости части сечения, учт

³ JCSSL Probabilistic Model Code // Joint Committee of Structural Safety. 2001.

изменчивости толщины стенки и толщины полок является обязательным. Для ширины проката, т.е. для высоты стенки и ширины полок, изменчивостью можно пренебречь для большинства практических размеров профилей.

Анализ статистических характеристик отклонений геометрических размеров проката выполнен на основании регламентированных предельно допустимых значений отклонений геометрических размеров стальных конструкций, представленных в стандартах СТБ EN 1090-2⁴, СТБ EN 10051⁵, ГОСТ 19903⁶. Так как в нормативных документах не указано, с какой обеспеченностью назначены предельные отклонения, то принято допущение, что отклонения подчиняются нормальному закону распределения, а установленные нормами допуски являются теми границами, при которых предельно допустимые отклонения будут совпадать соответственно с 95%- и 5%-ными квантилями распределения. Нормативный документ СТБ EN 10051 устанавливает симметричные предельные отклонения для разных классов изготовления, для анализа принят класс изготовления «В», в соответствии с которым поставляется наибольшее количество проката для стальных конструкций. Результаты анализа сведены в табл. 1.

Нормативный документ ГОСТ 19903 устанавливает несимметричные предельные отклонения для двух классов изготовления, при этом отрица-

Табл. 1. Допуски на толщину проката согласно СТБ EN 10051

Table 1. Tolerances of thickness according to STB EN 10051

Номинальная толщина, мм Nominal thickness, mm	Допуск Δ , мм Tolerance Δ , mm	μ_x/X_{nom}	V , %
(6–8]	$\pm 0,36$	1,0	3,1
(8–10]	$\pm 0,39$	1,0	2,6
(10–12,5]	$\pm 0,43$	1,0	2,3
(12,5–15]	$\pm 0,46$	1,0	2,0
(15–25]	$\pm 0,52$	1,0	1,6

Примечание: μ_x/X_{nom} — отношение среднего значения к номинальному; V — коэффициент вариации.

Note: μ_x/X_{nom} — the ratio of the mean value to the nominal value; V — coefficient of variation.

⁴ СТБ EN 1090-2–2013. Возведение стальных и алюминиевых конструкций. Часть 2. Технические требования к стальным конструкциям. М. : Госстандарт, 2014. 193 с.

⁵ СТБ EN 10051–2009. Листы, полосы и ленты, полученные непрерывной горячей прокаткой из нелегированных и легированных сталей. Допуски размеров и формы. М. : Госстандарт, 2010. 36 с.

⁶ ГОСТ 19903–2015. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент : введ. 01.09.2016.

тельный допуск больше, что приводит к среднему значению меньше единицы. В целом не очень понятно, по какой причине в нормативном документе заложен такой допустимый отрицательный допуск по толщине. Понятно желание производителей выпускать прокат с минусовым допуском — это позволяет им экономить, однако данная ситуация приводит к чувствительному снижению несущей способности тонкостенных элементов. Для анализа принят класс изготовления «В» (обычной точности), в соответствии с которым поставляется наибольшее количество проката для стальных конструкций. Допуски на отклонения отличаются для листового или рулонного проката. Результаты анализа представлены в табл. 2, 3.

Табл. 2. Допуски на толщину рулонного проката согласно ГОСТ 19903

Table 2. Tolerances of thickness of rolled steel according to GOST 19903

Номинальная толщина, мм Nominal thickness, mm	Допуск Δ , мм Tolerance Δ , mm	μ_x/X_{nom}	V , %
(5,5–7,5]	$-0,60...+0,25$	0,97	4,1
(7,5–10,0]	$-0,80...+0,30$	0,97	3,9
(10,0–12,7]	$-0,80...+0,30$	0,98	3,0
(12,7–15,0]	$-0,80...+0,35$	0,98	2,6
(15,0–25,0]	$-0,90...+0,35$	0,99	1,9

Табл. 3. Допуски на толщину листового проката согласно ГОСТ 19903

Table 3. Tolerances of thickness of sheet steel according to GOST 19903

Номинальная толщина, мм Nominal thickness, mm	Допуск Δ , мм Tolerance Δ , mm	μ_x/X_{nom}	V , %
(12,7–25,0]	$-0,80...+0,20$	0,98	1,6
(25–30]	$-0,90...+0,20$	0,99	1,2
(30–34]	$-1,00...+0,30$	0,99	1,2
(34–40]	$-1,10...+0,40$	0,99	1,2
(40–50]	$-1,20...+0,50$	0,99	1,2

На основании выполненного анализа для стенки приняты среднее значение и коэффициент вариации, равные 0,97 и 4 %, для полок 0,98 и 2 % соответственно. Для сравнения в базовом документе по вероятностным моделям для геометрических характеристик рекомендуется применять $\mu_x/X_{nom} = 1,0$; $V = 2\%$.

В табл. 4 представлены статистические параметры базисных переменных, входящие в модели несущей способности, и зависимости для нормативного значения базисных переменных.

Табл. 4. Вероятностные модели базисных переменных для модели несущей способности

Table 4. Probabilistic models of basic variables for the load-bearing capacity model

Базисные переменные Basic variables	$X_{i,nom}$	$\mu_{X,i}$	$V_{X,i}$	$X_{i,k}$
Предел текучести Yield strength	$f_{y,nom} = f_{y,k}$	$\mu_{fy} = 1,12 f_{y,k}$	$V_{fy} = 7 \%$	$f_{y,k} = \mu_{fy} \exp(-1,645 V_{fy}) = 0,89 \mu_{fy}$
Толщина стенки Web thickness	$t_{w,nom} = 1,03 \mu_{tw}$	$\mu_{tw} = 0,97 t_{w,nom}$	$V_{tw} = 4 \%$	$t_{w,k} = \mu_{tw} (1 - 1,645 V_{tw}) = 0,93 \mu_{tw}$
Толщина полки Flange thickness	$t_{f,nom} = 1,02 \mu_{tf}$	$\mu_{tf} = 0,98 t_{f,nom}$	$V_{tf} = 2 \%$	$t_{f,k} = \mu_{tf} (1 - 1,645 V_{tf}) = 0,97 \mu_{tf}$
Модуль упругости Modulus of elasticity	$E_{nom} = \mu_E$	$\mu_E = E_{nom}$	$V_E = 3 \%$	$E_k = \mu_E (1 - 1,645 V_E) = 0,95 \mu_E$

Примечание: $X_{i,nom}$ — номинальное значение; $\mu_{X,i}$ — среднее значение; $V_{X,i}$ — коэффициент вариации; $X_{i,k}$ — нормативное значение.

Note: $X_{i,nom}$ — nominal value; $\mu_{X,i}$ — average value; $V_{X,i}$ — coefficient of variation; $X_{i,k}$ — normative value.

Основываясь на разработанных вероятностных моделях базисных переменных (см. табл. 4), далее определены нормативные и расчетные значения несущей способности, вычисленные для нелинейных моделей согласно следующим методам:

- на основании симуляционного метода (сгенерированной выборки). Данный метод принят как «условно» точный и все остальные способы определения расчетных значений сравниваются с ним. На основании представленных вероятностных моделей предела текучести и геометрических характеристик выполнены генерации значений несущей способности для каждой из обобщенных зависимостей, представленных выражениями (1)–(6). Для генерирования выборки в исследовании применен прямой метод Монте-Карло. Количество симуляций для каждой базисной переменной и, соответственно, для выборки значений несущей способности составило 10^6 . По сгенерированным выборкам значений несущей способности вычислены среднее значение $\mu_{r,sim}$, коэффициент вариации $V_{r,sim}$, нормативное $r_{k,sim5\%}$ и расчетное $r_{d,sim}$ значения;

- на основании аналитического решения в предположении нормального и логнормального закона распределения несущей способности (тем самым выполнен анализ более подходящего закона распределения), статистические характеристики несущей способности (среднее значение $\mu_{r,sim}$ и коэффициент вариации $V_{r,sim}$) приняты на основании симуляционного метода:

$$r_{k,LN5\%} \approx \mu_{r,sim} \cdot \exp(-1,645 V_{r,sim}); \quad (7)$$

$$r_{k,N5\%} \approx \mu_{r,sim} (1 - 1,645 V_{r,sim}); \quad (8)$$

$$r_{d,LN} \approx \mu_{r,sim} \cdot \exp(-\alpha_R \cdot \beta V_{r,sim}); \quad (9)$$

$$r_{d,N} \approx \mu_{r,sim} (1 - \alpha_R \cdot \beta V_{r,sim}), \quad (10)$$

где $r_{k,LN5\%}$ — значение несущей способности, вычисленное на основании предположения о логнормальном распределении; $r_{k,N5\%}$ — значение несущей

способности, вычисленное на основании предположения о нормальном распределении; $r_{d,LN}$ — расчетное значение несущей способности, вычисленное на основании предположения о логнормальном распределении; $r_{d,N}$ — расчетное значение несущей способности, вычисленное на основании предположения о нормальном распределении.

Для того чтобы сравнить результаты расчетов по разным методам вычислены коэффициенты надежности:

- первый коэффициент надежности для перехода от среднего значения $\mu_{r,Xm}$ несущей способности к нормативному r_k :

$$\gamma_{r,\mu \rightarrow k(sim)} = \frac{\mu_{r,Xm}}{r_{k,sim5\%}}; \quad (11)$$

$$\gamma_{r,\mu \rightarrow k(LN)} = \frac{\mu_{r,Xm}}{r_{k,LN5\%}}; \quad (12)$$

$$\gamma_{r,\mu \rightarrow k(N)} = \frac{\mu_{r,Xm}}{r_{k,N5\%}}, \quad (13)$$

где $\mu_{r,Xm}$ — значение несущей способности, вычисленное при средних значениях базисных переменных, совпадает (приблизительно совпадает) с $\mu_{r,sim}$;

- второй коэффициент надежности для перехода от «условно» нормативного значения $r_{k,Xk5\%}$ несущей способности к нормативному r_k :

$$\gamma_{r,Xk \rightarrow k(sim)} = \frac{r_{k,Xk5\%}}{r_{k,sim5\%}}; \quad (14)$$

$$\gamma_{r,Xk \rightarrow k(LN)} = \frac{r_{k,Xk5\%}}{r_{k,LN5\%}}; \quad (15)$$

$$\gamma_{r,Xk \rightarrow k(N)} = \frac{r_{k,Xk5\%}}{r_{k,N5\%}}, \quad (16)$$

где $r_{k,Xk5\%} = f\{X_{i,k5\%}\}$ — «условно» нормативное значение несущей способности, т.е. значение несущей способности, вычисленное при нормативных значениях базисных переменных;

Табл. 5. Коэффициенты надежности

Table 5. Reliability factors

Коэффициенты Coefficients	Номер вида отказа / The type of failure					
	1	2	3	4	5	6
$\mu_{r, sim} / r_{k, sim 5\%}$	1,146	1,103	1,161	1,126	1,241	1,149
$V_{r, sim} \%$	8,1	5,9	8,7	7,0	12,4	8,2
$\gamma_{r, \mu \rightarrow k(sim)}$	1,147	1,103	1,163	1,126	1,240	1,149
$\gamma_{r, \mu \rightarrow k(LN)}$	1,145	1,103	1,159	1,124	1,234	1,149
$\gamma_{r, \mu \rightarrow k(N)}$	1,153	1,107	1,168	1,130	1,255	1,157
$\gamma_{r, Xk \rightarrow k(sim)}$	0,955	0,919	0,957	0,929	0,957	0,930
$\gamma_{r, Xk \rightarrow k(LN)}$	0,954	0,919	0,954	0,928	0,952	0,930
$\gamma_{r, Xk \rightarrow k(N)}$	0,960	0,922	0,961	0,933	0,968	0,937
$\gamma_{R, \mu \rightarrow d(sim)}$	1,161	1,114	1,180	1,138	1,269	1,165
$\gamma_{R, \mu \rightarrow d(LN)}$	1,161	1,113	1,175	1,137	1,258	1,164
$\gamma_{R, \mu \rightarrow d(N)}$	1,170	1,117	1,187	1,144	1,285	1,175
$\gamma_{R, Xk \rightarrow d(sim)}$	0,967	0,928	0,971	0,940	0,979	0,941
$\gamma_{R, Xk \rightarrow d(LN)}$	0,966	0,927	0,966	0,938	0,970	0,940
$\gamma_{R, Xk \rightarrow d(N)}$	0,974	0,931	0,977	0,944	0,991	0,949

• третий коэффициент надежности для перехода от среднего значения $\mu_{r, Xm}$ несущей способности к расчетному значению r_d :

$$\gamma_{r, \mu \rightarrow d(sim)} = \frac{\mu_{r, Xm}}{r_{d, sim}}; \quad (17)$$

$$\gamma_{r, \mu \rightarrow d(LN)} = \frac{\mu_{r, Xm}}{r_{d, LN}}; \quad (18)$$

$$\gamma_{r, \mu \rightarrow d(N)} = \frac{\mu_{r, Xm}}{r_{d, N}}; \quad (19)$$

• четвертый коэффициент надежности для перехода от «условно» нормативного значения несущей способности $r_{k, Xk 5\%}$, вычисленного при нормативных значениях базисных переменных, к расчетному значению r_d :

$$\gamma_{R, Xk \rightarrow d(sim)} = \frac{r_{k, Xk 5\%}}{r_{d, sim}}; \quad (20)$$

$$\gamma_{R, Xk \rightarrow d(LN)} = \frac{r_{k, Xk 5\%}}{r_{d, LN}}; \quad (21)$$

$$\gamma_{R, Xk \rightarrow d(N)} = \frac{r_{k, Xk 5\%}}{r_{d, N}}. \quad (22)$$

Результаты расчетов сведены в табл. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании предложен метод определения коэффициентов надежности и расчетных значений несущей способности для нелинейных моделей. Практическая реализация предложенного метода

продемонстрирована для балок с гибкими стенками. По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- в качестве инженерного способа определения расчетного значения несущей способности R_d можно рекомендовать метод, основанный на логарифмически нормальном распределении с установлением квантиля на базе метода теории надежности первого порядка. Схематично метод представлен на рисунке. Коэффициент вариации несущей способности V_r , среднее значение μ_r и коэффициент вариации V_θ погрешности модели несущей способности зависят от рассматриваемой проблемы, далее по тексту представлены значения для балок с гибкой стенкой;

- для закона распределения значений несущей способности балок с гибкой стенкой более подходящим является использование логнормального закона. Применение нормального закона приводит к более консервативным результатам, нормативное значение занижается на 1–2 %. Однако, учитывая условность назначения закона распределения базисных переменных, применение нормального закона распределения не является критичным;

- среднее значение несущей способности μ_r может быть вычислено при средних значениях базисных переменных μ_{X_i} . Выполненное исследование показало, что при фактических значениях коэффициентов вариации базисных переменных и для рассмотренных моделей несущей способности данное приближение приводит к отклонению в среднем значении не более 0,3 %;

- коэффициент вариации несущей способности V_r балок с гибкой стенкой, создаваемый измен-

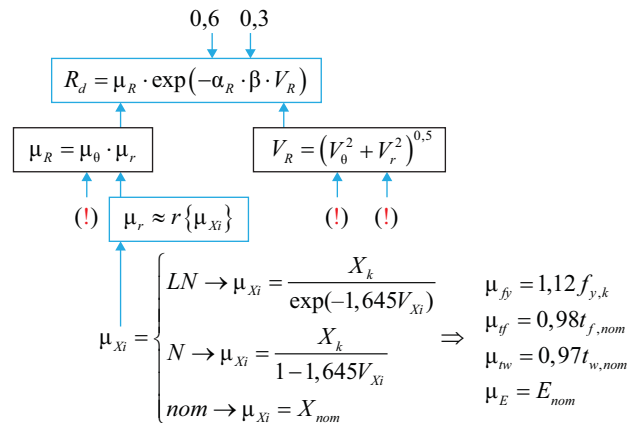


Схема реализации метода определения расчетного значения несущей способности

Scheme of implementation of the method for determining the design value of the load-bearing capacity

чивостью прочностных характеристик стали и геометрических размеров проката, составляет порядка 5,9–8,7 % в зависимости от рассматриваемого вида отказа. Для наиболее характерного вида отказа балок с гибкой стенкой, которым является потеря устойчивости стенки с последующей закритической стадией работы отсека, коэффициент вариации V_r составляет 7,0–8,5 % в зависимости от доли влияния поясов на несущую способность;

- значение несущей способности, определенное при нормативных значениях базисных переменных $r\{X_{ki}\}$, в общем случае не может считаться «истинным» нормативным (5%-ным квантилем) значением r_k . В большинстве случаев это значение занижено. Данный факт возникает в результате нелинейной зависимости несущей способности от нескольких переменных (предела текучести, модуля упругости стали и геометрических размеров сечения);

- значение несущей способности, вычисленное при нормативном значении только предела текучести и номинальных значениях толщины проката, т.е. $r_{k,fyk} = r\{f_{yk}, t_{nom}, E_{nom}\}$, не учитывает изменчивости толщины стенки и полки. При малых значениях условной гибкости эта погрешность не существенна, порядка 1–3 % (основное влияние оказывает предел текучести, а его нормативное значение напрямую входит в модель несущей способности), однако при больших значениях гибкости погрешность составляет 7–12 % в небезопасную сторону, т.е. значение несущей способности переоценивается (преимущественно не учитывается изменчивость толщины стенки, так как в модель несущей способности входит номинальное значение толщины). В качестве дополнительного решения можно ввести понижа-

ющий коэффициент, который позволяет консервативно оценить значение несущей способности, т.е. $r\{X_{ki}\} = r_{k,fyk}/1,1$;

- для перехода от среднего значения несущей способности μ_r к расчетному r_d рекомендуется использовать коэффициент надежности $\gamma_{r,\mu \rightarrow d}$, равный 1,18 (среднее значение несущей способности следует делить на коэффициент надежности). Данное значение справедливо для наиболее характерной формы отказа балок с гибкой стенкой — вследствие потери устойчивости стенки с последующим развитием закритической стадии работы (изменение схемы) отсека с учетом дополнительной несущей способности, обеспечиваемой поясами балки. Результаты исследования показывают, что значение коэффициента надежности может быть снижено до 1,10 при значительной закритической стадии (снижение значения коэффициента надежности достигается за счет снижения коэффициента вариации в результате влияния нескольких независимых случайных величин);

- среднее значение μ_0 и коэффициент вариации V_0 неопределенности (погрешности) моделей несущей способности, регламентированных в нормативных документах, представлены в работе [12].

Для развития предложенного метода и возможности применения его к конечно-элементным моделям несущей способности необходимо решить следующие важные задачи. Первая задача — это анализ и учет неопределенности (погрешности) конечно-элементной модели несущей способности. Вторая — разработка методов определения коэффициента вариации для нелинейных моделей несущей способности для ограниченного числа нелинейных анализов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Броуде Б.М. О закритическом поведении гибких стенок стальных стержней // Строительная механика и расчет сооружений. 1976. № 1. С. 7–12.

2. Трофимов В.И., Каминский А.М. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений. М.: Наука, 1997. 591 с.

3. Ведяков И.И., Суслов Л.С. Основы совершенствования российской нормативной базы по проектированию рамных конструкций // Вестник НИЦ «Строительство». 2014. № 11. С. 5–19.

4. Полторацнев А.С. Эффективность балок с гибкой стенкой // Соискатель — приложение к журналу «Мир транспорта». 2010. Т. 07. № 1. С. 46–48.

5. Прозорова А.С., Леонова А.Н. Преимущества и недостатки применения облегченных металлических конструкций в строительстве // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2021. № 3. С. 71–76.

6. Притыкин А.И. Местная устойчивость балок с гибкой стенкой и способы ее повышения // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 4 (243). С. 25–31.

7. Притыкин А.И. К вопросу проектирования балок с гибкой стенкой // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 3 (248). С. 21–26.

8. Симаков Ю.Н. К оценке несущей способности балок с гибкими неподкрепленными стенками // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 1. С. 25–28.

9. Уткин В.С., Галаева Н.Л. Расчет надежности балки с гибкой стенкой по критерию прочности пояса при ограниченной информации на стадии эксплуатации // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 5 (226). С. 48–52.

10. Уткин В.С., Редькин А.Н. Расчет надежности стальной балки с гибкой стенкой по критерию прочности стенки при ограниченной статистической информации с использованием распределений, полученных на основе неравенства Чебышева // Строительство и реконструкция. 2011. № 5 (37). С. 56–62.

11. Nadolski V., Sykora M. Uncertainty in resistance models for steel members // Transactions of the VŠB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series. 2014. Vol. 14. Issue 2. Pp. 26–37. DOI: 10.2478/tvsb-2014-0028

12. Надольский В.В. Надежность стального элемента при потере местной устойчивости стенки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 5. С. 569–579. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.569-579

13. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 80. Pp. 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018

14. Kövesdi B., Alcaïne J., Dunai L., Braun B., Kuhlmann U. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders // Journal of Constructional Steel Research. 2014. Vol. 103. Pp. 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018

15. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research // Journal of Construc-

tional Steel Research. 2019. Vol. 158. Pp. 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025

16. Rogač M., Aleksić S., Lučić D. Influence of patch load length on resistance of I-girders. Part-II: Numerical research // Journal of Constructional Steel Research. 2020. Vol. 175. P. 106369. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106369

17. Riahi F., Behravesheh A., Fard M.Y., Armaghani A. Shear buckling analysis of steel flat and corrugated web I-girders // KSCE Journal of Civil Engineering. 2018. Vol. 22. Issue 12. Pp. 5058–5073. DOI: 10.1007/s12205-017-1530-9

18. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders — Tests and numerical model verification // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 85. Pp. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007

19. Афенченко Д.С., Петрова Ю.Н., Устинова М.Э., Олейникова Р.Е. Верификация аналитического расчета несущей способности перфорированного стержня средствами конечно-элементного комплекса // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2019. № 4. С. 118–129.

20. Волкова В.Е., Макарова А.А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния балки с гибкой стенкой // Металлические конструкции. 2011. Т. 17. № 4. С. 261–269.

21. Надольский В.В., Вихляев А.И. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 6. С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706

22. Надольский В.В., Подымако В.И. Оценка несущей способности стальной балки методом конечных элементов при совместном действии локальных и сдвиговых усилий // Строительство и реконструкция. 2022. № 2. С. 26–43. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-26-43

23. Емельянов К.А., Притыкин А.И. Конечно-элементный анализ напряженного состояния и устойчивости балок с ромбовидной перфорацией // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2018. Т. 4. № 3. С. 81–88.

24. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 6. С. 676–687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687

25. Тур В.В., Надольский В.В. Концепция проектирования строительных конструкций на основе численных моделей сопротивления // Строительство и реконструкция. 2022. № 6. С. 78–90. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90

26. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Hidden safety in structural design codes // Engineering Struc-

tures. 2022. Vol. 257. P. 114017. DOI: 10.1016/j.eng-struct.2022.114017

27. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1982. 351 с.

28. Райзер В.Д. Развитие теории надежности и совершенствование норм проектирования // Строительная механика и расчет сооружений. 1983. № 5. С. 1–4.

29. Reda M., Sharaf T., ElSabbagh A., ElGhandour M. Behavior and design for component and system of cold-formed steel roof trusses // Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 135. Pp. 21–32. DOI: 10.1016/j.tws.2018.10.038

30. Мартынов Ю.С., Лагун Ю.И. Модели сопротивления сдвигу стальных элементов, учитывающие потерю местной устойчивости стенки // Металлические конструкции. 2012. Т. 18. № 2. С. 111–122.

31. Надольский В.В. Анализ расчетных моделей сопротивления локальной нагрузке стальных элементов // Вестник Брестского государственного технического университета. 2016. № 1 (97). С. 167–171.

32. Ведяков И.И., Конин Д.В., Олуромби А.Р., Нахвальнов П.В. Учет пластических деформаций при расчете фланцевых соединений // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 10. С. 9–16. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.09-16

33. Петров А.В. Деформационные критерии предельных состояний примкнутых к скальной породе железобетонных обделок подземных сооружений для оценок ими вызванной потери работоспособности оборудования технических систем, размещенного в их внутренних объемах // Актуаль-

ные проблемы военно-научных исследований. 2020. № S8 (9). С. 63–71.

34. Тур В.В., Надольский В.В. Калибровка значений частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций для условий Республики Беларусь. Часть 2 // Строительство и реконструкция. 2016. № 5 (67). С. 69–75.

35. Nadolski V., Rozsas A., Sykora M. Calibrating Partial Factors — Methodology, Input Data and Case Study of Steel Structures // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2019. DOI: 10.3311/PPci.12822

36. Перельмутер А.В., Тур В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Т. 13. № 3. С. 86–102.

37. Tur V., Martynov Yu., Nadolski V., Veryovka F. Problems in providing equal reliability of reinforced concrete and steel constructions within the existing reliability concept according to EN 1990 // Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete. 2018. Vol. 10. Pp. 103–120. DOI: 10.23746/2018-10-07

38. Keshtegar B., Meng Z. A hybrid relaxed first-order reliability method for efficient structural reliability analysis // Structural Safety. 2017. Vol. 66. Pp. 84–93. DOI: 10.1016/j.strusafe.2017.02.005

39. Надольский В.В., Мартынов Ю.С. Оценка требуемого (целевого) уровня надежности на основании предыдущего опыта нормирования // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2014. № 8. С. 27–34.

Поступила в редакцию 28 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Виталий Валерьевич Надольский** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии строительного производства; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; доцент кафедры строительных конструкций; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65; РИНЦ ID: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskiv@mail.by.

REFERENCES

1. Broude B.M. On supercritical behavior of flexible walls of steel rods. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 1976; 1:7-12. (rus.).

2. Trofimov V.I., Kaminskiy A.M. *Light metal structures of buildings and structures*. Moscow, Nauka Publ., 1997; 591. (rus.).

3. Vedyakov I.I., Suslov L.S. Basis for improvement of Russian building codes regulating frame design. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2014; 11:5-19. (rus.).

4. Poltoradnev A.S. Performance of beams with flexible walls. *Competitor — Supplement to the magazine "World of Transport"*. 2010; 07(1):46-48. (rus.).

5. Prozorova A.S., Leonova A.N. Advantages and disadvantages of using lightweight metal structures in construction. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*. 2021; 3:71-76. (rus.).

6. Pritykin A.I. Local stability of beams with a flexible wall and ways to improve it. *Structural*

Mechanics and Analysis of Constructions. 2012; 4(243):25-31. (rus.).

7. Pritykin A.I. On the issue of designing beams with a flexible wall. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2013; 3(248):21-26. (rus.).

8. Simakov Y.N. To the evaluation of bearing capacity of beams with flexible un-stiffened walls. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 1:25-28. (rus.).

9. Utkin V.S., Galaeva N.L. Calculation of a beam reliability with a flexible wall using strength condition of a chord at the limited information at the operation stage. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2009; 5(226):48-52. (rus.).

10. Utkin V.S., Redkin A.N. Calculation of the reliability of a steel beam with a flexible wall according to the wall strength criterion with limited statistical information using distributions obtained on the basis of the Chebyshev inequality. *Building and Reconstruction*. 2011; 5(37):56-62. (rus.).

11. Nadolski V., Sykora M. Uncertainty in resistance models for steel members. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2014; 14(2):26-37. DOI: 10.2478/tvsb-2014-0028

12. Nadolski V.V. Reliability of a steel member in case of loss of local stability of a web. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(5):569-579. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.569-579 (rus.).

13. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013; 80:202-212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018

14. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B., Kuhlmann U. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 103:327-343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018

15. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 158:213-229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025

16. Rogač M., Aleksić S., Lučić D. Influence of patch load length on resistance of I-girders. Part-II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020; 175:106369. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106369

17. Riahi F., Behraves A., Fard M.Y., Armaghani A. Shear buckling analysis of steel flat and corrugated web I-girders. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018; 22(12):5058-5073. DOI: 10.1007/s12205-017-1530-9

18. Sinur F., Beg D. Moment-shear interaction of stiffened plate girders — Tests and numerical model verification. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013; 85:116-129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007

19. Afenchenko D.S., Petrova Y.N., Ustinova M.E., Olejnikova R.E. Verification of analytical calculation of perforated rod bearing capacity by means of ansys finite element complex. *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University*. 2019; 4:118-129. (rus.).

20. Volkova V., Makarova G. The numerical simulation of thin-walled girder deflected mode. *Metal Constructions*. 2011; 17(4):261-269. (rus.).

21. Nadolski V.V., Vikhlyayev A.I. Using the finite element method to evaluate the load-bearing capacity of beams with a corrugated web subjected to local loading. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(6):693-706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706 (rus.).

22. Nadolski V.V., Podymako V.I. The evaluation of ultimate resistance of steel beams to combined shear and patch loading by finite element method. *Building and Reconstruction*. 2022; (2):26-43. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-26-43 (rus.).

23. Emelianov K.A., Pritykin A.I. Finite-element analysis of stress state and stability of beams with rhombic perforation. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2018; 4(3):81-88. (rus.).

24. Saiyan S.G., Paushkin A.G. The numerical parametric study of the stress-strain state of I-beams having versatile corrugated webs. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(6):676-687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687 (rus.).

25. Tur V.V., Nadolski V.V. The concept of design of building structures based on numerical resistance models. *Building and Reconstruction*. 2022; (6):78-90. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90 (rus.).

26. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Hidden safety in structural design codes. *Engineering Structures*. 2022; 257:114017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114017

27. Bolotin V.V. *Methods of the theory of probability and theory of reliability in the calculations of structures*. Moscow, Stroyizdat, 1982; 351. (rus.).

28. Rayzer V.D. Development of the theory of reliability and improvement of design standards. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 1983; 5:1-4. (rus.).

29. Reda M., Sharaf T., ElSabbagh A., ElGhandour M. Behavior and design for component and system of cold-formed steel roof trusses. *Thin-Walled Structures*. 2019; 135:21-32. DOI: 10.1016/j.tws.2018.10.038

30. Martynov Yu.S., Lagun Yu.I. Models of resistance to shear of steel elements, taking into account the loss of local stability of the wall. *Metal Structures*. 2012; 18(2):111-122. (rus.).

31. Nadolski V.V. Analysis of settlement models of resistance to local loading of steel elements. *Bulletin of Brest State Technical University*. 2016; 1(97): 167-171. (rus.).

32. Vedyakov I.I., Konin D.V., Olurombi A.R., Nahvalnov P.V. Consideration of plastic deformations in calculations of flange connections. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 10:9-16. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.09-16 (rus.).
33. Petrov A.V. Deformation criteria for the limit states of reinforced concrete linings of underground structures adjacent to rock for assessing the loss of efficiency caused by them in the equipment of technical systems located in their internal volumes. *Actual problems of military scientific research*. 2020; S8(9):63-71. (rus.).
34. Tur V.V., Nadol'skij V.V. The partial factor values calibration for the ultimate limit state checking of steel structures for the conditions Republic of Belarus. Part 2. *Construction and Reconstruction*. 2016; 5(67):69-75. (rus.).
35. Nadolski V., Rozsas A., Sykora M. Calibrating partial factors — methodology, input data and case study of steel structures. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019. DOI: 10.3311/PPci.12822
36. Perelmuter A.V., Tur V.V. Whether we are ready to proceed to a nonlinear analysis at designing? *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(3):86-102. (rus.).
37. Tur V., Martynov Yu., Nadolski V., Veryovka F. Problems in providing equal reliability of reinforced concrete and steel constructions within the existing reliability concept according to EN 1990. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete*. 2018; 10:103-120. DOI: 10.23746/2018-10-07
38. Keshtegar B., Meng Z. A hybrid relaxed first-order reliability method for efficient structural reliability analysis. *Structural Safety*. 2017; 66:84-93. DOI: 10.1016/j.strusafe.2017.02.005
39. Nadolski V., Martynov I. Estimation of target level of reliability based on the previous experience standardization. *Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. Applied Sciences*. 2014; 8:27-34. (rus.).

Received February 28, 2023.

Adopted in revised form on April 6, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

B I O N O T E S: **Vitali V. Nadolski** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Building Production Technologies; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; Associate Professor of the Department of Building Structures; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; ID RISC: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskiv@mail.by.

Эксплуатационные характеристики стальных конструкций длительного срока эксплуатации

Майрбек Мусаевич Шахабов¹, Андрей Борисович Сивенков¹,
Дмитрий Александрович Корольченко²

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий
(Академия ГПС МЧС России); г. Москва, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Процесс естественного старения металлических конструкций в условиях воздействия длительной механической нагрузки и факторов окружающей среды приводит к изменению физико-химических и механических свойств металлов.

Материалы и методы. Представлены результаты исследования в отношении образца стальной конструкции со сроком эксплуатации 86 лет. Использовался комплекс экспериментальных методов исследования: оптико-эмиссионный метод для определения химического состава; металлографический метод для исследования микроструктуры, выявления дефектов материала и оценки неметаллических включений в структуре образца; испытания на статическое растяжение для определения качественных и эксплуатационных характеристик материалов, в частности прочности и пластичности.

Результаты. В процессе эксплуатации химический состав стали в целом остается неизменным. Сравнительный анализ микроструктуры стали Ст3 и стали со сроком эксплуатации 86 лет свидетельствует о незначительных изменениях в структуре, связанных с наличием разнородности и фрагментарной перестройкой структурных элементов, что может являться свидетельством начала разрушения структуры и снижения прочностных характеристик стали. В структуре стали обнаружено наличие неметаллических включений (точечные оксиды и сульфиды марганца), которые служат концентраторами напряжений и деформаций в матрице, вызывая локальное разрушение материала при более низкой средней деформации, что может привести также к снижению предела прочности стальных конструкций. Полученные значения эксплуатационных характеристик рассматриваемой стальной конструкции, имеющей коррозионные поражения поверхностного слоя, свидетельствуют о снижении предела прочности на 15 %, предела текучести на 10 % и относительного удлинения на 12 % от нормативных показателей.

Выводы. Показано влияние коррозионного процесса на снижение эксплуатационных характеристик стальной конструкции. Предполагается, что коррозия со временем переходит в более агрессивный вид от равномерной коррозии до коррозионного растрескивания и распространяется вглубь основного металла, что приводит к значительной потере механических свойств стальных конструкций и снижению пределов их огнестойкости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сталь, стальные конструкции, химический состав, микроструктура, эксплуатационные характеристики, срок эксплуатации, предел прочности, предел текучести, коррозия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шахабов М.М., Сивенков А.Б., Корольченко Д.А. Эксплуатационные характеристики стальных конструкций длительного срока эксплуатации // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 864–879. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.864-879

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Александрович Корольченко, da-vip@mail.ru.

Operational characteristics of steel structures of long term service life

Mayrbek M. Shakhobov¹, Andrey B. Sivenkov¹, Dmitriy A. Korolchenko²

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense,
Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters; Moscow, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The process of natural ageing of metal structures under influence of long-term mechanical loading and environmental factors, leads to changes in physical, chemical and mechanical properties of metals. Nowadays, a considerable number of industrial and civil buildings with metal structures having service life in the range of 30 to 120 years are in operation all over the world. Most of the scientific work on the aging of metals has been done in mechanical engineering,

wear resistance of pipelines, machine parts, etc. In this connection, undoubtedly, the development of scientific direction connected with the study of peculiarities of changes in the structure, physical and mechanical characteristics of steel structures of a long period of their operation becomes actual. This is caused by the necessity of safe functioning of these constructions during the whole service life of a building or a structure, and also by the necessity of prediction of their behavior in fire and fire-resistant conditions.

Materials and methods. The results of research concerning a steel structure specimen with a service life of 86 years have been presented. A set of experimental research methods was used: optical emission method to determine the chemical composition; metallographic method to study the microstructure, identify material defects and evaluate non-metallic inclusions in the structure of the sample; static tensile tests to determine the quality and performance characteristics of materials, in particular strength and ductility.

Results. The results show that the chemical composition of the steel in general remains essentially unchanged during operation. A comparative analysis of the microstructure of steel St3 and steel with a lifetime of 86 years indicates slight changes in the structure related to the presence of multi-grain and fragmentary restructuring of structural elements, which may be indicative of the beginning of the destruction of the structure and reduce the strength characteristics of steel. The steel structure revealed the presence of non-metallic inclusions (point oxides and manganese sulfides) which serve as stress and strain concentrators in the matrix, causing local material failure at lower average strain, which may also lead to a reduction in the tensile strength of steel structures. According to the results of metallographic analysis insignificant transformations in the structure characterized by a change in perlite morphology, the presence of heterogeneity as well as the presence of non-metallic inclusions in the form of point oxides and manganese sulfides can be demonstrated. The significant influence of uniform and ulcerous corrosion process flowing into corrosion cracking going deep into the base metal on mechanical characteristics of steel is revealed. The obtained values of operational characteristics of the considered steel structure, having surface corrosion damages shows the lowering of ultimate strength by 15 %, yield strength by 10 % and relative elongation by 12 % from the normative values.

Conclusions. Characteristic changes in the structure of steel with a long service life have been established. A comparative analysis of the results of static tensile tests on specimens from sections of the structure without corrosion damage and specimens cut out at the section acutely affected by corrosion has been made. The influence of corrosion process on reduction of operational characteristics of steel structure is shown. It is supposed that corrosion in course of time turns to a more aggressive type from even corrosion to corrosion cracking and spreads deep into the base metal which leads to considerable loss of mechanical properties of steel structures and to reduction of their fire-resistance limits.

KEYWORDS: steel, steel structures, chemical composition, microstructure, operational characteristics, service life, tensile strength, yield strength, corrosion

FOR CITATION: Shakhbarov M.M., Sivenkov A.B., Korolchenko D.A. Operational characteristics of steel structures of long term service life. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):864-879. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.864-879 (rus.).

Corresponding author: Dmitry A. Korolchenko, da-vip@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В современной строительной отрасли металлические конструкции занимают передовые позиции по их практическому применению для зданий и сооружений различного функционального назначения. По данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат)¹, выпуск конструкций и деталей в общем объеме конструкций черных металлов в 2021 г. составил 6,8 млн т, что на 0,5 % больше, чем в 2019 г. и на 9 % выше показателей 2020 г. (5,6 млн т). Такие лидирующие позиции применения металлических конструкций в строительстве объяснимы тем, что они обладают высокой прочностью и долговечностью, определяющей надежность работы конструкций и способность в различной степени выдерживать значительные механические нагрузки.

Важным элементом подобных конструкций является их срок службы, который может достигать нескольких десятков лет. Нормативные сроки службы зданий и сооружений приведены в табл. 1 согласно ГОСТ 27751–2014 «Надежность строи-

тельных конструкций и оснований. Основные положения».

Проблема естественного старения стальных строительных конструкций (балки, стойки, колонны, фермы и т.д.) с установлением изменения качественных характеристик во времени эксплуатации малоизучена. Большинство научных трудов по изучению различных свойств сталей выполнены в области машиностроения, износоустойчивости трубопроводов, деталей машин и т.д. В России и за рубежом данное направление актуально. Результаты исследований представлены в трудах таких ученых, как Ю.А. Демина, Т.В. Молочная, С.В. Панин, J. Chen, W. Wang и др. [1–9]. Одна из наиболее близких работ в области исследования влияния продолжительности эксплуатации стальных конструкций на их характеристики — это статья И.В. Гонтаренко [10], в которой рассматривается силовое сопротивление строительных конструкций с различными механическими и коррозионными повреждениями в период их эксплуатации.

Ретроспективный анализ работ свидетельствует о том, что в довоенные и послевоенные годы в строительстве использовались конструкции, выполненные из кипящих сталей. Основной особенностью этих сталей служит процесс их получения

¹ Федеральная служба государственной статистики (Росстат). URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/12_02-02-2022.html

Табл. 1. Нормативные сроки службы зданий и сооружений по ГОСТ 27751–2014

Table 1. Standard service life of buildings and structures GOST 27751–2014

Объект Object	Срок эксплуатации, лет Service life, years
Здания для использования в короткий период времени (строительная бытовка, летний павильон и т.д.) Buildings for short-term use (construction shed, summer pavilion, etc.)	10
Здания, применяемые в сильноагрессивной среде (трубопровод, газовая и химическая промышленность и т.д.) Buildings used in highly aggressive environments (pipeline, gas and chemical industry, etc.)	До 25 Up to 25
Здания при обычных условиях использования (жилые и производственные здания) Buildings under normal conditions of use (residential and industrial buildings)	До 50 Up to 50
Здания со специальным назначением (спортивные, культурные сооружения и т.д.) Buildings with a special purpose (sports, cultural facilities, etc.)	Более 100 Over 100

по способу Сименса – Мартена и бессемерованием, а механические свойства кипящих сталей регламентировались нормами 1931 г.²

Наиболее востребованной строительной сталью в 30-е гг. была сталь марки СтЗкп, применение которой в настоящее время для ответственных несущих конструкций имеет значительные ограничения. В настоящее время в строительстве широко используются стальные конструкции, раскисленные до полуспокойных или спокойных. Основные характеристики сталей марок СтЗ представлены в табл. 2.

Сегодня в мире эксплуатируется большое количество зданий преимущественно промышленного (цеха, мастерские, котельные) и гражданского (жилые, общественные) назначения с металлическими конструкциями (балки перекрытий, колонны, фермы), которые были построены в различные годы прошлых столетий. Значительная часть подобных

строительных объектов имеет сроки эксплуатации от 30 до 120 лет. Многие здания продолжают эксплуатироваться, некоторые из них находятся на завершающем этапе своего жизненного цикла. Возникает очевидный вопрос, насколько могли измениться физико-химические и механические свойства стали в строительных конструкциях с момента начала их эксплуатации под воздействием факторов окружающей среды, различных условий эксплуатации и действия механической нагрузки.

Изучение особенностей изменения структуры, физико-механических характеристик строительных конструкций длительного периода эксплуатации — актуальное направление исследований в связи с необходимостью обеспечения надежности их функционирования на протяжении всего срока службы здания или сооружения, а также прогнозирования поведения этих конструкций в условиях пожара, их огнестойкости.

Цель настоящего исследования — установление возможности изменения химического состава, структурных особенностей, а также прочностных характеристик конкретного образца стальной кон-

² СТО 22-01-02. Руководство по эксплуатации несущих стальных конструкций покрытий зданий, выполненных из кипящих сталей: введен 21.12.2002. М.: ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 2002.

Табл. 2. Основные характеристики сталей марок СтЗ по ГОСТ 535–2005

Table 2. Main characteristics of St3 steels according to GOST 535–2005

Марка стали Steel grade	Массовая доля химических элементов, % Mass fraction of chemical elements, %		Механические свойства сталей Mechanical properties of steels		
	Mn	Si	σ_B , МПа MPa	σ_r , МПа для толщины до 20 мм MPa for thickness up to 20 mm	δ , % для толщины до 20 мм % for thicknesses up to 20 mm
СтЗкп St3 boiling steel	0,30–0,60	Не более 0,05 Less than 0.05	360–460	Не менее 235 At least 235	Не менее 27 At least 27
СтЗпс St3 semi-soft steel	0,40–0,65	0,05–0,15	370–480	Не менее 245 At least 245	Не менее 26 At least 26
СтЗсп St3 mild steel	0,40–0,65	0,15–0,30	370–480	Не менее 245 At least 245	Не менее 26 At least 26

струкции в условиях продолжительного периода ее эксплуатации. Авторами проведена экспериментальная оценка степени изменения свойств стального конструктивного элемента, находившегося длительное время в условиях окружающей среды. Данная работа выполняется в рамках научного направления изучения поведения различных материалов и конструкций длительного срока эксплуатации в условиях пожара.

Испытания выполнены в Научно-исследовательском и испытательном центре сварочных технологий и неразрушающего контроля «Спектр» (г. Москва).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследован образец стальной конструкции (швеллер с толщиной стенки 6 мм, по геометрическим параметрам швеллер сопоставим со швеллером № 27 по ГОСТ 8240) площадки обслуживания оборудования (рис. 1), имеющий подтвержденный срок эксплуатации 86 лет внутри здания текстильного комбината имени III Интернационала по адресу: Владимирская область, Александровский район, г. Карабаново, пл. Ленина, д. 1.



Рис. 1. Внешний вид исследуемого образца стальной конструкции (швеллер) из здания текстильного комбината имени III Интернационала

Fig. 1. Exterior view of the investigated sample of the steel structure (channel) from the building of the textile plant named after III International

Образец стальной конструкции находился в условиях окружающей среды в здании комбината с 1936 г. Авторы, располагая архивными данными, установили, что в процессе эксплуатации этот элемент работал в условиях напряженного состояния — изгиб при действии незначительных кратковременных нагрузок. На поверхности стальной конструкции по всей ее площади по причине длительного воздействия условий окружающей среды заметны следы коррозионного процесса. Визуально можно определить различную степень коррозионного поражения образца стальной конструкции.

Для проведения исследований использовали комплекс экспериментальных методов. Оптико-эмиссионный метод применялся для установления химического состава ГОСТ 28033–89. Сущность метода заключается в интенсивности характеристических линий флюоресценции элемента от его массовой доли в пробе. Возбуждаемое первичным рентгеновским излучением характеристическое излучение элементов в пробе разлагается в спектр с последующим измерением аналитических сигналов и определением массовой доли элементов с помощью градуировочных характеристик согласно ГОСТ 28033–89.

Для выявления дефектов, особенностей структуры с возможностью последующего прогнозирования поведения металлов в различных эксплуатационных условиях применен металлографический метод по ГОСТ 10243–75, ГОСТ 5640–2020.

С целью установления в структуре неметаллических включений (загрязнений) использован ГОСТ 1778–78. Оценку неметаллических включений деформированного металла производили под микроскопом путем сравнения полученных данных с эталонными шкалами при просмотре всей площади нетравленных шлифов с продольным направлением волокон. Согласно ГОСТ 1778–78, если включения по форме и размерам не могут быть оценены одним из двух соседних баллов, допускается оценка 0,5; 1,5; 2,5 балла и т.д. Оценку 0 ставят при отсутствии какого-либо вида включений, а также когда включений более чем в 2 раза меньше по сравнению с баллом 1.

Испытания по выявлению механических характеристик проводились на статическое растяжение по ГОСТ 1497–84. Сущность метода состоит в определении при температуре 20 °С таких характеристик механических свойств, как: предел текучести физического, предел текучести условного, временного сопротивления; относительное равномерное удлинение; относительное удлинение после разрыва; относительное сужение поперечного сечения после разрыва.

При изготовлении образцов принимали меры, исключающие возможность изменения свойств металла при нагреве или наклепе, возникающих в результате механической обработки. Глубина ре-

зания при последнем проходе не должна превышать 0,3 мм согласно ГОСТ 1497–84. Пределы текучести физический, верхний и нижний определяли по диаграмме растяжения, полученной на испытательной машине, при условии, что масштаб диаграммы по оси усилия 1 мм соответствует напряжению не более 10 Н/мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав стали

В табл. 3 представлены результаты химического анализа образца стали со сроком эксплуатации 86 лет. Можно установить, что исследуемый образец по своему химическому составу, в частности по содержанию $C = 0,146$, соответствует нормативному содержанию углерода для сталей марки Ст3.

Каждый химический элемент, входящий в состав стали, оказывает индивидуальное влияние на ее механические свойства. Возможен как эффект улучшения, так и ухудшения прочностных характеристик. Наряду с химическим составом стали не менее важна степень раскисления металла. До 1970 г. химический состав стали не нормировался и фактически не контролировался, а в начале 1970 г. произошли кардинальные изменения в металлургии, что привело к возможности раскисления сталей до полуспокойных, спокойных путем добавления в достаточно большом количестве кремния и алюминия.

Имея данные по химическому составу различных сталей и их сравнение с полученными результатами, можно утверждать о том, что в целом при длительной эксплуатации стальных конструкций в зданиях и сооружениях в «холодном» состоянии химический состав стали остается неизменным.

В связи с тем, что в исследуемом образце, выполненном из стали марки Ст3, содержание кремния не превышает 0,05 % (табл. 3), можно установить, что сталь относится к группе кипящих, имеющих значительное применение в довоенное и послевоенное время в строительстве в виде ответственных конструкций (балки, колонны, фермы). Известно, что кипящая сталь в отличие от спокойной является

не полностью раскисленной и содержит кислород. Во время разлива в процессе кристаллизации эта сталь подвержена так называемому «кипению». «Кипение» приводит к выделению газообразных продуктов, а также к усилению неоднородности состава сталей по содержанию углерода, серы и фосфора. Неоднородность химического состава, несомненно, вызывает изменение механических свойств стали. Такая сталь более хрупкая, плохо сваривается и быстрее подвергается процессу коррозии [11–15].

Обращает на себя внимание характерная особенность по химическому составу исследуемого образца стали, которая связана с присутствием в его составе в малом количестве кремния (0,057 %) и алюминия (0,0052 %) (табл. 3). Известно, что эти два элемента запускают процесс удаления из состава металла растворенного в нем кислорода, который является вредной примесью и отрицательно влияет на механические свойства стали. Окислы кислорода чаще всего непрочные и выступают концентраторами напряжений. Их наличие в структуре сплава заметно уменьшает его выносливость. Кислород также уменьшает сопротивляемость стали хрупкому разрушению [16–19]. В отличие от этого, в современных сталях содержание данных двух элементов сравнительно высокое: содержание кремния может достигать до 0,3 %, а алюминия до 0,02 %, что фактически оказывает положительное влияние на механические свойства стали.

Микроструктура стали

Результаты оценки характерных изменений в микроструктуре образца стали с использованием металлографического анализа представлены на рис. 2, 3.

Проведенные испытания по металлографическому анализу показали, что микроструктура стали длительного естественного старения имеет феррито-перлитную, мелкозернистую структуру (рис. 2). Оценка перлитной составляющей не превышает 20–25 %, она расположена в виде пластинчатого перлита. Зерно феррита равноосное, его количество

Табл. 3. Химический состав образца

Table 3. Sample chemical composition

Содержание элементов в основном металле, % Element content in the base metal, %								
Наименование элементов Name of elements	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Результаты количественного анализа Results of quantitative analysis	0,146	0,050	0,450	0,010	0,012	0,023	0,081	0,046
Наименование элементов Name of elements	Cu	Al	B	Nb	Ti	V	W	Fe
Результаты количественного анализа Results of quantitative analysis	0,094	0,0052	< 0,00010	0,014	< 0,0050	< 0,0050	< 0,010	99,04

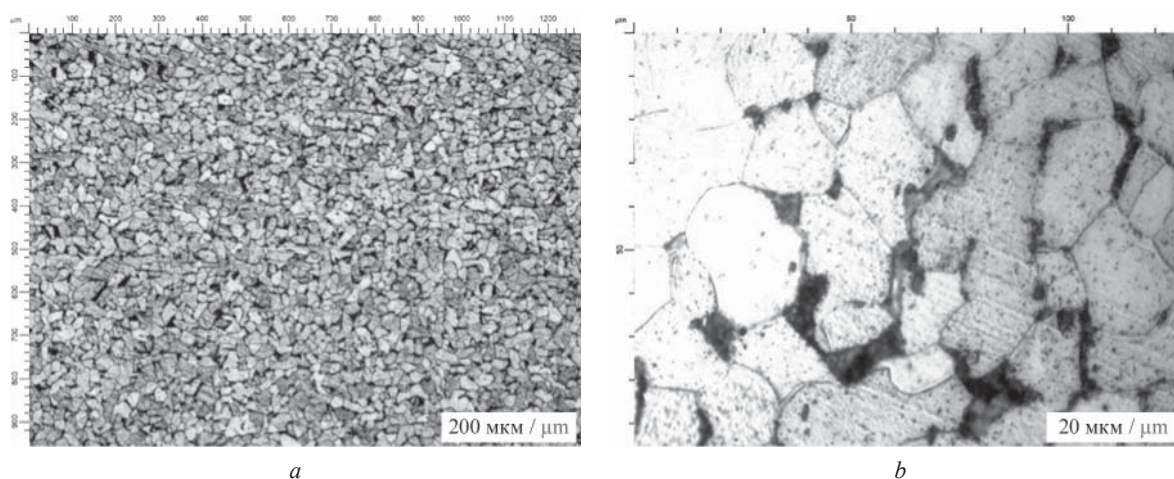


Рис. 2. Микроструктура испытуемого образца стали: *a* — разрешение 200 мкм; *b* — разрешение 20 мкм

Fig. 2. Microstructure of the tested steel sample: *a* — 200 μm resolution; *b* — 20 μm resolution

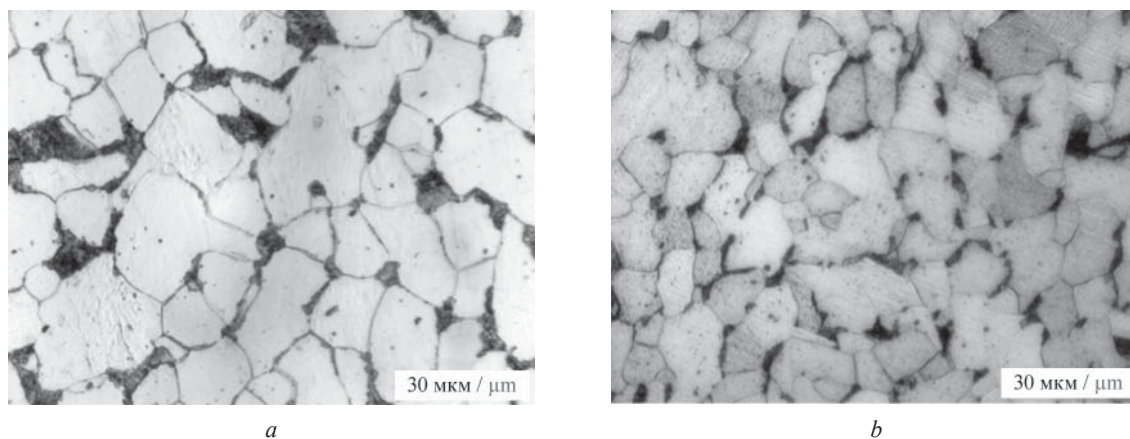


Рис. 3. Микроструктура образцов стали: *a* — сталь Ст3 (типичная структура), разрешение 30 мкм; *b* — исследуемая сталь (срок эксплуатации 86 лет), разрешение 30 мкм

Fig. 3. Microstructure of steel samples: *a* — St3 steel (typical structure), resolution 30 μm ; *b* — steel under study (86 years of service life), resolution 30 μm

в стали примерно 75–80 %. Величина ферритного зерна находится в пределах 12–15 мкм. Размер зерна достигает 9–10 баллов установленной шкалы. Структура стали в равновесном состоянии меняется в зависимости от концентрации углерода. Так как содержание углерода меньше 0,8 % данная структура относится к доэвтектоидному типу. Подобная структура стали является типовой для доэвтектоидных сталей, в которых феррит преобладает в количественном содержании.

Для типовой структуры стали Ст3 соотношение феррита и перлита в стали обычно составляет 80 и 20 % соответственно, а величина ферритного зерна имеет значение в среднем 26,7 мкм (0,0267 мм) [20–23].

Сравнительный анализ микроструктуры стали Ст3 и стали со сроком эксплуатации 86 лет свидетельствует о незначительных преобразованиях в структуре, которые характеризуются изменением морфологии перлита, наличием разнотерности

и фрагментарной перестройки структурных элементов (рис. 3). Различимая визуальная фрагментация частиц феррита служит предпосылкой к началу разрушения структуры стали и возможному снижению прочностных характеристик стали.

Подобные изменения были установлены и в других работах, связанных с изучением микроструктуры стали, которая эксплуатировалась длительное время в составе различного технологического оборудования. Например, в работе [24] была изучена микроструктура котловой стали (паровой котел), которая эксплуатировалась с 1954 г. в составе технологического оборудования. Металлографические исследования позволили установить сфероидизацию перлита. Феррит в данном случае имеет ярко выраженную разнотерность, что отражает протекание рекристаллизационного процесса, который может являться причиной снижения прочности стального материала [24]. Эффект сфероидизации и начало рекристаллизации также обнаружены

при эксплуатации стали в качестве материала для тепловых установок продолжительностью 40 лет в условиях термомеханического старения [25]. При этом изменения в структуре образца сопровождались повышением его твердости. Указанные работы могут свидетельствовать о влиянии на свойства сталей (стальных конструкций) не только продолжительности эксплуатации, но и условий эксплуатации. В данном случае это могут быть всевозможные специфические условия эксплуатации и величина механической нагрузки. При действии долговременной механической нагрузки на стальную конструкцию в структуре стали, по мнению авторов, возможны необратимые изменения, связанные с изменением формы зерен, их вытягивание по направлению напряжения или смятие, увеличение в размерах, что может сказаться на долговечности металлических конструкций. Наиболее интенсивная утрата несущей способности стальных конструкций во время их эксплуатации в этом случае происходит при воздействии высоких температур (воздействие пожара).

Механическая нагрузка может стать причиной появления деформаций, дефектов и механических повреждений в структуре стали. Согласно публикациям [26, 27], включения с низким показателем де-

формируемости могут приводить к возникновению усталостных трещин двумя способами:

- вызывать непосредственное зарождение трещины в процесс эксплуатации из-за неспособности передавать напряжение матрице (это приводит к повышению напряжений вокруг включений во время эксплуатации, вследствие чего зарождаются трещины) [26, 27];

- низкий показатель деформируемости включений может быть причиной появления микротрещин на поверхности раздела «включение – матрица» в процессе горячей и холодной пластической деформации стали. Предварительно возникшие микротрещины могут быть причиной усталостного разрушения материала из-за распространения трещин в процессе эксплуатации [27, 28].

В соответствии с работами [29–32], механические (прочность, пластичность, износостойкость) и технологические свойства сталей во многом зависят от неметаллических включений, т.е. от загрязненности стали. Известно, что технология производства кипящих сталей характеризуется различной степенью их загрязнения. Проведенные нами испытания по оценке неметаллических включений по ГОСТ 1778–70 показали, что сталь является загрязненной с наличием точечных оксидов и сульфидов марганца (рис. 4).

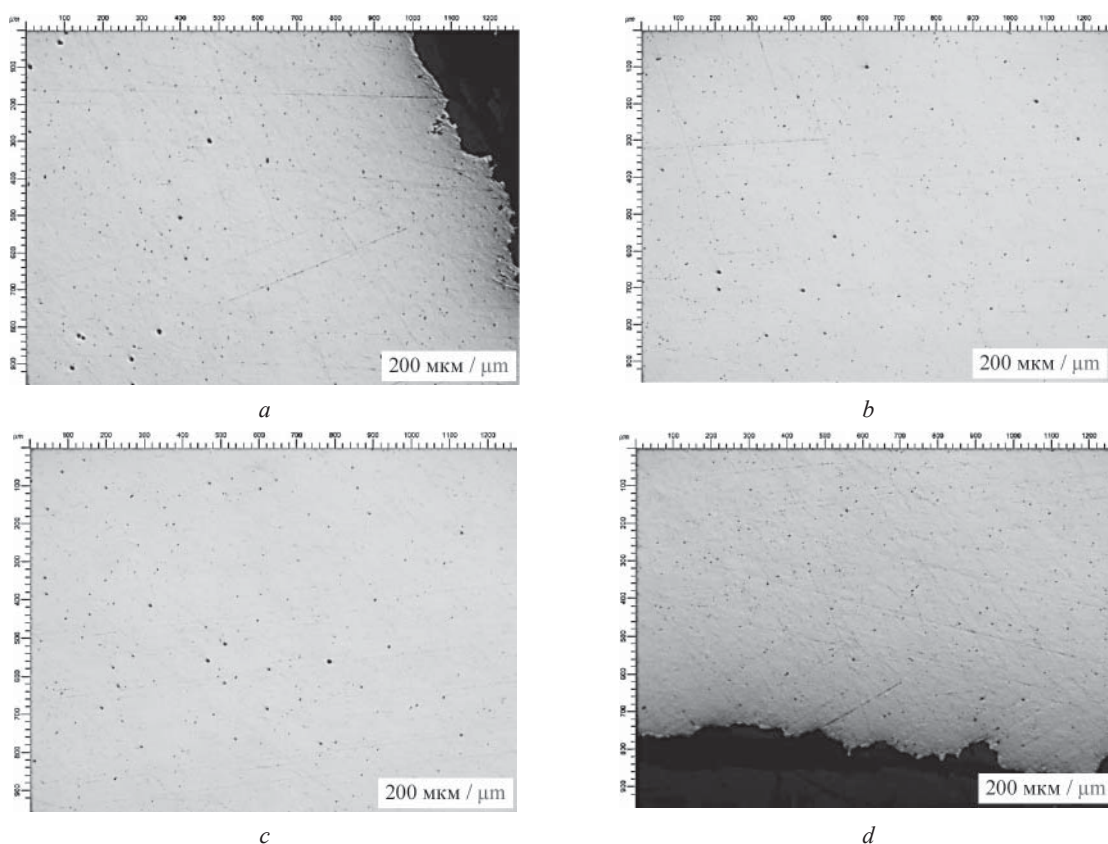


Рис. 4. Изображения наиболее загрязненных зон неметаллическими включениями для образца стали длительного срока эксплуатации

Fig. 4. Images of the most contaminated areas with non-metallic inclusions for a sample of steel of a long line of operation

На рис. 4 сульфиды марганца представлены в виде более крупных точечных включений. Неоднородность механических свойств стали может быть вызвана не только изменением количества включений, но и изменением их формы. Возможно, в процессе механического воздействия на стальные конструкции силикатные и сульфидные включения вытягиваются в направлении деформации, а недеформирующиеся включения оксидов перераспределяются и образуют строчечные скопления, что способствует анизотропии механических свойств стали.

Неметаллические включения, действуя в роли концентраторов напряжения, могут способствовать снижению механических, технологических и эксплуатационных свойств, а также повышению охрупчивания сталей, что напрямую влияет на прочность, пластичность и характер разрушения материала [26, 33].

Механические свойства стали

С целью оценки изменения механических характеристик исследуемого образца стали (срок эксплуатации с 1936 г.) стальную конструкцию по длине разделили на участки в зависимости от степени сохранности и повреждения коррозией. Наиболее важным было разделение стальной конструкции на участки: без значительного коррозионного воздействия и со следами коррозии, уходящей вглубь по толщине образца (рис. 5).



Рис. 5. Внешний вид участка со следами значительной коррозии стального образца (срок эксплуатации с 1936 г.) — место отбора образца Ш-4

Fig. 5. Appearance of the area with traces of significant corrosion of the steel sample (operating life since 1936) — sampling site Sh-4

Для проведения испытаний на статическое растяжение вырезали 4 стальных образца. По внешнему обследованию конструкций установлены характерные изменения технического состояния. С внешней стороны швеллера по всей площади образца со временем эксплуатации сформировался окисный слой. На участках со следами коррозионных воздействий наблюдаются два вида коррозии: равномерная и язвенная, перетекающая в коррозионное растрескивание, уходя вглубь основного металла (рис. 5).

Образцы Ш-1 и Ш-2 вырезаны на участке стальной конструкции без значительных коррозионных повреждений (Ш-1 — образец с незначительными следами коррозии; Ш-2 — в удовлетворительном состоянии, без следов коррозии), а образцы Ш-3 и Ш-4 — на охваченном коррозией участке конструкции (глубина проникновения коррозионного повреждения от 2 до 3 мм).

Испытания проводились на универсальной испытательной машине LFM-250 кН по ГОСТ 1497–84 со скоростью нагружения 8 мм/мин. Основные результаты испытаний образцов Ш-1, 2 и нормативные показатели кипящих сталей СтЗкп и СтЗпс приведены в табл. 4 и на рис. 5.

При рассмотрении полученных зависимостей (рис. 6) можно сделать вывод о типовом характере изменения диаграмм растяжения с наличием всех характерных для стали СтЗ участков. В целом для различных образцов имеется, по сути, на диаграмме напряжения идентичная физическая картина разрушения образца стали. На участке от предела текучести до предела прочности диаграмма стремится вверх до максимального значения 367–380 МПа при 17–18 % деформации. Далее начинается участок разрушения, а в самом образце появляется так называемая «шейка», т.е. в результате растяжения стенки образца становятся тоньше. Вследствие этого необходимое усилие для растяжения образца уменьшается, и диаграмма стремится вниз. При уменьшении напряжения до 280 МПа и достижении 22–25 % деформации происходит разрыв образца на участке, где была образована «шейка».

По результатам оценки механических характеристик стальных образцов Ш-1 и Ш-2 (табл. 4 и рис. 5) можно говорить о том, что наибольшие изменения претерпевают значения пределов текучести, а также изменение имеет участок от предела текучести вплоть до предела прочности — участок нарастания необратимых деформаций. Так, для исследуемых стальных образцов предел текучести возрастает на 12–15 % по сравнению с контрольным образцом стали СтЗкп, а участок необратимых деформаций имеет снижение фактически на 25 % (рис. 6). Это может свидетельствовать о возможном снижении эффекта самоупрочнения и более интенсивном нарастании необратимых деформаций для стали длительного естественного старения вплоть до момента разрушения образца.

При сравнительном анализе полученных результатов видно, что наибольшие изменения связаны с образцом Ш-1, имеющим некоторые коррозионные повреждения поверхности конструкции и удовлетворительное техническое состояние. Для данного образца предел прочности близок к минимальному нормативному пределу этой характеристики для стали СтЗкп, а также заметно снижение показателя относительного удлинения образца на 18 % по сравнению с контрольным образцом, что характеризует появление признаков повышения хрупкости.

Табл. 4. Основные результаты испытаний на статическое растяжение образцов Ш-1, 2 и нормативные показатели по ГОСТ 535–2005

Table 4. The main results of static tensile tests of specimens Sh-1, 2 and normative values in accordance with GOST 535–2005

Марка стали Steel grade	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ² (кгс/мм ²), для проката толщин, мм Tensile strength σ_B , N/mm ² (kgf/mm ²), for rolled thicknesses, mm		Предел текучести σ_r , < Н/мм ² (кгс/мм ²), для проката толщин, мм Yield strength σ_r , < N/mm ² (kgf/mm ²), for rolled thicknesses, mm		Относительное удлинение δ , %, для проката толщин, мм Relative elongation δ , %, for rolled thicknesses, mm
			До 10 включительно Up to 10 inclusive	Свыше 10 до 20 включительно More than 10 to 20 inclusive	До 20 включительно Up to 20 inclusive
	До 10 включительно Up to 10 inclusive	Свыше 10 Over 10	Не менее At least		

Нормативные значения сталей при статическом растяжении

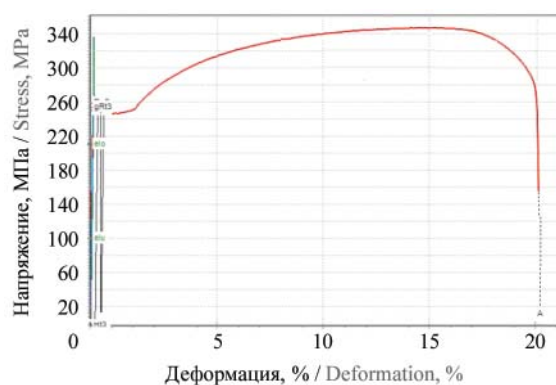
Standard values of steels in static tension

СтЗкп St3 boiling steel	360–460 (37–47)	235 (24)	235 (24)	27
СтЗпс St 3 semi-soft steel	370–480 (38–49)	245 (25)	245 (25)	26

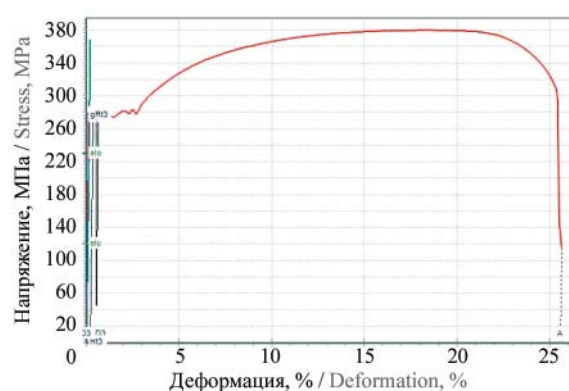
Результаты испытаний на статическое растяжение образцов Ш-1, 2

Results of static tensile tests of specimens Sh-1, 2

Образец Sample	Размеры, мм Dimensions, mm	Начальное сечение S_0 , мм ² Initial section S_0 , mm ²	Условный предел текучести при 0,5 %, МПа Yield strength at 0.5 %, MPa	Предел текучести при 0,2 %, МПа Yield strength at 0.2 %, MPa	Предел текучести при 0,5 %, МПа Yield strength at 0.5 %, MPa	Предел прочности, МПа Tensile strength, MPa	Удлинение при разрушении, % Elongation at break, %
Ш-1 Sh-1	20,14 × 4,49	90,43	273,98	278,61	270,45	367,07	22,15
Ш-2 Sh-2	20,14 × 4,87	97,69	277,04	279,75	274,18	380,08	25,56



a



b

Рис. 6. Диаграммы растяжения стальных образцов: а — Ш-1; б — Ш-2

Fig. 6. Tensile diagrams of steel specimens: a — Sh-1; b — Sh-2

Для образца стали Ш-2, имеющего в целом удовлетворительное техническое состояние при отсутствии значительных следов коррозии, получены фактически нормативные показатели или близкие значения к нормативным показателям для стали СтЗкп по ГОСТ 535–2005, за исключением значений предела текучести (предел текучести повышается на 15 %).

В экстремальных условиях повышения температуры (пожар), по мнению авторов, скорость нарастания необратимых деформаций и соответствующие изменения в структуре металла могут привести к стремительному снижению способности стальной конструкции противостоять действию пожара — снижению огнестойкости.

Значительные изменения эксплуатационных характеристик обнаружены для образцов сталей Ш-3 и Ш-4, которые были вырезаны из наиболее охваченного коррозией участка. С наружной поверхности образовалась коррозия в виде ржавчины (окисного слоя), которая образует рыхлый слой, коррозия распространяется вглубь металла и может привести к образованию сквозных язв.

Ранее проведенные исследования свидетельствуют о возможном существенном влиянии процесса коррозии на механические характеристики сталей. Согласно работе Г.В. Карпенко [27], механические свойства стали могут изменяться под влиянием коррозионной среды, действовавшей еще до начала эксплуатации металла (его нагружения), например при предварительной коррозии металла. В этом случае прочностные характеристики изменяются вследствие коррозионного поражения металлов, часто имеющего вид концентраторов

напряжения. Данные испытания подтверждают гипотезу авторов работ [34–36] о механизме снижения прочностных характеристик и относительного удлинения сталей из-за технического состояния поверхности испытываемого образца. В.В. Филипповым, К.П. Бережновым проведены механические испытания сталей марок 09Г2С и ВСтЗсп5 в диапазоне климатических температур, которые были подвержены процессу коррозии. После 6 месяцев экспонирования образцов, когда коррозионные язвы более остры, снижение прочностных характеристик и относительного удлинения получается более значительным, чем при последующих сроках экспонирования.

Для сталей ВСтЗсп5 и 09Г2С снижение механических свойств достигает следующих величин: 13,6 и 13 % — по пределу текучести; 9,0 и 11 % — по временному сопротивлению; 19,3 и 15,3 % — по относительному удлинению соответственно [21].

По результатам проведенных исследований установлено, что фактические механические характеристики временного сопротивления и предела текучести образцов и удлинения Ш-3, 4 не соответствуют нормативным показателям по ГОСТ 535–2005. Особенно значительно отличаются показатели образца Ш-4, имеющего значительные коррозионные поражения поверхностного слоя (табл. 5, рис. 7).

Предел прочности образца Ш-4 ниже нормативного временного сопротивления на 15 %, предела текучести на 10 % и относительного удлинения на 12 %. Полученные результаты свидетельствуют о наличии тенденции снижения механических свойств стали для пораженных коррозией участков на 15 % и более. Предполагается, что коррозия

Табл. 5. Основные результаты испытаний на статическое растяжение образцов Ш-3, 4 и нормативные показатели по ГОСТ 535–2005

Table 5. The main results of static tensile tests of specimens Sh-3, 4 and normative indicators according to GOST 535–2005

Марка стали Steel grade	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ² (кгс/мм ²), для проката толщин, мм Tensile strength σ_B , N/mm ² (kgf/mm ²), for rolled thicknesses, mm		Предел текучести σ_s , < Н/мм ² (кгс/мм ²), для проката толщин, мм Yield strength σ_s , < N/mm ² (kgf/mm ²), for rolled thicknesses, mm		Относительное удлинение δ , %, для проката толщин, мм Relative elongation δ , %, for rolled thicknesses, mm
			До 10 включительно Up to 10 inclusive	Свыше 10 до 20 включительно More than 10 to 20 inclusive	
	До 10 включительно Up to 10 inclusive	Свыше 10 Over 10	Не менее At least		До 20 включительно Up to 20 inclusive
СтЗкп St3 boiling steel	360–460 (37–47)		235 (24)	235 (24)	27
СтЗпс St 3 semi-soft steel	370–480 (38–49)		245 (25)	245 (25)	26

Образец Sample	Размеры, мм Dimensions, mm	Начальное сечение, S_0 , мм ² Initial section, S_0 , mm ²	Усл. предел текучести при 0,5 %, МПа Yield strength at 0.5 %, MPa	Предел текучести при 0,2 %, МПа Yield strength at 0.2 %, MPa	Предел текучести при 0,5 %, МПа Yield strength at 0.5 %, MPa	Предел прочности, МПа Tensile strength, MPa	Удлинение при разрушении, % Elongation at break, %
Основные результаты испытаний на статическое растяжение образцов Ш-3, 4 Results of static tensile tests of specimens Sh-3, 4							
Ш-3 Sh-3	20,02 × 4,97	99,50	242,38	244,69	243,54	345,70	20,08
Ш-4 Sh-4	19,98 × 4,96	99,10	221,60	223,57	222,50	304,52	19,94

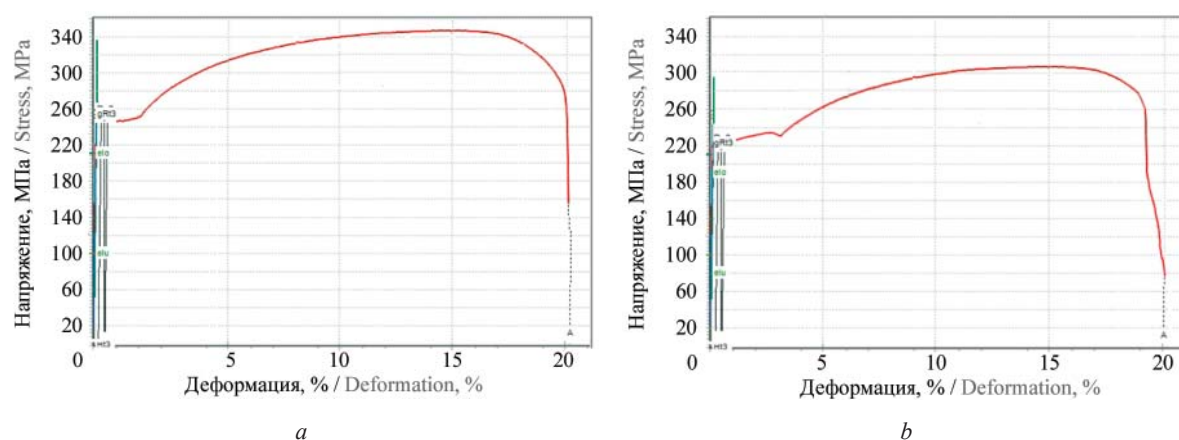


Рис. 7. Диаграммы растяжения стальных образцов: а — Ш-3; б — Ш-4

Fig. 7. Tensile diagrams of steel specimens: a — Sh-3; b — Sh-4

со временем переходит в более агрессивный вид от равномерной коррозии до коррозионного растрескивания и распространяется вглубь основного металла, что приводит к значительной потере механических свойств стальных конструкций и снижению пределов их огнестойкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования по оценке влияния длительного срока эксплуатации стальных конструкций на физико-химические и механические характеристики, на примере конструктивного стального элемента (швеллера) площадки обслуживания оборудования (срок эксплуатации с 1936 г.) в здании текстильного комбината имени III Интернационала (Карабаново, Владимирская область). Проведена оценка химического состава, а также особенностей микроструктуры стали длительного естественного старения в условиях воздействия окружающей среды. В процессе исследования установлено, что рассматриваемые образцы изготовлены из кипящей стали и являются загряз-

ненными с наличием неметаллических включений, а именно в структуре стали присутствуют точечные оксиды и сульфиды марганца, которые могут стать причиной снижения механических характеристик стальных конструкций.

Определено, что в процессе эксплуатации химический состав стали в целом остается неизменным. Сравнительный анализ микроструктуры стали Ст3 и стали со сроком эксплуатации 86 лет свидетельствуют о незначительных изменениях в структуре, связанных с наличием разноразмерности и фрагментарной перестройкой структурных элементов, что может являться свидетельством начала разрушения структуры и снижения прочностных характеристик стали. Кроме этого, в структуре стали обнаружено наличие неметаллических включений (точечные оксиды и сульфиды марганца), которые служат концентраторами напряжений и деформаций в матрице, вызывая локальное разрушение материала при более низкой средней деформации, что может привести также к снижению предела прочности стальных конструкций.

Результаты механических испытаний по ГОСТ 1497–84 свидетельствуют о том, что значения предела прочности на растяжение для рассматриваемых образцов стали находятся на пределе минимальных значений пределов прочности. Установлена тенденция к возможному снижению механических свойств стали в условиях продолжительной эксплуатации. Результаты испытаний на статическое растяжение образцов Ш-1–4 при сравнении значительно отличаются друг от друга. Значительное ухудшение технического состояния стальных конструкций в период их эксплуатации может происходить в результате воздействия факторов окружающей среды, способствующих про-

теканию коррозионных процессов. Сравнение полученных результатов показывает, что для пораженных коррозией участков стального образца предел прочности образца Ш-4 ниже нормативного временного сопротивления на 15 %, предела текучести на 10 % и относительного удлинения на 12 %.

Предполагается, что коррозия со временем переходит в более агрессивный вид от равномерной коррозии до коррозионного растрескивания и распространяется вглубь основного металла, что приводит к значительной потере механических свойств стальных конструкций и снижению пределов их огнестойкости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Демина Ю.А. Деградация усталостных характеристик стали в результате длительного старения // Физико-химия и технология неорганических материалов : сб. мат. VIII Российской ежегодной конф. молодых научных сотрудников и аспирантов. М., 2011. С. 57–59.
2. Молочная Т.В. Оценка качества сталей феррито-перлитного класса по структурным составляющим после длительной эксплуатации // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2003. № 5. С. 54–56.
3. Полонский Я.А. Микромеханика разрушения стали Х23Н18 после длительных сроков эксплуатации // Вестник российских университетов. Математика. 2010. Т. 15. № 3. С. 976–977.
4. Фарбер В.М., Селиванова О.В., Хошинов В.А., Полухина О.Н. Деформационное старение в сталях : учебное пособие. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2018. 72 с.
5. Раткин В.В. Влияние хлоридсодержащей среды на механические характеристики бетона // Актуальные проблемы механики в современном строительстве : сб. науч. ст. III Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2014. С. 121–127.
6. Chen J. Study on the joint mechanical properties of steel structure buildings // International Journal of Building Pathology and Adaptation. 2021. Vol. 39. Issue 4. Pp. 655–665. DOI: 10.1108/ijbpa-07-2020-0055
7. Liao F., Zhang K., Wang W., Chen Y., Tang S., Xue X. et al. Fracture analysis of high-strength steel beam-column connections with initial defects // Journal of Constructional Steel Research. 2022. Vol. 194. P. 107301. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107301
8. Huang X., Yuan Y., Zhao J., Wei C. Comparative study on ultra-low-cycle-fatigue behavior of Q235 normal-steel and Q690 high-strength steel // Journal of Constructional Steel Research. 2022. Vol. 194. P. 107308. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107308
9. Wang W., Liu B., Kodur V. Effect of temperature on strength and elastic modulus of high-strength steel // Journal of Materials in Civil Engineering. 2013. Vol. 25. Issue 2. Pp. 174–182. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000600
10. Бузало Н.А., Гонтаренко И.В. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых стоек с повреждениями // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 1 (20). С. 56.
11. Рациупкин В.П., Корытов М.С. Производство стали. Методика выплавки : учебное пособие. Омск : Изд-во СибАДИ, 2007. 39 с.
12. Комаров О.Н., Жилин С.Г., Предеин В.В., Абашкин Е.Е., Попов А.В. Технология получения заготовок из кипящей стали для прокатного производства // Будущее машиностроения России : IX Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. М., 2016. С. 189–191.
13. Khayatazad M., De Pue L., De Waele W. Detection of corrosion on steel structures using automated image processing // Developments in the Built Environment. 2020. Vol. 3. P. 100022. DOI: 10.1016/j.dibe.2020.100022
14. Vasilchenko A., Doronin E., Ivanov B., Kononov V. Effect of residual deformation of a steel column on its fire resistance under combined exposure “Explosion-Fire” // Materials Science Forum. 2019. Vol. 968. Pp. 288–293. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.968.288
15. Zhou J.H., Shen Y.F., Xue W.Y., Jia N., Misra R.D.K. Improving strength and ductility of low activation martensitic (LAM) steel by alloying with titanium and tempering // Materials Science and Engineering: A. 2021. Vol. 799. P. 140152. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140152
16. Глинка Н.Л. Общая химия : учебное пособие. М. : Интеграл-Пресс, 2000. 728 с.

17. Крючков О.Б., Миронов И.А., Седов Э.В., Бондарева О.П. Использование отходов цветной металлургии для рафинирования стали // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 6 (201). С. 131–134.

18. Dolzhenko P., Tikhonova M., Kaibyshev R., Belyakov A. Dynamically recrystallized microstructures, textures, and tensile properties of a hot worked high-Mn steel // Metals. 2019. Vol. 9. Issue 1. P. 30. DOI: 10.3390/met9010030

19. Wang Q., Zhang Q., Luo L., Yan T., Liu J., Ding L. et al. Effects of high-temperature treatment and iron reduction index on tensile strength of basalt continuous fiber // Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. Vol. 564. P. 120836. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2021.120836

20. Аскарлова Г.Г. Микроструктурное исследование строительной стали // Молодой ученый. 2022. № 20 (415). С. 10–12.

21. Ващурич А.С., Чегуров М.К., Нужида Т.В. Оценка влияния температуры на прочность конструкционных материалов // Сталь. 2015. № 6. С. 68–70.

22. Bayatanova L., Rakhadilov B., Kurbanbekov S., Skakov D., Popova N. Fine structure of low-carbon steel after electrolytic plasma treatment // Materials Testing. 2021. Vol. 63. Issue 9. Pp. 842–847. DOI: 10.1515/mt-2020-0119

23. Zhang H.-L., Ma T.-F., Gao L.-X., Zhang D.-Q., Wei G.-A., Yan H.-B. et al. Vapor phase assembly of urea-amine compounds and their protection against the atmospheric corrosion of carbon steel // Journal of Coatings Technology and Research. 2020. Vol. 17. Issue 2. Pp. 503–515. DOI: 10.1007/s11998-019-00301-7

24. Мазура А.Н., Гевлич С.О., Пегишева С.А. Изменение исходной структуры котловой стали в процессе длительной эксплуатации // Технические науки — от теории к практике. 2012. № 8. С. 91–95.

25. Фейтуллаев А.Ю., Мазура В.Н., Петрова В.Ф., Гевлич С.О. Влияние длительной эксплуатации на структуру и свойства низкоуглеродистых и кремнемарганцевых сталей // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. № 23 (150). С. 103–105.

26. Нархов А.В., Клытин Б.А., Рей А., Пал С.К. Влияние неметаллических включений на механи-

ческие свойства сталей // Обзорная информация. Серия: Металловедение и термическая обработка. 1992. 22 с.

27. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде. М. ; Киев : Машгиз [Южное отделение], 1963. 188 с.

28. Kiessling R., Lange N. Non-metallic inclusions in steel. 2nd ed. Part 1–4. London : Metals Society, 1978. 465 p.

29. Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В. Неметаллические включения в стали. Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2005. 536 с.

30. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Оленко А.П. Неметаллические включения и свойства стали. М. : Металлургия, 1980. 175 с.

31. Явойский В.И., Близиюков С.А., Вишкарев А.Ф., Горохов Л.С. Включения и газы в сталях. М. : Металлургия, 1979. 272 с.

32. Кириличев М.В., Зюбан Н.А., Руцкий Д.В., Гаманюк С.Б. Влияние загрязненности стали неметаллическими включениями на уровень механических свойств металла // XV Междунар. конгресс сталеплавателей : сб. тр. к 100-летию Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и 380-летию российской металлургии. 2018. С. 574–579.

33. Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Чубуков М.Ю., Усков Д.П., Петрова В.Ф., Кириличев М.В. Влияние неметаллических включений на свойства труб из сталей категории прочности К48-К52 // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2019. № 7 (230). С. 13–19.

34. Вольберг Ю.Л., Наханетян Х.А., Одесский П.Д. Изменение прочности строительных сталей в агрессивных средах промышленных зданий // Промышленное строительство. 1976. № 10. С. 39–42.

35. Коряков А.С. Несущая способность стальных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах цехов цветной металлургии : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1985. 20 с.

36. Филиппов В.В., Бережнов К.П. Оценка долговечности металлических конструкций производственных зданий с учетом деградации механических свойств сталей из-за коррозии // Наука и образование. 2016. № 4 (84). С. 83–88.

Поступила в редакцию 27 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 5 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Майрбек Мусаевич Шахабов — адъюнкт; Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Академия ГПС МЧС России); 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4; РИНЦ ID: 1121498, ORCID: 0000-0001-8299-8780; shahmayrbek95_95@mail.ru;

Андрей Борисович Сивенков — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты; Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Академия ГПС МЧС России); 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4; РИНЦ ID: 434522, ResearcherID: R-5518-2017, ORCID: 0000-0003-3821-8606; sivenkov01@mail.ru;

Дмитрий Александрович Корольченко — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; da-vip@mail.ru.

Вклад авторов:

Шахабов М.М. — концепция исследования, проведение анализа работ в области изучения процесса старения металлов, поиск образцов для исследования, участие в проведении испытаний и апробация полученных результатов, формирование выводов.

Сивенков А.Б. — научное руководство, концепция исследования, участие в испытаниях и апробация полученных результатов, формирование выводов.

Корольченко Д.А. — научное руководство, участие в испытаниях по оценке влияния длительного срока эксплуатации на механические характеристики стального образца, апробация полученных результатов, формирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Demina U.A. Degradation of fatigue characteristics of steel as a result of long-term aging. *Physico-chemistry and technology of inorganic materials : collected works. VIII Russian annual conference of young researchers and graduate students*. 2011; 57-59. (rus.).
2. Motochnaya T.V. Estimate of quality of steels of a ferrite-perlitic class on structural components after long-lived maintenance. *Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*. 2003; 5:54-56. (rus.).
3. Polonsky Y.A. Fracture micromechanics of X23N18 steel after long-term operation. *Bulletin of Russian Universities. Mathematics*. 2010; 15(3): 976-977. (rus.).
4. Farber V.M., Selivanova O.V., Hotinov V.A., Polukhina O.N. *Strain aging in steels : textbook*. Ekaterinburg, Urals University Press, 2018; 72. (rus.).
5. Ratkin V.V. Influence of chloride-containing medium on the mechanical characteristics of concrete. *Actual problems of mechanics in modern construction : collection of scientific papers of the III International Scientific and Technical Conference*. 2014; 121-127. (rus.).
6. Chen J. Study on the joint mechanical properties of steel structure buildings. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*. 2021; 39(4): 655-665. DOI: 10.1108/ijbpa-07-2020-0055
7. Liao F., Zhang K., Wang W., Chen Y., Tang S., Xue X. et al. Fracture analysis of high-strength steel beam-column connections with initial defects. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022; 194:107301. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107301
8. Huang X., Yuan Y., Zhao J., Wei C. Comparative study on ultra-low-cycle-fatigue behavior of Q235 normal-steel and Q690 high-strength steel. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022; 194:107308. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107308
9. Wang W., Liu B., Kodur V. Effect of temperature on strength and elastic modulus of high-strength steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013; 25(2):174-182. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000600
10. Buzalo N., Gontarenko I. Experimental investigation the stress-deformed state eccentrically compressed racks with damages. *Internet Journal of Science*. 2014; 1(20):56. (rus.).
11. Raschupkin V.P., Korytov M.S. *Steel Production. Methods of melting : textbook*. Omsk, Publishing House of SSARU, 2007; 39. (rus.).
12. Komarov O.N., Zhilin S.G., Predein V.V., Abashkin E.E., Popov A.V. Technology of blanks production from rimming steel for rolling. *The Future of Mechanical Engineering in Russia : the ninth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists*. 2016; 189-191. (rus.).
13. Khayatazad M., De Pue L., De Waele W. Detection of corrosion on steel structures using automated image processing. *Developments in the Built Environment*. 2020; 3:100022. DOI: 10.1016/j.dibe.2020.100022
14. Vasilchenko A., Doronin E., Ivanov B., Konoval V. Effect of residual deformation of a steel column on its fire resistance under combined exposure "Explosion-Fire". *Materials Science Forum*. 2019; 968:288-293. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.968.288

15. Zhou J.H., Shen Y.F., Xue W.Y., Jia N., Misra R.D.K. Improving strength and ductility of low activation martensitic (LAM) steel by alloying with titanium and tempering. *Materials Science and Engineering: A*. 2021; 799:140152. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140152
16. Glinka N.L. *General chemistry : textbook for universities*. Moscow, Integral-Press, 2000; 728. (rus.).
17. Kryuchkov O.B., Mironov I.A., Sedov E.V., Bondarev O.P. Utilization of wastes coloured metallurgies became for affinage. *Izvestia Volgograd State Technical University*. 2017; 6(201):131-134. (rus.).
18. Dolzhenko P., Tikhonova M., Kaibyshev R., Belyakov A. Dynamically recrystallized microstructures, textures, and tensile properties of a hot worked high-Mn steel. *Metals*. 2019; 9(1):30. DOI: 10.3390/met9010030
19. Wang Q., Zhang Q., Luo L., Yan T., Liu J., Ding L. et al. Effects of high-temperature treatment and iron reduction index on tensile strength of basalt continuous fiber. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021; 564:120836. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2021.120836
20. Askarova G.G. Microstructural study of construction steel. *Young Scientist*. 2022; 20(415): 10-12. (rus.).
21. Vashurin A.S.S., Chegurov M.K., Nuzhdina T.V. Evaluation of the effect of temperature on the strength of structural materials. *Steel*. 2015; 6: 68-70. (rus.).
22. Bayatanova L., Rakhadilov B., Kurbanbekov S., Skakov D., Popova N. Fine structure of low-carbon steel after electrolytic plasma treatment. *Materials Testing*. 2021; 63(9):842-847. DOI: 10.1515/mt-2020-0119
23. Zhang H.-L., Ma T.-F., Gao L.-X., Zhang D.-Q., Wei G.-A., Yan H.-B. et al. Vapor phase assembly of urea-amine compounds and their protection against the atmospheric corrosion of carbon steel. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2020; 17(2): 503-515. DOI: 10.1007/s11998-019-00301-7
24. Mazura A.N., Gevlich S.O., Pegisheva S.A. Change in the initial structure of boiler steel during long-term operation. *Technical sciences — from theory to practice*. 2012; 8:91-95. (rus.).
25. Feytullaev A.Y., Mazura V.N., Petrova V.F., Gevlich S.O. The influence of long-term operation on the structure and properties of low carbon and silicon-manganese steels. *Izvestia Volgograd State Technical University*. 2014; 23(150):103-105. (rus.).
26. Narkhov A.V., Klypin B.A., Ray A., Pal S.K. The influence of non-metallic inclusions on the mechanical properties of steels. *Review Series: Metallurgy and Heat Treatment*. 1992; 22. (rus.).
27. Karpenko G.V. *Strength of Steel in Corrosive Medium*. Moscow; Kiev, Mashgiz [Southern Branch], 1963; 188. (rus.).
28. Kiessling R., Lange N. *Non-metallic inclusions in steel. 2nd ed. Part 1–4*. London, Metals Society, 1978; 465.
29. Gubenko S.I., Parusov V.V., Derevyanchenko I.V. *Nonmetallic inclusions in steel*. Dnepropetrovsk, ART-PRESS Publ., 2005; 536. (rus.).
30. Yavoysky V.I., Rubenchik Yu.I., Okenko A.P. *Nonmetallic inclusions and steel properties*. Moscow, Metallurgy Publ., 1980; 176. (rus.).
31. Yavoysky V.I., Bliznyukov S.A., Vishkarev A.F., Gorokhov L.S. *Inclusions and gases in steels*. Moscow, Metallurgy Publ., 1979; 272. (rus.).
32. Kirilichev M.V., Zyuban N.A., Rutskiy D.V., Gamanyuk S.B. Influence of steel contamination by non-metallic inclusions on the level of mechanical properties of the metal. *XV International Congress of Steelworkers : proceedings, to the 100th anniversary of National University of Science and Technology "MISIS" and 380th anniversary of Russian metallurgy*. 2018; 574-579. (rus.).
33. Rutskii D.V., Zyuban N.A., Chubukov M.Yu., Uskov D.P., Petrova V.F., Kirilichev M.V. Influence of non metallic inclusions on the properties pipes from steels of the K48-K52 strength category. *Izvestia Volgograd State Technical University*. 2019; 7(230): 13-19. (rus.).
34. Volberg Y.L., Nakhapetyan H.A., Odesky P.D. Change in the strength of building steels in aggressive environments of industrial buildings. *Industrial Building*. 1976; 10:39-42. (rus.).
35. Koryakov A.S. *Bearing Capacity of Steel Structures Exploited in Aggressive Environments of Non-Ferrous Metallurgy Shops : Abstract of Ph. Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 1985; 20. (rus.).
36. Filippov V.V., Berezhnov K.P. Assessment of durability of metal constructions of industrial buildings with taking into account corrosion-related degradation of mechanical properties of steel. *Science and Education*. 2016; 4(84):83-88. (rus.).

Received February 27, 2023.

Adopted in revised form on April 5, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

BIONOTES: Mayrbek M. Shakhobov — adjunct; The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters; 4 Borisa Galushkina st., Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 1121498, ORCID: 0000-0001-8299-8780; shahmayrbek95_95@mail.ru;

Andrey B. Sivenkov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor in the Department of Fire Safety in Construction as part of the Training and Research Complex for Fire Safety of Protection Facilities; **The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters**; 4 Borisa Galushkina st., Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 434522, ResearcherID: R-5518-2017, ORCID: 0000-0003-3821-8606; sivenkov01@mail.ru;

Dmitriy A. Korolchenko — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Integrated Building and Construction Safety; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067, Scopus: 55946060600, ResearcherID: E-1862-2017, ORCID: 0000-0002-2361-6428; da-vip@mail.ru.

Contribution of the authors:

Mayrbek M. Shakhobov — research concept, analysis of works in the field of studying the aging process of metals, search for samples for research, participation in testing and approbation of the results obtained, drawing conclusions.

Andrey B. Sivenkov — scientific guidance, research concept, participation in trials and approbation of the results obtained, formation of conclusions.

Dmitriy A. Korolchenko — scientific guidance, participation in tests to assess the impact of a long service life on the mechanical characteristics of a steel sample, approbation of the results obtained, formation of conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 625.72:528.481

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.880-888

Комплексный подход к определению устойчивого равновесного состояния оползня

Владимир Викторович Симонян¹, Алексей Архипович Кочиев²,
Виктор Иванович Волков³

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

² Государственный университет по землеустройству (ГУЗ); г. Москва, Россия;

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются условия определения устойчивого равновесия оползня для любых поверхностей скольжения, плотности, массы, объема и крутизны склона. Приведены уравнения равновесия оползня в координатах. Для этого создаются опорная и деформационная сети на оползневом склоне. Количество пунктов деформационной сети назначается в соответствии с необходимой и достаточной точностью уравнений равновесия. Предмет исследования — математическая модель оползня, созданная по результатам геодезических наблюдений и инженерно-геологических изысканий. Цель исследования — определить возможное состояние оползня на момент проведения наблюдений. На современном этапе выявление условий устойчивости оползня является важной научно-практической задачей.

Материалы и методы. Предлагается применить комплексный подход, в основу которого положено совместное применение метода геодезического мониторинга деформационных процессов с инженерно-геологическими исследованиями. Для проведения геодезического мониторинга создаются оползневая и деформационная геодезические сети, которые закрепляются на местности геодезическими знаками соответственно на оползневом склоне вне зоны влияния оползневых процессов и на самом теле оползня. Одновременно для получения объективной информации о физико-механических характеристиках грунтов выполняются инженерно-геологические исследования. Приведены уравнения равновесия тела оползня в прямоугольных координатах, определяемых в процессе геодезического мониторинга, через уравнение поверхности в общем виде и через вектор силы сцепления.

Результаты. На основе результатов геодезического мониторинга и инженерно-геологических исследований получены формулы определения устойчивого равновесия оползня для любых поверхностей скольжения, плотности, массы, объема и крутизны склона для их практического использования и дальнейшего прогнозирования возможных оползневых смещений.

Выводы. Комплексный подход дает возможность практически вплотную подойти к вопросам определения устойчивого равновесия оползней, поскольку позволяет установить наиболее реальные значения параметров, входящих в формулы, которые, в свою очередь, будут зависеть от количества пунктов деформационной сети и скважин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оползень, поверхность скольжения, сила сцепления, сила трения, вес, размеры, геодезическая сеть, координаты пунктов, уравнения устойчивого равновесия

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Симонян В.В., Кочиев А.А., Волков В.И. Комплексный подход к определению устойчивого равновесного состояния оползня // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 880–888. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.880-888

Автор, ответственный за переписку: Владимир Викторович Симонян, simonyan.vladimir55@gmail.com.

Integrated approach to determining the stable equilibrium state of a landslide

Vladimir V. Simonyan¹, Alexey A. Kochiev², Victor I. Volkov³

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

² State University of Land Use Planning; Moscow, Russian Federation;

³ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The conditions for determining the stable equilibrium of a landslide for any sliding surfaces, density, mass, volume and slope steepness are considered. The equilibrium equations for a landslide are given in rectangular coordinates. For this purpose, reference and deformation networks are created on the landslide slope. Depending on the size of the landslide body, the support network is designed in the form of a polygonometric course, the geometric parameters of which satisfy the accuracy characteristics of the course and the conditions of the work area. And based on the accuracy of the equilibrium equations, the required number of points of the deformation network is determined. The subject of the study is a mathematical model of a landslide created on the basis of geodetic observations and engineering-geological studies. The purpose of the study is to determine the possible condition of the landslide at the time of the observation. At the present stage, determining the conditions for the stability of a landslide is an important scientific and practical task, the relevance of which is beyond doubt.

Materials and methods. It is proposed to use an integrated approach, which is based on the joint application of the method of geodetic monitoring of deformation processes with engineering and geological studies. For geodetic monitoring, landslide and deformation geodetic networks are created, which are fixed on the terrain by geodetic signs, respectively, outside the zone of influence of landslide processes and directly on the landslide slope. At the same time, engineering and geological studies are carried out to obtain objective information on the physical and mechanical properties of soils. The article presents the equilibrium equations of the landslide body in rectangular coordinates determined in the process of geodetic monitoring, through the equation of the surface in general form and through the vector of the adhesion force.

Results. On the basis of the results of geodetic monitoring and engineering-geological studies, formulas were obtained for determining the stable equilibrium of a landslide for any sliding surfaces, density, mass, volume and slope steepness for their practical use and further prediction of possible landslide dislocations.

Conclusions. The formulas obtained make it possible to determine the stable equilibrium of a landslide based on geodetic and geological data. How exactly do these formulas allow us to determine the stable equilibrium of a landslide? This question remains open and requires further investigation by methods of error theory. The question is very important, since the definition of the landslide hazard assessment depends on it. If the landslide slope is built up, then the determination of the assessment of landslide vulnerability. Then it is possible to obtain a reasonable assessment of the risk and level of landslide safety of the frozen landslide slopes. These assessments are very important and can be further used in organizing the development of urban planning solutions, as well as in assessing the life cycle of intelligent sustainable cities.

KEYWORDS: landslide, sliding surface, adhesion force, friction force, weight, dimensions, geodetic network, coordinates of points, stable equilibrium equations

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the reviewers.

FOR CITATION: Simonyan V.V., Kochiev A.A., Volkov V.I. Integrated approach to determining the stable equilibrium state of a landslide. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):880-888. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.880-888 (rus.).

Corresponding author: Vladimir V. Simonyan, simonyan.vladimir55@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время опубликован ряд статей, в которых рассматриваются вопросы определения равновесного состояния оползней и возможные методы выявления нарушения их устойчивости. В работе [1] исследуются условия образования нового оползневого блока, его перехода в режим смещения, механизм взаимодействия блока с коренным массивом и телом оползня, состоящим из ранее сместившихся блоков; дается обоснование изменения прочности грунтов в процессе смещения и ее значение в завершении оползневого цикла; сопоставлены результаты теоретических и экспериментальных исследований. Автор выделяет четыре типа механизма формирования оползней. Второй тип механизма — сдвиг одной части массива относительно другой. Он формируется при нарушении равновесия, когда вдоль наклонной поверхности в массиве происходит концентрация касательных напряжений. Эти поверхности совпадают с зонами ослабления в массиве по контакту с более прочными породами, по плоскостям напластования. Развиваются в таких условиях оползни скольжения. Обосновывается положение о том, что «движение» оползня подчиняется закону турбулентности [2]. Разрабатывается алгоритм

оптимального выбора рационального укрепления склона в оползневых условиях строительства с использованием методов численного моделирования для расчета устойчивости [3]. Представлены результаты оценки устойчивости склона карьера в проекте Medapalli opencast project (MOCP) компании Singareni Collieries Company Ltd. (SCCL) [4]. В этой шахте высокий забой контролировался визуально и с помощью приборов. Тенденция смещения, полученная в результате мониторинга склона, представляет собой деформации, происходящие в пределах склона карьера. Основные входные параметры прочности на сдвиг, необходимые для численных моделей, определены в лаборатории. Склон карьера, рассмотренный при численном моделировании, имел высоту 170 м и крутизну 45°. Давление воды снижает устойчивость откоса карьера за счет уменьшения прочности на сдвиг. В результате мониторинга склона замечено, что трещины развились и расширились на 90 см непосредственно перед его разрушением. Из численного анализа установлено, что разрушение склона происходит в ненапряженном состоянии на расстоянии около 10 м от гребня котлована до глубины 20 м. Затем склон был стабилизирован путем обеспечения надлежащей дренажной системы, и после стабилизации начаты работы в шахте.

В работе [5] кратко рассматривается ход использования качественных и количественных методов оценки риска возникновения оползней. Особое внимание уделяется использованию матричного подхода «опасность – последствия». Однако традиционные детерминированные методы геотехнического анализа должны быть дополнены исследованиями в вероятностной структуре, которая учитывает изменчивость параметров и другие неопределенности. Анализ устойчивости склонов, основанный на моделировании Монте-Карло (MCSM), учитывает пространственную изменчивость входных переменных, статистическую неопределенность из-за ограниченных данных и смещения в используемых эмпирических факторах и корреляциях [6]. Методология проиллюстрирована вероятностным анализом устойчивости склона при проектировании гидроэлектростанции в заливе Джеймс. В статье [7] анализируется устойчивость склона вдоль участка дороги (Национальное шоссе 5 — National Highway (NH)) вблизи района Лухри, штат Химачал-Прадеш, Индия. Район расположен в зоне высокого риска из-за высокой загруженности дорог, и поэтому анализ устойчивости проводился с применением метода конечных элементов (МКЭ) и метода предельного равновесия (МПР) для получения деформационных характеристик в статических условиях и их сравнения. Результаты обоих методов помогают в выявлении зон уязвимости в тематическом исследовании. Кроме того, значения коэффициента безопасности, полученные с помощью обоих методов, находятся в близком приближении. Исследование также показывает, что склон критически стабилен, предложена корректирующая мера посредством изменения геометрии склона, которая нуждается в надлежащей защите от любых внешних факторов, таких как осадки и землетрясения, которые могут вызвать смещение оползня. Результаты, полученные по двум оползневым склонам: один представляет собой однородный склон, другой — неоднородный слоистый склон, сравниваются с использованием четырех признанных методов устойчивости склона: обычный метод срезов, упрощенный метод Бишопа, упрощенный метод Джанбу и метод Спенсера [8]. Исследование продемонстрировало, что индекс надежности β не зависит от генератора случайных чисел, а размер выборки 700 или более является хорошим выбором для MCSM. В случае однородного склона наблюдается хорошее согласие между рассчитанным индексом надежности β при использовании FOSM (First Order Second Moment — метод второго момента первого порядка) и MCSM как для обычного метода срезов, так и для метода Бишопа. Тем не менее небольшая разница в β наблюдается между двумя методами неопределенности независимо от того, применяется ли метод Джанбу или метод Спенсера. В случае слоистого склона достигается хорошее согласие между двумя методами неопре-

деленности для методов обычного метода срезов, Бишопа и Джанбу. Сравнительный анализ устойчивости склона на основе МПР и МКЭ проводят при двух углах наклона 45 и 60° [9]. Выполнено сравнительное исследование параметров устойчивости. Установлено, что МПР дает более высокие значения коэффициента устойчивости по сравнению с МКЭ. Для оценки подверженности склонов к оползневым процессам [10] исследуемый район в центральной Словении был разделен на 78 365 частей, для которых рассчитаны 24 статистические переменные. С помощью многофакторного анализа проверены взаимодействия между факторами и распределением оползней, определена важность отдельных показателей для возникновения оползней. Результаты показывают, что склон, литология, шероховатость местности и тип покрова играют важную роль в восприимчивости к оползням. Для определения оползневого риска на участке трассы Лазаревское – Киров рассмотрен подход на основе методики наименьших потерь [11]. Предлагается осуществить комплекс организационно-технических мер по стабилизации этих опасных процессов и приведению оползней в равновесное состояние [12]. В статье [13] рассматриваются оползневые склоны Гималаев, которые являются одним из самых уязвимых регионов Индии из-за стихийных бедствий. Различные виды оползней часто происходят в тектонически и геодинамически активной области Гималаев. Проведен анализ устойчивости склонов вдоль дороги — примерно 20 км NH 109 от Рудрапраяга до Агазмунни в штате Уттаракханд. На основе полевых наблюдений и вариаций геологических и геотехнических условий выбраны пять мест для детального изучения, включая лабораторное исследование и численный анализ. Это обеспечило более глубокое понимание данного вопроса. Результаты анализа, выполненного с использованием обоих методов, помогли выявить потенциально уязвимые оползневые склоны и позволили сравнить два метода.

Анализ литературы показал, что определение равновесного состояния оползней и возможные методы выявления нарушения их устойчивости изучены не полностью. На современном этапе установление условий устойчивости оползня является важной научно-практической задачей.

Цель исследования — определить возможное состояние оползня на момент проведения наблюдений. Предмет исследования — математическая модель оползня, созданная на основе комплексного подхода по результатам геодезических наблюдений и инженерно-геологических исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Из теоретической механики известно, что для равновесия твердого тела при $t_0 \leq t \leq t_1$ необходимо и достаточно, чтобы в момент времени t_0 тело

покоилось, а главный вектор $R^{(e)}$ и главный момент внешних сил $M_O^{(e)}$ относительно произвольно выбранного полюса O при $t_0 \leq t \leq t_1$ равнялись нулю, т.е. $R^{(e)} = 0$ и $M_O^{(e)} = 0$ [14].

В ранее выполненных исследованиях [15–17] дано описание оползня в виде механико-математической модели с одинаковой однородной массой тела оползня. Различие состоит в формах поверхности скольжения: в одном случае она представляет собой параболическую кривую [15], в другом — цилиндрическую поверхность, являющуюся кривой произвольного вида $y = f(x)$ [16, 17], в виде формул, а именно:

• уравнения равновесия тела оползня в самом общем случае имеют вид:

$$\begin{cases} \bar{R} = 0, \\ \bar{M}_O = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где \bar{R} — главный вектор внешних сил, вычисляемый по формуле:

$$\bar{R} = \iint_S (\bar{G} + \bar{F}_\tau + \bar{N}) dS, \quad (2)$$

\bar{M}_O — главный момент внешних сил относительно начала координат, вычисляемый по формуле:

$$\bar{M}_O = \iint_S [\bar{r}_m \cdot (\bar{F}_\tau + \bar{N}) + \bar{r}_O \cdot \bar{G}] dS, \quad (3)$$

где M — произвольная точка оползня; $\bar{r} = \overline{OM}$ — радиус-вектор точки M ; $\bar{F}_\tau(X_i, Y_i, Z_i)$ — вектор силы сцепления (трения) в расчете на единицу площади поверхности скольжения оползня, направленный по касательной к поверхности скольжения; $\bar{N}(X_i, Y_i, Z_i)$ — вектор нормальной силы трения в расчете на единицу площади поверхности скольжения, направленный по нормали к поверхности скольжения. Силы \bar{F}_τ и \bar{N} приложены в точке M ; $C(X_0, Y_0, Z_0)$ — центр тяжести тела оползня;

$\bar{r} = \overline{OC}(X_0, Y_0, Z_0)$ — радиус-вектор центра тяжести оползня; \bar{G} — вес тела оползня.

В формулах (2) и (3) интегрирование идет по общей поверхности S тела оползня [15].

Также известно, что «если (F_1, F_2, \dots, F_k) — система внешних сил, приложенных к твердому телу, а x_i, y_i, z_i — координаты точек приложения силы $F_i (i = 1, 2, \dots, k)$ в декартовой прямоугольной системе координат с началом в полюсе O , то необходимые и достаточные условия равновесия твердого тела (1) запишутся в виде следующих шести равенств» [14]:

$$\sum_{i=1}^k F_{ix} = 0, \quad \sum_{i=1}^k F_{iy} = 0, \quad \sum_{i=1}^k F_{iz} = 0; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k (y_i F_{iz} - z_i F_{iy}) &= 0, \\ \sum_{i=1}^k (z_i F_{ix} - x_i F_{iz}) &= 0, \\ \sum_{i=1}^k (x_i F_{iy} - y_i F_{ix}) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда применительно к оползням уравнения равновесия (4) и (5) в прямоугольных декартовых координатах будут:

$$\begin{cases} R_x = 0, \\ R_y = 0, \\ R_z = 0, \\ \bar{M}_{Ox} = 0, \\ \bar{M}_{Oy} = 0, \\ \bar{M}_{Oz} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Согласно выражению (6) устойчивость оползня определяется значением сил \bar{F}_τ и \bar{N} , массой тела

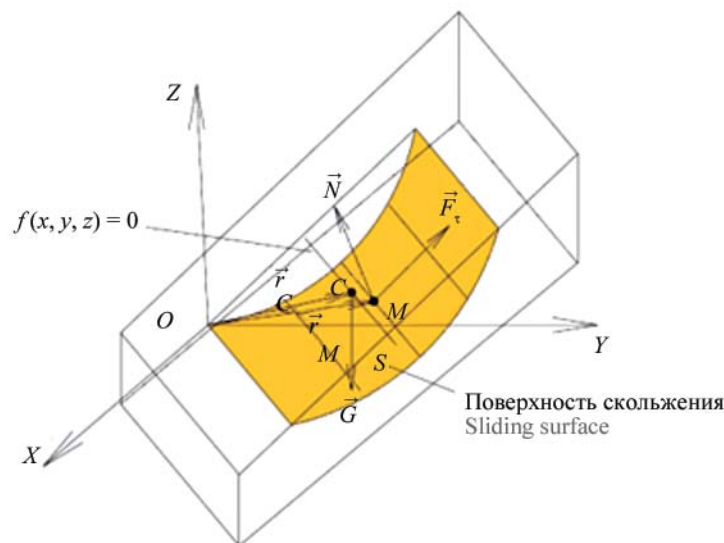


Рис. 1. Прямоугольная декартова система координат с началом в вершине поверхности оползня

Fig. 1. Rectangular Cartesian coordinate system with origin at the vertex of the landslide surface

оползня, расположением его центра тяжести, размерами оползня, видом функции $f(x, y, z)$, формой поверхности скольжения S (рис. 1) [15].

Разработанные формулы при наличии сведений о расположении центра тяжести, горизонтального размера, массы тела оползня и вектора силы сцепления позволяют оценить устойчивость оползня, имеющего наиболее близкую к реальности параболическую форму поверхности скольжения. При этом следует отметить, что на практике полученные формулы использовать затруднительно, так как установить реальные значения горизонтального размера, массы тела оползня и сведений о расположении его центра тяжести, также как и данных о векторе силы сцепления, достаточно сложно. В связи с этим решение задачи по оценке равновесного состояния оползня предлагается осуществлять с позиций комплексного подхода, позволяющего перевести теоретические формулы в эмпирические. Эмпирические формулы устраняют затруднения по установлению сведений о том, находится ли оползень в состоянии равновесия или нет [15].

Для решения задачи выбрана стандартная прямоугольная система координат Гаусса – Крюгера $O(X, Y, H)$, применяемая в геодезии, с началом в вершине, расположенной на дневной поверхности оползня (рис. 2).

На рис. 2 показано:

- 1) начальное положение O оползня;
- 2) $M(X_p, Y_p, H_p)$ — один из пунктов деформационной сети на поверхности оползня;
- 3) $\vec{r} = \overrightarrow{OM}(X_p, Y_p, H_p)$ — радиус-вектор пункта M ;
- 4) $\vec{F}_\tau(X_p, Y_p, H_p)$ — вектор силы сцепления, который направлен по касательной к поверхности скольжения;

5) $\vec{N}(X_p, Y_p, H_p)$ — вектор нормальной силы трения, который направлен по нормали к поверхности скольжения;

6) $C(X_0, Y_0, H_0)$ — центр тяжести тела оползня;

7) $\vec{r} = \overrightarrow{OC}(X_0, Y_0, H_0)$ — радиус-вектор центра тяжести оползня;

8) \vec{G} — вектор силы тяжести оползня, направленный отвесно.

Для численного определения уравнения поверхности оползня, включая поверхность скольжения в выбранной системе координат, определяем координаты X, Y и H пунктов деформационной сети, находящихся на дневной поверхности оползня, используя современные электронные тахеометры.

Соответствующие значения координат пунктов деформационной сети представлены в виде таблицы.

Значения координат пунктов деформационной сети

Values of coordinates of points of the deformation network

Номер пунктов Point number	X	Y	H
1	X_1	Y_1	H_1
2	X_2	Y_2	H_2
...
n	X_n	Y_n	H_n

Заметим:

1. Длина и направление вектора силы сцепления $\vec{F}_\tau(X_p, Y_p, H_p)$ в плоскости касательной поверхности скольжения в точке $M(X_p, Y_p, H_p)$ не определены и могут быть произвольными. В проекциях на оси координат он будет $\vec{F}_{\tau M(X_p, Y_p, H_p)}(\vec{F}_{\tau X_i}, \vec{F}_{\tau Y_i}, \vec{F}_{\tau H_i})$.

2. Вектор нормальной силы трения $\vec{N}(X_p, Y_p, H_p)$ в плоскости касательной поверхности скольжения

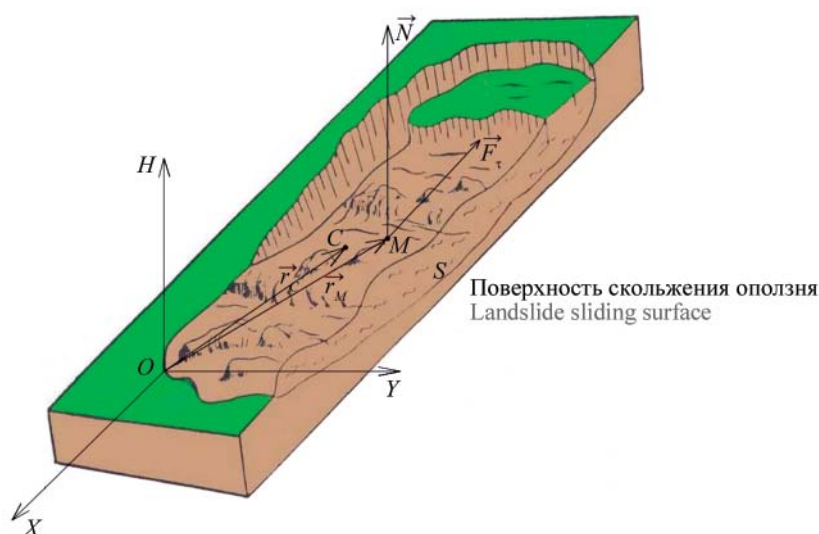


Рис. 2. Описание оползня в прямоугольной системе координат Гаусса – Крюгера

Fig. 2. Description of the landslide in the rectangular Gauss – Kruger coordinate system

в точке $M(X_i, Y_i, H_i)$ не определен и может быть произвольным. В проекциях на оси координат он будет $\bar{N}_{M(X_i, Y_i, H_i)}(\bar{N}_{X_i}, \bar{N}_{Y_i}, \bar{N}_{H_i})$.

В общем случае система уравнений равновесия тела оползня имеет вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [\bar{F}_\tau(X_i, Y_i, H_i) + \bar{N}(X_i, Y_i, H_i)] + \bar{G} = 0, \\ \sum_{i=1}^n [\bar{r}_i \cdot (\bar{F}_\tau(X_i, Y_i, H_i) + \bar{N}(X_i, Y_i, H_i))] + \bar{r}_0 \cdot \bar{G} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Первое уравнение системы (7) выражает тот факт, что главный вектор внешних сил равен нулю. Второе уравнение системы (7) отражает факт, что главный момент внешних сил относительно начала координат равен нулю.

В прямоугольных координатах система уравнений (7) будет следующей:

1. Проекция главного вектора внешних сил на оси координат равны нулю:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [\bar{F}_{\tau X}(X_i, Y_i, H_i) + \bar{N}_X(X_i, Y_i, H_i)] = 0, \\ \sum_{i=1}^n [\bar{F}_{\tau Y}(X_i, Y_i, H_i) + \bar{N}_Y(X_i, Y_i, H_i)] = 0, \\ \sum_{i=1}^n [\bar{F}_{\tau H}(X_i, Y_i, H_i) + \bar{N}_H(X_i, Y_i, H_i)] - G = 0. \end{cases} \quad (8)$$

2. Проекция главного момента внешних сил на оси координат равны нулю:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \left[\frac{Y_i}{\bar{F}_{\tau Y_i} + \bar{N}_{Y_i}} \frac{H_i}{\bar{F}_{\tau H_i} + \bar{N}_{H_i}} \right] + Y_0 G = 0, \\ \sum_{i=1}^n \left[\frac{H_i}{\bar{F}_{\tau H_i} + \bar{N}_{H_i}} \frac{X_i}{\bar{F}_{\tau X_i} + \bar{N}_{X_i}} \right] - X_0 G = 0, \\ \sum_{i=1}^n \left[\frac{X_i}{\bar{F}_{\tau X_i} + \bar{N}_{X_i}} \frac{Y_i}{\bar{F}_{\tau Y_i} + \bar{N}_{Y_i}} \right] = 0. \end{cases} \quad (9)$$

В уравнениях (8) и (9) суммирование осуществляется по всей поверхности S тела оползня (по дневной поверхности и по поверхности скольжения).

Системы уравнений (8) и (9) в частном случае включают в себя ранее рассмотренные в работе [16] модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные уравнения равновесия в координатах (6) и (7) показывают, что устойчивость оползня зависит от значений:

- сил сцепления \bar{F}_τ и трения \bar{N} ;
- веса тела оползня G ;
- расположения его центра тяжести $C(X_0, Y_0, H_0)$;
- размеров оползня;
- количества пунктов деформационной сети, приближенно описывающих форму дневной по-

верхности оползня и количества скважин, приближенно описывающих форму поверхности скольжения S (чем больше пунктов деформационной сети и скважин, тем точнее будут описаны эти поверхности).

Для получения объема оползневого тела необходимо знать поверхность скольжения оползня. Возможные методы определения поверхности скольжения оползня и предъявляемые к ним точностные требования проанализированы в работе [18]. Тогда в соответствии с геометрией, указанной в труде [18] сети, общий объем оползневого тела будет равен сумме частных объемов прямоугольных фигур сети:

$$V_{\text{оп}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n, \quad (10)$$

где $V_{\text{оп}}$ — объем оползневого тела; V_i — объемы отдельных фигур оползневой сети, равные:

$$V_i = abH_{\text{cp}} = ab \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4}, \quad (11)$$

где a и b — стороны квадрата (прямоугольника) сети; H_i — высоты поверхности скольжения оползня.

Вес тела оползня \bar{G} , направленного вертикально вниз (в силу гравитации) и приложенного в центре тяжести оползня, можно получить как сумму произведений объемов отдельных фигур оползневой сети V_i на соответствующую плотность грунта ρ_i :

$$G = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i. \quad (12)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный подход, объединяющий инженерно-геологическую и геодезическую информацию, дает возможность практически вплотную подойти к вопросам определения устойчивого равновесия оползней, поскольку позволяет установить наиболее реальные значения параметров, входящих в формулы, составляющие сущность описанного в статье подхода, которые, в свою очередь, будут зависеть от количества пунктов деформационной сети и скважин. Как точно эти формулы позволяют определять устойчивое равновесие оползня? Этот вопрос остается открытым и требует дальнейшего исследования методами теории погрешностей и проведения инженерных изысканий на конкретном экспериментальном склоне. Апробация и верификация представленной методики является важнейшим этапом ее внедрения в практику исследований. Реализация экспериментальной части запланирована авторами в этом году. Вопрос очень важный, так как от этого зависит определение оценки оползневой опасности. В случае, если оползневой склон застроен, то требуется и выявление оценки оползневой уязвимости. Тогда представляется возможность получения обоснованной оценки риска и уровня оползневой без-

опасности застроенных оползневых склонов [19]. Эти оценки актуальны и могут быть использованы в дальнейшем при организации разработки градо-

строительных решений [20], а также при оценке жизненного цикла интеллектуальных устойчивых городов [21].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Постоев Г.П. Особенности механизма формирования предельного состояния оползнеопасного массива и смещения оползневой блока // Геозкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 2. С. 13–20. DOI: 10.31857/S0869-78092019213-20
2. Ефремов А.В. Механизм поведения оползня перед и в момент потери устойчивости равновесного режима // Строительство и техногенная безопасность. 2014. № 49. С. 70–76.
3. Сольский С.В., Быковская С.А. Оптимизация стабилизации оползнеопасных склонов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 10. С. 1258–1271. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1258-1271
4. Budi S., Sen P., Sinha A.K. Stability evaluation of highwall slope in an opencast coal mine—a case study // Modelling, Measurement and Control C. 2017. Vol. 78. Issue 3. Pp. 253–273. DOI: 10.18280/mmc_c.780301
5. Chowdhury R., Flentje P. Role of slope reliability analysis in landslide risk management // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2003. Vol. 62. Issue 1. Pp. 41–46. DOI: 10.1007/s10064-002-0166-1
6. El-Ramly H., Morgenstern N.R., Cruden D.M. Probabilistic slope stability analysis for practice // Canadian Geotechnical Journal. 2002. Vol. 39. Issue 3. Pp. 665–683. DOI: 10.1139/t02-034
7. Kundu J., Sarkar K., Singh P.K., Singh T.N. Deterministic and probabilistic stability analysis of soil slope — a case study // Journal of the Geological Society of India. 2018. Vol. 91. Issue 4. Pp. 418–424. DOI: 10.1007/s12594-018-0874-1
8. Malkawi A.I.H., Hassan W.F., Abdulla F.A. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability // Structural Safety. 2000. Vol. 22. Issue 2. Pp. 161–187. DOI: 10.1016/S0167-4730(00)00006-0
9. Rawat S., Gupta A.K. Analysis of a nailed soil slope using limit equilibrium and finite element methods // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. 2016. Vol. 2. Issue 4. DOI: 10.1007/s40891-016-0076-0
10. Komac M. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia // Geomorphology. 2006. Vol. 74. Issue 1–4. Pp. 17–28. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.07.005
11. Богомолов А.Н., Плешаков Д.В., Мацуй С.И. Оценка оползневой риска на основе методики наименьших потерь // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. 2007. № 8. С. 22–27.
12. Гудкова Н.К., Оноприенко М.Г. Об активизации опасных геодинамических процессов в результате увеличения техногенной нагрузки при строительстве в Сочинском регионе // Экологический вестник Северного Кавказа. 2011. Т. 7. № 3. С. 37–40.
13. Singh R., Umrao R.K., Singh T.N. Stability evaluation of road-cut slopes in the Lesser Himalaya of Uttarakhand, India: conventional and numerical approaches // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2014. Vol. 73. Issue 3. Pp. 845–857. DOI: 10.1007/s10064-013-0532-1
14. Маркеев А.П. Теоретическая механика : учебник для университетов. М. : ЧеРо, 1999. 572 с.
15. Симонян В.В., Кочиев А.А. Математическая модель устойчивого равновесия оползня // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 10. С. 1292–1298. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1292-1298
16. Симонян В.В., Тамразян А.Г., Кочиев А.А. К разработке модели оползневой процесса с целью оценки его последствий для зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 4. С. 37–40.
17. Хван А.П. Возможная модель оползня // Строительство и техногенная безопасность. 2006. № 15–16. С. 55–56.
18. Кузнецов А.И. Разработка метода определения поверхности скольжения оползня по данным геодезического мониторинга : дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 184 с.
19. Симонян В.В., Волков В.И. Оценка риска застроенных склоновых систем по данным геодезического мониторинга // Геодезия и картография. 2021. Т. 82. № 10. С. 42–51. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-976-10-42-51
20. Сборщиков С.Б., Журавлев П.А. Организация разработки градостроительных решений // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. № 2. С. 6–20. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.1
21. Балалов В.В., Барабанова Т.А. Оценка жизненного цикла интеллектуальных устойчивых городов // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. № 2. С. 72–101. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.6

Поступила в редакцию 28 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 7 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Викторович Симонян** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инженерных изысканий и геоэкологии; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 646817; simonyan.vladimir55@gmail.com;

Алексей Архипович Кочиев — доктор физико-математических наук, профессор; **Государственный университет по землеустройству (ГУЗ)**; 105064, г. Москва, ул. Казакова, д. 15; РИНЦ ID: 802797; kochiev@yandex.ru;

Виктор Иванович Волков — доктор технических наук, профессор; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; РИНЦ ID: 66153; volkov@energaziz.ru.

Вклад авторов:

Симонян В.В. — идея, сбор и обработка материала, написание исходного текста статьи, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Кочиев А.А. — идея, частичное написание исходного текста.

Волков В.И. — доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Postoev G.P. Mechanism specifics of the landslide-hazardous massif limit state formation and landslide block displacement. *Geoekologiya Inzhenernaya Geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*. 2019; 2:13-20. DOI: 10.31857/S0869-78092019213-20 (rus.).
2. Efremov A.V. The mechanism of the landslide behavior before and at the moment of loss of stability of the equilibrium regime. *Construction and Technogenic Safety*. 2014; 49:70-76. (rus.).
3. Solsky S.V., Bykovskaya S.A. Optimizing the landslide-prone slope stabilization. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(10):1258-1271. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1258-1271 (rus.).
4. Budi S., Sen P., Sinha A.K. Stability evaluation of highwall slope in an opencast coal mine—a case study. *Modelling, Measurement and Control C*. 2017; 78(3):253-273. DOI: 10.18280/mmc_c.780301
5. Chowdhury R., Flentje P. Role of slope reliability analysis in landslide risk management. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2003; 62(1):41-46. DOI: 10.1007/s10064-002-0166-1
6. El-Ramly H., Morgenstern N.R., Cruden D.M. Probabilistic slope stability analysis for practice. *Canadian Geotechnical Journal*. 2002; 39(3):665-683. DOI: 10.1139/t02-034
7. Kundu J., Sarkar K., Singh P.K., Singh T.N. Deterministic and probabilistic stability analysis of soil slope — a case study. *Journal of the Geological Society of India*. 2018; 91(4):418-424. DOI: 10.1007/s12594-018-0874-1
8. Malkawi A.I.H., Hassan W.F., Abdulla F.A. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability. *Structural Safety*. 2000; 22(2):161-187. DOI: 10.1016/S0167-4730(00)00006-0
9. Rawat S., Gupta A.K. Analysis of a nailed soil slope using limit equilibrium and finite element methods. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2016; 2(4). DOI: 10.1007/s40891-016-0076-0
10. Komac M. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perial-pine Slovenia. *Geomorphology*. 2006; 74(1-4):17-28. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.07.005
11. Bogomolov A.N., Pleshakov D.V., Matsiy S.I. Evaluation of landslide risk based on the least-losses technique. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2007; 8:22-27. (rus.).
12. Gudkova N.K., Onoprienko M.G. About activation of dangerous geodynamical processes in the result of the increased anthropogenic load during Sochi region building. *The North Caucasus Ecological Herald*. 2011; 7(3):37-40. (rus.).
13. Singh R., Umrao R.K., Singh T.N. Stability evaluation of road-cut slopes in the Lesser Himalaya of Uttarakhand, India: conventional and numerical approaches. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2014; 73(3):845-857. DOI: 10.1007/s10064-013-0532-1
14. Markeev A.P. *Theoretical mechanics : textbook for universities*. Moscow, CheRo, 1999; 572. (rus.).

15. Simonyan V.V., Kochiev A.A. Mathematical model of landslide stable equilibrium. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(10):1292-1298. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1292-1298 (rus.).

16. Simonyan V.V., Tamrazyan A.G., Kochiev A.A. About development of a model of landslide process for assess its effects on buildings and structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 4:53-56. (rus.).

17. Hwang A.P. Possible model of a landslide. *Construction and Technogenic Safety*. 2006; 15-16: 55-56. (rus.).

18. Kuznetsov A.I. *Development of a method for determining the sliding surface of a landslide according*

to geodetic monitoring data : dis. ... candidate of technical. Moscow, 2012; 184. (rus.).

19. Simonyan V.V., Volkov V.I. Assessment of risk and safety of structures on slope areas according to geodetic monitoring data. *Geodesy and Cartography*. 2021; 82(10):42-51. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-976-10-42-51 (rus.).

20. Sborshchikov S.B., Zhuravlev P.A. Organizing the development of urban planning solutions. *Construction: Science and Education*. 2022; 12(2):6-20. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.1 (rus.).

21. Balalov V.V., Barabanova T.A. The life cycle assessment of smart sustainable cities. *Construction: Science and Education*. 2022; 12(2):72-101. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.6 (rus.).

Received November 28, 2022.

Adopted in revised form on April 7, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

BIONOTES: **Vladimir V. Simonyan** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Engineering Surveys and Geoecology; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 646817; simonyan.vladimir55@gmail.com;

Alexey A. Kochiev — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor; **State University of Land Use Planning**; 15 Kazakova st., Moscow, 105064, Russian Federation; ID RSCI: 802797; kohciev@yandex.ru;

Victor I. Volkov — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmejskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 66153; volkov@energaziz.ru.

Contribution of the authors:

Vladimir V. Simonyan — idea, collection of material, processing of material, writing the source text of the article, scientific editing of the text, final conclusions.

Alexey A. Kochiev — idea, partial writing of the source text.

Victor I. Volkov — revision of the text.

The authors declare no conflict of interest.

RESEARCH PAPER / НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

UDC 692.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.889-900

Assessment of PM_{2.5} particulate air pollution near highways

Elena V. Sysoeva¹, Margarita O. Gelmanova²¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);**Moscow, Russian Federation;*² *ARCHI ATELIER; Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The purpose of this study is to investigate air pollution with respect to PM_{2.5} particulate matter hazardous to the health of the urban population, generated by the movement of motor vehicles. The development of existing and construction of new transport networks in large cities leads to the fact that the problem of air pollution by PM_{2.5} particles becomes extremely urgent.

Materials and methods. The ENVI-met calculations were based on the data provided by the meteorological station. The following methods were applied: system analysis, numerical modelling method — finite difference method, processing of numerical results.

Results. A calculation model of Moscow district territory was developed in ENVI-met programme in order to determine PM_{2.5} dispersion patterns along the road network of the selected district. The calculation was carried out for a 24-hour time period. The schemes of fine particles dispersion on the territory of the building at a height of 1.5 and 10 m are obtained. Their evaluation shows that the highest concentration of PM_{2.5} is observed along the most frequent wind direction near roads. The width of the roadway and, accordingly, the number of cars passing per hour plays a paramount role in the formation of PM_{2.5}.

Conclusions. The greatest negative impact of fine dust occurs in residential buildings located along highways. It is most rational to increase the density of landscaping in areas with a high concentration of PM_{2.5} along the main roads and on the roofs of existing low-rise buildings and medium-rise buildings.

KEYWORDS: ENVI-met, numerical modelling, air pollution, vehicle emissions, particulate matter, PM_{2.5}, urban area greening, green roofs

FOR CITATION: Sysoeva E.V., Gelmanova M.O. Assessment of PM_{2.5} particulate air pollution near highways. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):889-900. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.889-900 (rus.).

Corresponding author: Elena V. Sysoeva, sev4279@yandex.ru.

Оценка загрязнения воздуха твердыми частицами PM_{2.5} вблизи автомагистралей

Елена Владимировна Сысоева¹, Маргарита Олеговна Гельманова²¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*² *АРХИ АТЕЛЬЕ; г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью исследования является изучение загрязнения воздуха опасными для здоровья городского населения твердыми частицами PM_{2.5}, образующимися в результате движения автотранспортных средств. Развитие существующих и строительство новых транспортных сетей в крупных городах приводит к тому, что проблема загрязнения воздуха частицами PM_{2.5} становится актуальной.

Материалы и методы. Для расчетов в ENVI-met использовались данные, предоставленные метеостанцией. Применялись следующие методы: системный анализ, метод численного моделирования — метод конечных разностей, обработка численных результатов.

Результаты. В программе ENVI-met разработана расчетная модель территории района Москвы для определения закономерностей рассеивания PM_{2.5} вдоль дорожной сети выбранного района. Расчет проводился для 24-часового периода времени. Получены схемы рассеивания мелких частиц на территории на высоте 1,5 и 10 м. Их оценка показывает, что наибольшая концентрация PM_{2.5} наблюдается вдоль наиболее частого направления ветра вблизи дорог. Ширина проезжей части и, соответственно, количество проезжающих в час автомобилей играют первостепенную роль в образовании PM_{2.5}.

Выводы. Наибольшее негативное воздействие мелкодисперсной пыли приходится на жилые дома, расположенные вдоль автомобильных дорог. Наиболее рационально увеличивать плотность озеленения в районах с высокой концентрацией PM_{2.5} вдоль основных дорог и на крышах существующих малоэтажных и среднеэтажных зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ENVI-met, численное моделирование, загрязнение воздуха, выбросы автотранспорта, мелкодисперсные частицы, $PM_{2.5}$, озеленение городских территорий, «зеленые» крыши

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сысоева Е.В., Гельманова М.О. Assessment of $PM_{2.5}$ particulate air pollution near highways // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 889–900. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.889-900

Автор, ответственный за переписку: Елена Владимировна Сысоева, sev4279@yandex.ru

INTRODUCTION

In September 2015, the United Nations¹ adopted the Resolution “Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development”. The adopted document covers all aspects of life and activities of people on the planet, especially inside cities, in order to “protect the planet from degradation including through the introduction of rational consumption and production models, rational use of its natural resources and taking urgent measures regarding climate change so that the planet can meet the needs of present and future generations”.

Cities, being the centers of industry and a transport system development, have become the main source of pollution of the air basin. According to the Russian Federal State Statistics Service 75 % of the country’s population is concentrated in cities, and every year the share of the urban population increases (Fig. 1).

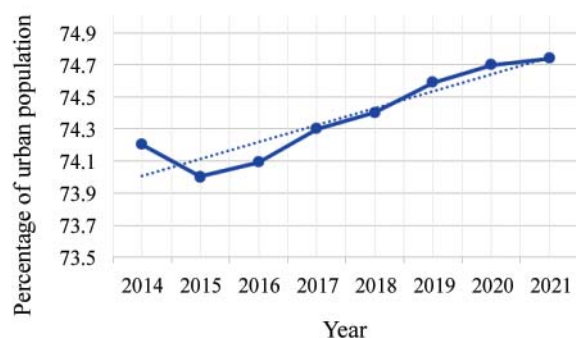


Fig. 1. The share of the urban population of the Russian Federation in the total population²

Cities are destroying nature in an effort to improve the quality of life. Academician V.A. Ilyichev [1] developed the principles of transforming a city into a biosphere-compatible and developing people. Principle No. 1 is awareness of the man and nature unity and the need for a symbiosis between the city and the Biosphere.

The task of symbiotically embedding the city into the natural environment is extremely important. Academician V.I. Osipov [2] notes that it is necessary to preserve the biosphere, “... and it is necessary to manage

human activity, achieving the harmonization of human–nature relations. Man cannot and should not interfere in the natural processes of the Biosphere evolution”.

Currently the problem of air pollution by particulate matter $PM_{2.5}$ and PM_{10} is becoming significant in large megacities, which becomes a priority for maintaining the health and well-being of the urban population in the context of urban growth³ and technological development [3]. One of the most dangerous pollutants in the city’s air environment, along with O_3 , NO_2 and SO_2 , are particulate pollutants $PM_{2.5}$, which pose a serious threat to public health [4]. $PM_{2.5}$ are an air pollutant consisting of solid and liquid particles suspended in the air with a diameter equal or less than 2.5 microns.

Fig. 2 shows that $PM_{2.5}$ is a part of PM_{10} , but $PM_{2.5}$ are more toxic and contain more heavy metals in comparison with PM_{10} [5], and, as a result, contribute more to the deterioration of the urban population health [6], leading to an increase in cases of respiratory diseases such as asthma, an increase in the frequency of cardiovascular and oncological diseases [7, 8]. Due to the fact that particulate pollutants $PM_{2.5}$ pose a great danger to human health, only $PM_{2.5}$ are considered in this study.

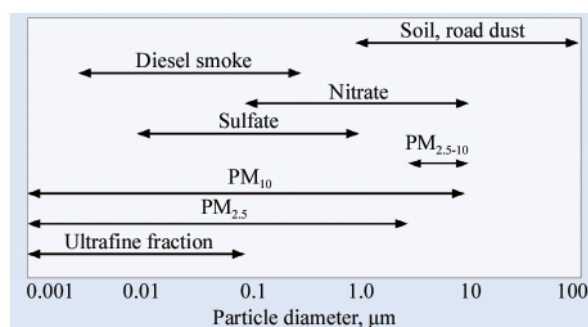


Fig. 2. Comparison of the particle diameter of some pollutants⁴

Particulate matter $PM_{2.5}$ are divided into primary and secondary by origin. Primary $PM_{2.5}$ enter the airspace ready-made. Secondary $PM_{2.5}$ appear during the interaction of various substances in the atmosphere and are more dangerous in comparison with primary. The ability of dust particles $PM_{2.5}$ to absorb highly toxic organic compounds and to release these compounds into the human body via penetrating into

¹ United Nations. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. New York, 2015.

² The share of the urban population in the total population as of January 1. URL: <https://showdata.gks.ru/report/278932/>

³ United Nations. World urbanization prospects: The 2014 revision. New York, 2014.

⁴ World Health Organization. URL: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf

the upper respiratory tract and alveoli of the lungs makes them secondary damaging factors that enhance the negative impact of the urban environment on the human body.

Fine dust has natural and man-made sources (stationary and mobile). In cities particulate matter PM_{2.5} are mainly formed during the combustion of transport fuel and when vehicle tires rub against the road surface, which leads to the appearance of road dust, usually containing heavy metals and metalloids. Thus, the intake of Sb, Zn, Cu, Pb, Mo is associated with the emission of engine oil particles and emissions occurring during the combustion of automobile fuel, Zn, W come from the abrasion of the road surface and markings, Sb, Cd, Zn, Pb, Cu — with the abrasion of vehicle tires, Sb, Zn, Cu, Pb, W — with the wear of brake pads and alloy surfaces [9]. Industrial emissions are also a source of PM_{2.5} formation, however, due to the fact that industrial facilities are mainly located outside a city, their importance is small [10–12].

The existing regulatory documentation of different countries has significant differences in the value of maximum allowable concentration for particulate pollutants (Table 1).

Table 1. One-time, average daily and average year limits for PM_{2.5}: RF, EU, USA, China, WHO

Indicators*	RF	EU	USA	China	WHO
PM _{2.5} one-time limit, µg/m ³	160	—	—	—	—
PM _{2.5} average daily, µg/m ³	35	25	35	35	25
PM _{2.5} average year, µg/m ³	25	12	12** 15***	15	10

Notes: * — PM_{2.5} one-time limit — the maximum one-time permissible concentration of particulate matter in the air when averaged over 20 min; PM_{2.5} average daily limit — maximum permissible average daily concentration of particulate matter in the air; PM_{2.5} average year limit — the maximum permissible average annual concentration of particulate matter in the air; ** — a value corresponding to the primary US standards that protect the health of the most vulnerable groups of the population; *** — a value corresponding to the secondary US standards that protect the health of the rest of the population.

In accordance with the international documentation “WHO Guidelines on Air Quality”⁵ concerning the content of particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide in the air, the recommended daily average value of PM_{2.5} concentration should be 0.025 mg/m³; the annual average is 0.010 mg/m³. According to es-

timates of the long-term chronic impact of PM_{2.5} on human health in European cities, life expectancy may increase by up to 22 months solely due to the fact that the average annual concentrations of particles in the air will be set equal to 10 micrograms/m³. Moreover, results have been obtained showing that an increase in daily concentrations of fine dust leads to an increase in subsequent days of hospitalizations associated with respiratory and cardiovascular diseases [13], and chronic exposure to PM_{2.5} leads to increased mortality [14–17]. The WHO Guidelines on Air Quality establish interim targets (IT) of average annual concentrations of PM_{2.5} (IT-1 — 0.035 mg/m³, IT-2 — 0.025 mg/m³, IT-3 — 0.015 mg/m³) and average daily concentrations of PM_{2.5} (IT-1 — 0.075 mg/m³, IT-2 — 0.050 mg/m³, IT-3 — 0.0375 mg/m³). Levels from IT-3 (the lowest) to IT-1 (the highest) show an increase in mortality. Thus, with respect to the average annual values IT-1 is characterized by a significant risk of mortality in developed countries (the risk of mortality is 15 % higher than the risk of mortality at the recommended value of 0.010 mg/m³), at the level of IT-2 the risk of mortality decreases by about 6 % compared to IT-1, at the level IT-3, the risk of mortality also decreases by about 6 % compared to IT-2. According to average daily values the risk of mortality is 5 % higher for IT-1, 2.5 % higher for IT-2, 1.2 % higher for IT-3 compared with the recommended value of 0.025 mg/m³ (Fig. 3).

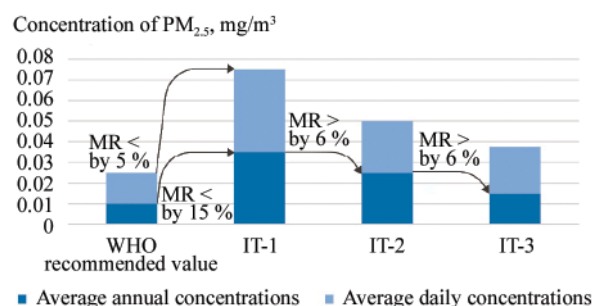


Fig. 3. Recommended value and IT of average annual and average daily concentrations of PM_{2.5} (mg/m³) in accordance with the WHO Guidelines on Air Quality (MR — mortality risk)

Thus, in accordance with the existing evidence base according to the maximum permissible values of PM_{2.5}, based on a large number of foreign studies, the long-term impact of PM_{2.5} exceeding the values of 25 mg/m³ for daily averaged value and 10 mg/m³ for year averaged value is dangerous and significantly increases the risk of mortality of the population. This suggests the need to revise the existing regulatory values in a number of countries. However, even with PM_{2.5} values not exceeding the WHO recommended values (0.025 mg/m³ daily average, 0.010 mg/m³ annual average), adverse effects on human health cannot be completely excluded, but the risk to public health can be significantly reduced.

⁵ Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide // World Health Organization (WHO). 2006. URL: <http://apps.who.int/iris/handle/10665/107823>

The following factors can affect the decrease in the concentration of fine particles in the air:

- 1) the number of sources of $PM_{2.5}$ formation (the number of vehicles powered by gasoline and diesel fuel, the number of industrial facilities) and their features;
- 2) climatic conditions (average annual precipitation, air humidity, wind speed and direction);
- 3) urban planning factors (geometry of the building area, number of storeys of buildings, built-upness — for example, fine dust particles accumulate at intersections and buildings located on turning sections of a road) in combination with the wind rose;
- 4) the area of green areas at various horizontal levels, including green roofs, as well as green facades (surfaces that retain fine dust particles).

Various management solutions are used in cities to reduce air pollution by particulate pollutants. As a rule, the main measures to combat air pollution are aimed to reducing the number of pollutant sources or controlling their emissions. This strategy leads to an effective reduction in the emissions rate, but does not affect the pollutants already exists in the air. It is important to note that the green spaces currently aren't used to regulate the concentration of $PM_{2.5}$.

To improve air quality, it is necessary to modernize traditional approaches for reduction the concentration of existing pollutants in the air to an acceptable level, especially in the summer and at positive temperatures. One of the ways to achieve this goal is to use green spaces in a city that can reduce air pollution by depositing dust particles on the surface of leaves [18–25]. Subsequently, during precipitation particulate matter enter the ground, the upper part of which must be changed every 2–3 years, as approved in the current Order of the State Construction Committee of the Russian Federation No. 153 dated December 15, 1999. It is important to note that the dust-retaining properties of various vegetation are not the same and are characterized by the dust-filtering ability of plants, depending on their morphological characteristics, biomass, the amount and fraction of dust. Moreover, trees and shrubs are more effective in removing pollutants than lawn grass due to the larger leaf surface area, which is characterized by Leaf Area Index (LAI). Thus, by [26] a numerical study was carried out, which showed that trees planted along highways contribute to reducing the concentration of exhaust gases in nearby pedestrian zones by 7 %. Scientists have also revealed that trees throughout the United States annually remove 711,000 tons of pollutants from the air [27]. Based on the results of these studies, in 2004, the US Environmental Protection Agency (EPA) decided to plant trees in urbanized areas to reduce the concentration of pollutants in the air in cities⁶. Thus, it is extremely important to recover landscaping in urban areas.

⁶ United States Environmental Protection Agency (US EPA). Incorporating Emerging and Voluntary Measures in a State Implementation Plan (SIP). US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 2004. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-05/documents/voluntarycontrolmeasurespolicyepa.pdf>

In conditions of high building density, where it is impossible to allocate free space, landscaping the roofs of existing buildings is an exceptional solution. Few studies on the ability of green roofs to remove pollutants from the air do not provide sufficient information to judge the effectiveness of greening the roofs of buildings in order to reduce the concentration of $PM_{2.5}$. Currently, the greening of roofs cannot be used as an independent measure to combat air pollution due to the high cost, but it can be an additional measure in combination with other ones, in addition green roofs can provide a solution to a number of environmental problems.

The purpose of the current research is to obtain and analyze $PM_{2.5}$ dispersion schemes in urban area on the example of a residential neighborhood in the southern administrative district of Moscow. In this study, the following tasks were set:

1. Development of the residential area 3D numerical model in the ENVI-met software, which makes it possible to estimate and predict the concentrations of $PM_{2.5}$ in the air.
2. Dynamic calculation of an air environment state of the selected site with the use of computational hydrodynamics methods for a 24-hour period, analyze and assess of the obtained $PM_{2.5}$ dispersion schemes.

MATERIALS AND METHODS

ENVI-met description

The solution of the problem of urban landscaping rational planning became possible due to the intensive development of computational fluid dynamics (CFD), which allows to analyze the effectiveness of the proposed measures to improve the quality of urban air [28]. For the first time CFD was used to calculate pollutants dispersion in the atmosphere in 1986 [29]. The models and methods of calculating heat and mass transfer in the air, which have been improving since then, have made it possible to investigate the influence of many parameters on the dispersion of particulate matter in the urban atmosphere: turbulence [30], humidity and temperature, the diameter of polluting particles, the location of emission sources in space, the geometry of buildings and the type of building surface materials. The introduction of CFD modeling into the research process is an important step in determining the patterns of the particulate matter desparation in urban development and identifying effective measures to reduce dust pollution in urbanized areas.

ENVI-met is a programme that uses computational fluid and dynamics methods, designed to build a three-dimensional predictive model of microclimate and modeling processes occurring in the boundary layer of the earth, taking into account the properties of urban surfaces, location and types of buildings and green spaces. The CFD calculation in ENVI-met is based on the numerical solution of the air flows equations in the mesh region. ENVI-met uses the Reyn-

olds averaged Navier-Stokes equations (RANS) and the standard $k-\varepsilon$ turbulence model, first proposed in the study [31]. The $k-\varepsilon$ turbulence model is based on several assumptions, the most important of which is that the Reynolds number is sufficiently large. In addition, it is important that turbulence is in equilibrium in the boundary layers (i.e., near the walls of solid objects), which means that the amount of turbulent energy generated is equal to the amount of turbulent energy dissipated. These assumptions limit the accuracy of the model, however, lead to savings in computing resources compared to using more complex turbulence models.

In this study, the calculation of $PM_{2.5}$ dispersion was performed in the ENVI-met software version 4.4.5.

RESULTS

Research area

For this study, the territory of a residential neighbourhood which is remote from industrial zones and located in the southern administrative district of Moscow (with an area of 12,856 hectares) was selected (Fig. 4). Public and residential buildings up to 15 floors are located on this territory. The study area is bounded on four sides by highways: in the east – Warsaw Highway, in the west – Simferopol Boulevard, in the north – Nakhimovsky Avenue, in the south – Bolotnikovskaya Street, among which Warsaw Highway and Nakhimovsky Avenue have the densest traffic.

Meteorological data for the study was taken from a weather station located near the study area at the address: Moscow, Kashirskoe highway, 10 (Fig. 5, 6).

Meteorological data was used to set boundary conditions in the model. The hourly averaged data from the weather station was used as input parameters. Data on relative humidity, %, air temperature, °C and $PM_{2.5}$ concentration are performed in the Table 2.

Thus, sufficiently high concentration of $PM_{2.5}$ were detected. The maximum one-time concentration on August 26, 2020 was equal to $136.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Fig. 7) in the period between 20:00 and 22:00, which is lower than the value of one-time concentration limit ($160 \mu\text{g}/\text{m}^3$) established by Russian Sanitary Regulations and Standards 1.2.3685–21. The average daily concentration on August 26, 2020 was equal to $24.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which is also lower than the average daily concentration limit ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Despite the fact that the data obtained fall within the limits of the Standard, their maximum values

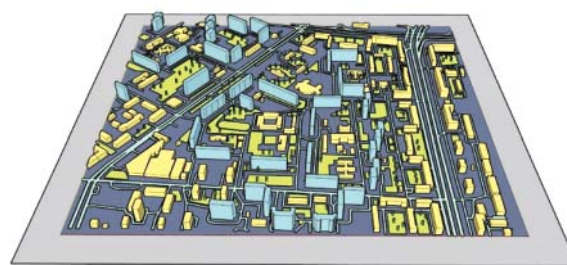


Fig. 4. Three-dimensional model of the research area in AutoCAD: ■ — residential buildings with up to 15 floors; ■ — residential and public buildings up to 9 floors; ■ — pedestrian zones; ■ — highways; ■ — green areas; ■ — deciduous trees



Fig. 5. Satellite image of the research area



Fig. 6. The scheme of the research area: *a* — the 70th quarter of Volkhonki-ZIL; *b* — the 72nd quarter of Volkhonki-ZIL; *c* — the 71st quarter of Volkhonki-ZIL; *d* — the location of the weather station

Table 2. Weather station data for August 26, 2020

Time, h	0–2	2–4	4–6	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18	18–20	20–22	22–24
$PM_{2.5}$ average, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30	29	32	39	33	35	33	34	10	4	5	15
$PM_{2.5}$ maximum, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	54.80	29.50	40.60	38.50	43.70	34.90	46.80	34.00	12.60	13.20	136.90	15.20
T , °C	21	19	18	18	18	20	20	20	17	17	17	16
Relative humidity, %	84	100	100	100	100	93	96	99	100	95	91	100

are dangerous to human health according to WHO and as a result can cause respiratory, cardiovascular and on-cological diseases.

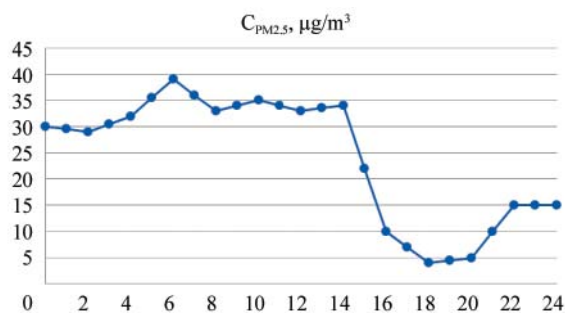


Fig. 7. Hourly graph of the average PM_{2.5} concentration measured by the weather station at August 26, 2020

ENVI-met model

The AutoCAD programme was used to build the research area. Rhinoceros 3D software based on Grasshopper visual programming was used to import the model from the AutoCAD programme to ENVI-met (Fig. 8).



Fig. 8. The stages of importing the model into ENVI-met

In this case, the finite element ENVI-met model (Fig. 9) includes the research area with the selected model parameters and ENVI-met objects which are assigned different types of materials (asphaltic-cement concrete road surfaces, concrete and brick surfaces of buildings, landscaped surfaces).

The calculation was carried out for a twenty-four-hour period on August 26, 2020. Table 3 shows the parameters of the ENVI-met model.

Adding nesting grids can improve the convergence of the numerical solution, but it is not necessary

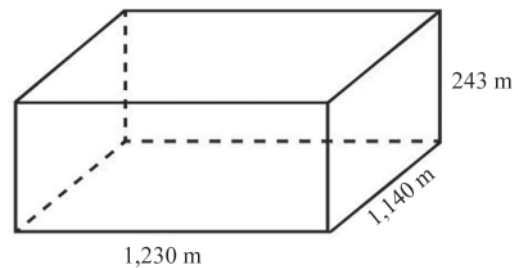


Fig. 9. Computational domain of the ENVI-met model

if there is sufficient free space between the boundary of the computational domain and the outermost objects of development. To improve the convergence of the solution, 8 nesting grids were added in this calculation.

The ENVI-met programme can construct 2 types of a vertical grid: equidistant grid A, where all cells, except the five lower ones with a height of $0.2\Delta z$, have the same vertical dimensions Δz , and a telescopic grid B1, B2, C, where with increasing distance from the earth's surface, the cells height increases taking into account the expansion coefficient s . Fig. 10 shows an equidistant grid (A) and a telescopic grid in three variants (B1, B2, C), where variant C, which is a special case of variants B1 and B2, has an expansion coefficient s equal to zero, as a result the heights of each cell of all layers of the computational domain are equal. In this research, the equidistant method of generating a vertical grid (A) was applied. Near the earth's surface, a smaller vertical size of five grids was set equal to 0.6 m in order to obtain more accurate calculation results since at ground level the exchange processes between the atmosphere and the earth's surface have a significant impact on the microclimate.

The size of a grid cell in ENVI-met computational domain ranges from 0.5 to 10 m, while the time step is 1–5 s [32]. In this study, the cell size is $3 \times 3 \times 3$ m, the computational domain of the model has dimensions of $1,230 \times 1,140$ m and a height of 243 m. The comparison of the model in AutoCAD and ENVI-met is shown in Fig. 11 and 12.

Table 3. The main parameters of the ENVI-met model

Simulation date	August 26, 2020	Computational domain of the ENVI-met model, m	$1230 \times 1140 \times 243$
Simulation time	24 hours	Grid cell dimensions dx, dy, dz , m	$3 \times 3 \times 3$
Wind speed, measured at a height of 10 m, m/s	4.05		
Wind direction	Northeast	Nesting grids	8
The initial temperature of atmospheric air at 00:00 on August 26, 2020 t , °C	21	Vertical grid generation method	Equidistant
Minimum temperature over 24 hours on August 26, 2020 t_{\min} , °C	16		
The maximum temperature over 24 hours on August 26, 2020 t_{\max} , °C	21		

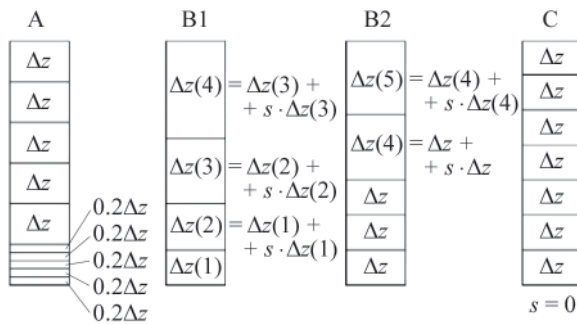


Fig. 10. Types of vertical grids in ENVI-met



Fig. 11. Three-dimensional model of the studied area in AutoCAD, top view: ■ — residential buildings with up to 15 floors; ■ — residential and public buildings up to 9 floors; ■ — pedestrian zones; ■ — highways; ■ — landscaped areas; ■ — deciduous trees



Fig. 12. Three-dimensional model of the studied area in ENVI-met, top view: ■ — residential and public buildings; ■ — pedestrian zones; ■ — green areas; ■ — highways; ■ — deciduous trees

The traffic intensity was determined by averaged traffic calculations with dividing transport into different classes (truck transport > 7.5 tons; buses; passenger cars). Traffic data was averaged over 1 hour. Emissions from road traffic are presented in the form of linear sources. The sources were placed across the entire width of the traffic lanes for a more realistic spatial distribution.

After the calculation, the distribution schemes of fine particles in the air of urban development were drawn up, which are shown in Fig. 13–16.

The calculation results demonstrated that the width of the roadway, and, consequently, the number of vehicles passing per hour, plays a primary role in the formation of fine dust in the studied area (Fig. 13). Moreover, the speed and direction of air movement determine the location of areas of $PM_{2.5}$ accumulation (Fig. 14). Wind speed (and, consequently, $PM_{2.5}$ concentration) have the greatest values on the streets oriented along the wind direction. Since the air flows in the computational domain have a north-easterly direction (in the southern part of the studied area wind has north-westerly direction due to the vortex movement of air), the greatest negative impact of $PM_{2.5}$ falls on residential buildings located along two highways: Varshavskoe Highway and Simferopol Avenue. The wind speed inside the area (in courtyards between houses away from wide highways) is significantly lower due to the shielding effect of residential buildings, as a result, fine particles $PM_{2.5}$ will stagnate in these areas.

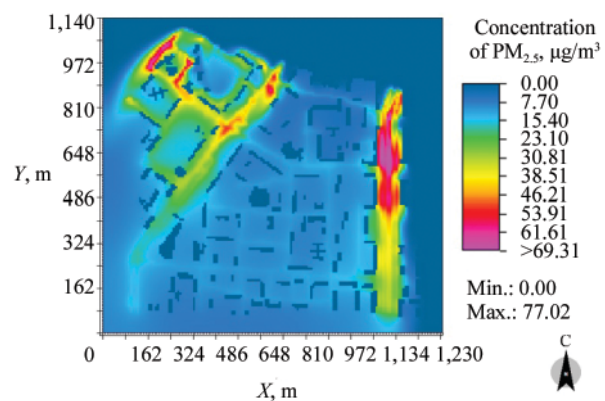


Fig. 13. The distribution scheme of $PM_{2.5}$ in the studied area at 21:00 at the height of 1.5 m from the ground surface

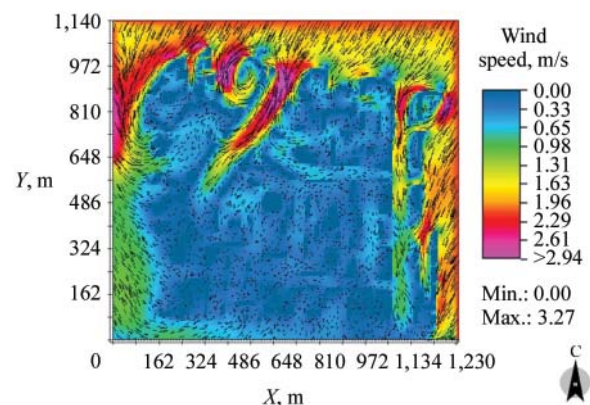


Fig. 14. Wind speed in the studied area at 21:00 at the height of 1.5 m from the ground surface

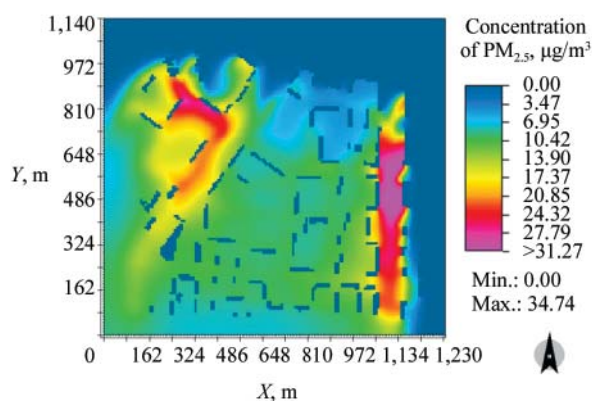


Fig. 15. The distribution scheme of $PM_{2.5}$ in the studied area at 21:00 at the height of 10 m from the ground surface

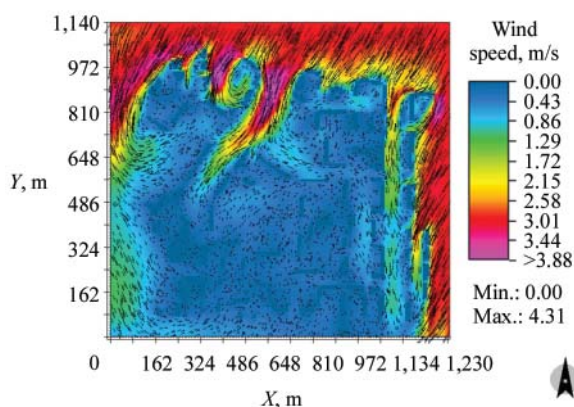


Fig. 16. Wind speed in the studied area at 21:00 at the height of 10 m from the ground surface

Fig. 13 and 15 show that dust pollution remains highly concentrated along the roads. At the altitude of 1.5 m from the earth's surface, the maximum concentration of $PM_{2.5}$ was $77.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in the central part of the Warsaw Highway, which is lower than the short-term exposure limit = $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which is nevertheless dangerous for human health. At a distance of 10 m from the border of the nine-lane road carriageway, $PM_{2.5}$ concentrations decrease by approximately 5–10 % compared to the central part of Warsaw highway.

In further studies, roofs landscaping in the development area at various altitude relative to the earth's surface will be proposed to reduce $PM_{2.5}$ concentrations in order to study the effectiveness of this factor.

CONCLUSIONS

Thus, according to the results of the study, we can come to the following conclusions.

Air pollution by particulate matter in the context of urban development and expansion is becoming an urgent problem that requires researches and development of effective and environmentally friendly management solutions. $PM_{2.5}$ are part of PM_{10} , but it is $PM_{2.5}$ that are more toxic and contain more heavy metals, and, as a result, contribute more to the deterioration of the health of the urban population, leading to respiratory, cardiovascular and oncological diseases.

The analysis of domestic and foreign regulatory documentation has shown the need to revise the existing regulatory values on the territory of the Russian Federation. Reducing the average daily and average annual concentration limits of $PM_{2.5}$ will reduce the risks of mortality and improve the well-being and health of the urban population. So, with a decrease in average annual concentration limit for $PM_{2.5}$ from $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to the recommended value of $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, the risk of mortality of the population will decrease by more than 6 %. At that, the regulation of the average annual concentration limit is a more important step because this indicator causes more harmful long-term effects of fine dust on human health.

Urban landscaping is a little-studied factor that has a potential to decrease in the concentration of $PM_{2.5}$. Reduction of air pollution by fine particles occurs due to their deposition on the surface of leaves, and if it is impossible to allocate free space in conditions of high building density, greening roofs of existing buildings may become a solution to reduce air pollution.

The results of the calculation carried out in this study demonstrated that the width of a roadway and, consequently, the number of vehicles passing it per hour plays a primary role in the formation of fine dust in the studied area. Moreover, the speed and direction of air movement are of the greatest importance on the streets oriented along the wind direction and determine the location of areas of $PM_{2.5}$ accumulation. Dust pollution remains highly concentrated along the roads. The greatest negative impact of fine dust falls on residential buildings located along highways.

It is most rational to increase the density of landscaping in areas with a high concentration of $PM_{2.5}$ along the main roads and on the roofs of existing low-rise buildings and medium-rise buildings.

REFERENCES

1. Il'ichev V.A. Principles of transformation of a city in biosphere compatible and developing the person. *Industrial and Civil Engineering*. 2010; 6:3-13. (rus.).
2. Osipov V.I. Assessment and management of natural risks (state of the problem). *Geoekologiya. Inzheneraya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2007; 3:201-211. (rus.).
3. Grafkina M.V., Azarov A.V., Dobrinsky D.R., Nikolenko D.A. On the issue of control and normalization of fine dust emissions into the atmospheric air

during the road transport movement. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2017; 12(4):373-380. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.373-380 (rus.).

4. Polichetti G., Cocco S., Spinali A., Trimarco V., Nunziata A. Effects of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁) on the cardiovascular system. *Toxicology*. 2009; 261(1-2):1-8. DOI: 10.1016/j.tox.2009.04.035

5. Arden Pope III C. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*. 2002; 287(9):1132. DOI: 10.1001/jama.287.9.1132

6. Mayer H. Air pollution in cities. *Atmospheric Environment*. 1999; 33(24-25):4029-4037. DOI: 10.1016/S1352-2310(99)00144-2

7. Kholodov A.S., Kirichenko K.Y., Zadorov K.S., Golokhvast K.S. Effect of particulate matter in the air of residential areas on human health. *Bulletin of Kamchatka State Technical University*. 2019; 49: 81-88. DOI: 10.17217/2079-0333-2019-49-81-88 (rus.).

8. Tabakaev M.V., Artamonova G.V. Particulate matter air pollution effects on the incidence of heart diseases among the urban population. *Annals of the Russian academy of medical sciences*. 2014; 69(3-4):55-60. DOI: 10.15690/vramn.v69i3-4.996 (rus.).

9. Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Samsonov T.E., Kasimov N.S. Chemical composition of road dust particles and its variation as influenced by geometry of urban canyons in Moscow. *Reports of the Russian Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications named after A.S. Popova : Proceedings of the International Symposium. Ser. "Scientific International Symposia. Engineering Ecology"*. 2019; 61-65. (rus.).

10. Morawska L., Thomas S., Gilbert D., Greenaway C., Rijnders E. A study of the horizontal and vertical profile of submicrometer particles in relation to a busy road. *Atmospheric Environment*. 1999; 33(8):1261-1274. DOI: 10.1016/S1352-2310(98)00266-0

11. Ulanova T.S., Antipieva M.V., Volkova M.V., Gileva M.I. Investigations of fine particles concentrations in the atmospheric air near highways. *Health Risk Analysis*. 2016; 4:38-46. DOI: 10.21668/health.risk/2016.4.05 (rus.).

12. Bepalov V.I., Gurova O.S., Samarskaya N.S. Main principles of the atmospheric air ecological monitoring organization for urban environment mobile pollution sources. *Procedia Engineering*. 2016; 150:2019-2024. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.286

13. Faustini A., Stafoggia M., Berti G., Bisanti L., Chiusolo M., Cernigliaro A. et al. The relationship between ambient particulate matter and respiratory mortality: a multi-city study in Italy. *European Respiratory Journal*. 2011; 38(3):538-547. DOI: 10.1183/09031936.00093710

14. Chow J.C., Watson J.G., Mauderly J.L., Costa D.L., Wyzga R.E., Vedal S. et al. Health effects of fine particulate air pollution: lines that

connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2006; 56(10):1368-1380. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464545

15. Anderson H.R., Atkinson R., Peacock J.L., Marston L., Konstantinou K. *Meta-analysis of time-series studies of particulate matter (PM) and ozone (O₃): report of a WHO task group*. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, 2004. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107557>

16. Garrett P., Casimiro E. Short-term effect of fine particulate matter (PM_{2.5}) and ozone on daily mortality in Lisbon, Portugal. *Environmental Science and Pollution Research*. 2011; 18(9):1585-1592. DOI: 10.1007/s11356-011-0519-z

17. Jerrett M., Burnett R.T., Ma R., Pope C.A., Krewski D., Newbold K.B. et al. Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles. *Epidemiology*. 2005; 16(6):727-736. DOI: 10.1097/01.ede.0000181630.15826.7d

18. Abhijith K.V., Kumar P., Gallagher J., McNabola A., Baldauf R., Pilla F. et al. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments : a review. *Atmospheric Environment*. 2017; 162:71-86. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.05.014

19. Morakinyo T.E., Lam Y.F., Hao S. Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: Modelling and measurement. *Journal of Environmental Management*. 2016; 182: 595-605. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.077

20. Pugh T.A.M., MacKenzie A.R., Whyatt J.D., Hewitt C.N. Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. *Environmental Science & Technology*. 2012; 46(14):7692-7699. DOI: 10.1021/es300826w

21. Wu J., Luo K., Wang Y., Wang Z. Urban road greenbelt configuration: The perspective of PM_{2.5} removal and air quality regulation. *Environment International*. 2021; 157:106786. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106786

22. Luo H., Wang N., Chen J., Ye X., Sun Y. Study on the thermal effects and air quality improvement of green roof. *Sustainability*. 2015; 7(3):2804-2817. DOI: 10.3390/su7032804

23. Viecco M., Vera S., Jorquera H., Bustamante W., Gironás J., Dobbs C. et al. Potential of particle matter dry deposition on green roofs and living walls vegetation for mitigating urban atmospheric pollution in semiarid climates. *Sustainability*. 2018; 10(7):2431. DOI: 10.3390/su10072431

24. Tong Z., Whitlow T.H., Landers A., Flanner B. A case study of air quality above an urban roof top vegetable farm. *Environmental Pollution*. 2016; 208:256-260. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.07.006

25. Viecco M., Jorquera H., Sharma A., Bustamante W., Fernando H.J.S., Vera S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigat-

ing particulate matter. *Building and Environment*. 2021; 204:108120. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108120

26. Jeanjean A.P.R., Hinchliffe G., McMullan W.A., Monks P.S., Leigh R.J. A CFD study on the effectiveness of trees to disperse road traffic emissions at a city scale. *Atmospheric Environment*. 2015; 120:1-14. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.003

27. Nowak D.J., Crane D.E., Stevens J.C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2006; 4(3-4):115-123. DOI: 10.1016/j.ufug.2006.01.007

28. Croitoru C., Nastase I. A state of the art regarding urban air quality prediction models. *E3S Web of Conferences*. 2018; 32:01010. DOI: 10.1051/e3s-conf/20183201010

29. Svensson U. PHOENICS in environmental flows. A review of applications at SMHI. *Lecture Notes*

in Engineering. 1986; 87-96. DOI: 10.1007/978-3-642-82781-5_6

30. Neofytou P., Haakana M., Venetsanos A., Kousa A., Bartzis J., Kukkonen J. Computational fluid dynamics modelling of the pollution dispersion and comparison with measurements in a street canyon in Helsinki. *Environmental Modeling & Assessment*. 2008; 13(3):439-448. DOI: 10.1007/s10666-007-9110-x

31. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974; 3(2): 269-289. DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2

32. Paas B., Schneider C. A comparison of model performance between ENVI-met and Austal2000 for particulate matter. *Atmospheric Environment*. 2016; 145:392-404. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.09.031

Received February 27, 2023.

Adopted in revised form on April 12, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

B I O N O T E S: **Elena V. Sysoeva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architectural and Structural Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 57192373360, ORCID: 0000-0001-7250-3190; SysoevaEV@mgsu.ru;

Margarita O. Gelmanova — researcher, lecturer-researcher, architect-visualizer; **ARCH ATELIER**; 29-116 Baryshikha st., Moscow, 125368, Russian Federation; SPIN-code: 8462-8299, ORCID: 0000-0003-2232-5239; margo.gelmanova@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Elena V. Sysoeva — provided scientific supervision, edited the text of the publication and the conclusions.

Margarita O. Gelmanova — collected and processed the materials for the article, formed the results, and made changes according to the planned adjustments.

The authors declare no conflict of interest with regard to the materials discussed in this publication.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ильичев В.А. Принципы преобразования города в биосферосовместимый и развивающий человека // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 6. С. 3–13.

2. Осипов В.И. Оценка и управление природными рисками (состояние проблемы) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2007. № 3. С. 201–211.

3. Графкина М.В., Азаров А.В., Добринский Д.Р., Николенко Д.А. К вопросу контроля и нормирования выбросов мелкодисперсной пыли в атмосферный воздух при движении автомобильного транспорта // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 4 (103). С. 373–380. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.373-380

4. Polichetti G., Cocco S., Spinali A., Trimarco V., Nunziata A. Effects of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁) on the cardiovascular system // *Toxicology*

2009. Vol. 261. Issue 1–2. Pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.tox.2009.04.035

5. Arden Pope III C. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution // *JAMA*. 2002. Vol. 287. Issue 9. P. 1132. DOI: 10.1001/jama.287.9.1132

6. Mayer H. Air pollution in cities // *Atmospheric Environment*. 1999. Vol. 33. Issue 24–25. Pp. 4029–4037. DOI: 10.1016/S1352-2310(99)00144-2

7. Холодов А.С., Кириченко К.Ю., Задорнов К.С., Голохваст К.С. Влияние твердых взвешенных частиц атмосферного воздуха населенных пунктов на здоровье человека // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2019. № 49. С. 81–88. DOI: 10.17217/2079-0333-2019-49-81-88

8. Табакаев М.В., Артамонова Г.В. Влияние загрязнения атмосферного воздуха взвешенными

веществами на распространенность сердечно-сосудистых заболеваний среди городского населения // Вестник Российской академии медицинских наук. 2014. Т. 69. № 3–4. С. 55–60. DOI: 10.15690/vramn.v69i3-4.996

9. Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Самсонов Т.Е., Касимов Н.С. Химический состав частиц дорожной пыли и его варьирование в зависимости от геометрии городских каньонов в г. Москве // Докл. Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова : мат. Междунар. симпозиума. Сер. «Научные Международные симпозиумы. Инженерная экология». 2019. С. 61–65.

10. Morawska L., Thomas S., Gilbert D., Greenaway C., Rijnders E. A study of the horizontal and vertical profile of submicrometer particles in relation to a busy road // *Atmospheric Environment*. 1999. Vol. 33. Issue 8. Pp. 1261–1274. DOI: 10.1016/S1352-2310(98)00266-0

11. Уланова Т.С., Антипова М.В., Волкова М.В., Гилёва М.И. Исследование содержания мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе вблизи автомобильных дорог // Анализ риска здоровью. 2016. Т. 4. С. 38–46. DOI: 10.21668/health.risk/2016.4.05

12. Bepalov V.I., Gurova O.S., Samarskaya N.S. Main principles of the atmospheric air ecological monitoring organization for urban environment mobile pollution sources // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 2019–2024. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.286

13. Faustini A., Stafoggia M., Berti G., Bisanti L., Chiusolo M., Cernigliaro A. et al. The relationship between ambient particulate matter and respiratory mortality: a multi-city study in Italy // *European Respiratory Journal*. 2011. Vol. 38. Issue 3. Pp. 538–547. DOI: 10.1183/09031936.00093710

14. Chow J.C., Watson J.G., Mauderly J.L., Costa D.L., Wyzga R.E., Vedral S. et al. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect // *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2006. Vol. 56. Issue 10. Pp. 1368–1380. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464545

15. Anderson H.R., Atkinson R., Peacock J.L., Marston L., Konstantinou K. Meta-analysis of time-series studies of particulate matter (PM) and ozone (O₃): report of a WHO task group. Copenhagen : WHO Regional Office for Europe, 2004. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107557>

16. Garrett P., Casimiro E. Short-term effect of fine particulate matter (PM_{2.5}) and ozone on daily mortality in Lisbon, Portugal // *Environmental Science and Pollution Research*. 2011. Vol. 18. Issue 9. Pp. 1585–1592. DOI: 10.1007/s11356-011-0519-z

17. Jerrett M., Burnett R.T., Ma R., Pope C.A., Krewski D., Newbold K.B. et al. Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles // *Epidemiology*.

2005. Vol. 16. Issue 6. Pp. 727–736. DOI: 10.1097/01.ede.0000181630.15826.7d

18. Abhijith K.V., Kumar P., Gallagher J., McNabola A., Baldauf R., Pilla F. et al. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments : a review // *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 162. Pp. 71–86. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.05.014

19. Morakinyo T.E., Lam Y.F., Hao S. Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: Modelling and measurement // *Journal of Environmental Management*. 2016. Vol. 182. Pp. 595–605. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.077

20. Pugh T.A.M., MacKenzie A.R., Whyatt J.D., Hewitt C.N. Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons // *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46. Issue 14. Pp. 7692–7699. DOI: 10.1021/es300826w

21. Wu J., Luo K., Wang Y., Wang Z. Urban road greenbelt configuration: The perspective of PM_{2.5} removal and air quality regulation // *Environment International*. 2021. Vol. 157. P. 106786. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106786

22. Luo H., Wang N., Chen J., Ye X., Sun Y. Study on the thermal effects and air quality improvement of green roof // *Sustainability*. 2015. Vol. 7. Issue 3. Pp. 2804–2817. DOI: 10.3390/su7032804

23. Viecco M., Vera S., Jorquera H., Bustamante W., Gironás J., Dobbs C. et al. Potential of particle matter dry deposition on green roofs and living walls vegetation for mitigating urban atmospheric pollution in semiarid climates // *Sustainability*. 2018. Vol. 10. Issue 7. P. 2431. DOI: 10.3390/su10072431

24. Tong Z., Whitlow T.H., Landers A., Flanner B. A case study of air quality above an urban roof top vegetable farm // *Environmental Pollution*. 2016. Vol. 208. Pp. 256–260. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.07.006

25. Viecco M., Jorquera H., Sharma A., Bustamante W., Fernando H.J.S., Vera S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter // *Building and Environment*. 2021. Vol. 204. P. 108120. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108120

26. Jeanjean A.P.R., Hinchliffe G., McMullan W.A., Monks P.S., Leigh R.J. A CFD study on the effectiveness of trees to disperse road traffic emissions at a city scale // *Atmospheric Environment*. 2015. Vol. 120. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.003

27. Nowak D.J., Crane D.E., Stevens J.C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2006. Vol. 4. Issue 3–4. Pp. 115–123. DOI: 10.1016/j.ufug.2006.01.007

28. Croitoru C., Nastase I. A state of the art regarding urban air quality prediction models // *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 32. P. 01010. DOI: 10.1051/e3sconf/20183201010

29. Svensson U. PHOENICS in environmental flows. A review of applications at SMHI // Lecture Notes in Engineering. 1986. Pp. 87–96. DOI: 10.1007/978-3-642-82781-5_6

30. Neofytou P., Haakana M., Venetsanos A., Kousa A., Bartzis J., Kukkonen J. Computational fluid dynamics modelling of the pollution dispersion and comparison with measurements in a street canyon in Helsinki // Environmental Modeling & Assessment. 2008. Vol. 13. Issue 3. Pp. 439–448. DOI: 10.1007/s10666-007-9110-x

31. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. Vol. 3. Issue 2. Pp. 269–289. DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2

32. Paas B., Schneider C. A comparison of model performance between ENVI-met and Austal2000 for particulate matter // Atmospheric Environment. 2016. Vol. 145. Pp. 392–404. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.09.031

Поступила в редакцию 27 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 12 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Владимировна Сысоева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 755880, Scopus: 57192373360, ORCID: 0000-0001-7250-3190; SysoevaEV@mgsu.ru;

Маргарита Олеговна Гельманова — научный сотрудник, преподаватель-исследователь, архитектор-визуализатор; АРХИ АТЕЛЪЕ; 125368, г. Москва, ул. Барышиха, д. 29-116; SPIN-код: 8462-8299, ORCID: 0000-0003-2232-5239; margo.gelmanova@yandex.ru.

Вклад авторов:

Сысоева Е.В. — научное руководство, редактирование текста и выводов.

Гельманова М.О. — сбор и обработка материалов для статьи, формирование результатов, внесение изменений, соответствующих намеченным корректировкам.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Numerical modelling of multiphase flow hydrodynamics by CFD analysis methods in a double-elbow pipeline

Alireza Taherifard, Victor V. Elistratov

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

ABSTRACT

Introduction. Prediction of multiphase flow patterns in pipelines of gas and oil industry is a complicated hydrodynamic process. Hydraulics of gas-liquid flows and erosion processes in pipelines with many bends in which gas, water, oil and air move are insufficiently studied. There are known studies of movement in single-phase flow conditions with one elbow, which is insufficient for design of modern pipeline systems. Therefore, there is a need for in-depth analysis of interaction of media in multiphase flow and transported sand particles. In this paper the effects of elbows on multiphase flow hydraulics and erosion of pipe sections are investigated using computational fluid dynamics (CFD) modelling tools for 100 seconds' of process. **Materials and methods.** A liquid volume model (VOF) was used to simulate three-phase flow: air-water with solids in a pipe with two elbows. Turbulence effects have been accounted for with the RNG $k-\epsilon$ model. The model verification methods from previous studies have been used. For the numerical solution, the Ansys Fluent version 20.1 software package has been used. The results of CFD modelling of the volumetric gas content have shown a good agreement with the available experimental data.

Results. The results showed that the change in the flow regime remains unchanged before the first elbow and after the second elbow in the cork flow. However, for the initial churn flow regime, the flow regime varies at different segments of the flow area before and after each elbow.

Conclusions. The preliminary churn flow in the upper vertical section was transformed to wavy stratified flow in the horizontal section between the two elbows and wavy annular flow in the vertical pipe after the second elbow. The flow pattern in slug flow maintained same after the first elbow, but the Taylor bubbles are lengthier in the horizontal section between the first and second elbows.

KEYWORDS: multiphase flow, churn flow, void fraction, slug flow, two elbows pipe, Ansys, CFD, probability density function

FOR CITATION: Taherifard A., Elistratov V.V. Numerical modelling of multiphase flow hydrodynamics by CFD analysis methods in a double-elbow pipeline. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):901-916. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.901-916 (rus.).

Corresponding author: Alireza Taherifard, taherifard.a@edu.spbstu.ru.

Численное моделирование гидродинамики многофазного потока методами CFD-анализа в трубопроводе с двойным коленом

Алиреза Тахерифард, Виктор Васильевич Елистратов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Прогнозирование характера движения многофазных потоков в трубопроводах газовой и нефтяной промышленности является сложным гидродинамическим процессом. Гидравлика газожидкостных потоков и эрозионные процессы в трубопроводах со многими коленами, в которых движутся газ, вода, нефть, воздух, недостаточно изучены. Известны исследования движения в условиях однофазного потока с одним коленом, что недостаточно при проектировании современных трубопроводных систем. Поэтому существует необходимость в углубленном анализе взаимодействия сред в многофазном потоке с транспортируемыми частицами песка. Исследовано влияние колен на гидравлику многофазного потока и эрозию участков трубы с использованием инструментов моделирования вычислительной гидродинамики (CFD) в течение 100 с процесса.

Материалы и методы. Применили модель объема жидкости (VOF) для моделирования трехфазного потока: воздух-вода с твердыми частицами в трубе с двумя коленами. Эффекты турбулентности учтены с помощью модели RNG $k-\epsilon$. Использованы методы верификации модели по ранее выполненным исследованиям. Для численного решения применили программный комплекс Ansys Fluent версии 20.1. Полученные результаты CFD-моделирования объемного содержания газа показали хорошее соответствие с имеющимися экспериментальными данными.

Результаты. Изменение режима потока остается неизменным до первого колена и после второго колена в пробковом потоке. Однако при начальном режиме вспенивания потока режим потока изменяется на разных сегментах области потока до и после каждого колена.

Выводы. Предварительный вспенивающий поток в верхней вертикальной части трубы был трансформирован в волнообразный стратифицированный поток в горизонтальной части между двумя коленами и волнообразный кольцевой поток в вертикальной трубе после второго колена. Форма потока в пробковом течении остается неизменной после первого колена, но пузырьки Тейлора стали длиннее на горизонтальном участке между первым и вторым коленами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многофазный поток, поток вспенивания, фракция пустоты, пробковое течение, труба с двумя коленами, Ansys, CFD, функция плотности вероятности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тахерифард А., Елистратов В.В. Numerical modelling of multiphase flow hydrodynamics by CFD analysis methods in a double-elbow pipeline // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 901–916. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.901-916

Автор, ответственный за переписку: Алиреза Тахерифард, taherifard.a@edu.spbstu.ru.

INTRODUCTION

Multiphase flows with the presence of sand particles are commonly encountered in many industries, including the oil and gas production process. This process involves extracting fluids from underground reservoirs, which can contain a mixture of oil, gas, water, and sand. The fluids are then transported through a series of pipes and processing facilities to separate the different phases and extract the valuable components. The multiphase flow in the oil and gas production process can occur across the entire production line, from the reservoir to the surface processing facilities. This includes the well completion, which involves connecting the reservoir to the surface through tubulars, as well as any surface facilities on land, seashore, or offshore structures. Pipelines are also used to transport the extracted fluids to additional processing facilities.

The composition of the multiphase flow in the oil and gas production process can vary depending on the stage of production. For example, it may include a saturation stage, a gas/air phase, and a water phase. Different modes of three-phase flow can occur due to the interactions between the different phases. Some common industrial flow regimes include slug flow, churn flow, and annular flow. To better understand and optimize the multiphase flow in the oil and gas production process, a range of simulations and numerical methods can be used. This includes computational fluid dynamics (CFD) modelling, which allows researchers to simulate and analyze the complex behavior of multiphase flows in different conditions. By gaining a better understanding of the behavior of multiphase flows, researchers can improve the efficiency and safety of the oil and gas production process, as well as other industries that use similar flow systems [1, 2]. Researchers have tirelessly focused their attention on geometrical structures with a single bend or fixed vertical or horizontal pipes. However, sophisticated pipelines such as those with multiple bends and U-bends require more attention to study due to limited space availability and design economics. Nevertheless, a comprehensive understanding of the behavior of two-phase flow in bends is crucial for various industrial applications. Zhao

has demonstrated two particular comparisons of two fluids at several bends to highlight the complexity. He has developed a method for calculating oil-gas processing systems, where two-phase flows encounter several turns due to the installation of bends in the pipeline [3]. Zao concluded that there is a significant difference in the behavior of two-phase flow patterns in horizontal and vertical pipes. This finding suggests that annular flow is presented in both horizontal and vertical pipes, whereas vertical pipes also exhibit diffused bubble, slug, stratified, and churn flows [4].

Flow regimes can rapidly change at bends when the flow direction shifts from a vertical to horizontal or horizontal to vertical perspective. Kerpel [5] investigated the behavior of a sharp return stepped elbow both upstream and downstream using capacitance sensors. The elbow had an interior diameter of 0.008 m and a radius of curvature of 1 mm. He used the refrigerant R134a, with mass flux and void fraction ranging from 210–410 kg/m²s and zero to one, respectively. Depending on the experimental conditions, Kerpel equipped the elbow upstream and downstream with seven capacitance sensors to collect a series of void fraction results over time to assess how the elbow influenced the experiment's results. He found that, for a short period before the first elbow, the flow exhibited slug, wavy and annular flow regimes.

Abdulkadir [6] investigated the conductance of two-phase air-water flow in churn and annular flow regimes in a large diameter vertical 180-degree return elbow with a diameter of 0.135 m and a curvature ratio of three. The air velocity ranged from 3.8 to 15.8 m/s, while the water velocity ranged from 0.03 to 0.3 m/s. The mean film of probability density function (PDF) profiles were used to determine that the flow patterns were located within the slug-to-churn transition zone. Although churn flow was observed upstream of the elbow, the liquid was found to be draining towards the elbow's base due to gravity forces, and the gas was situated in the pipe's center, resulting in an annular flow pattern downstream. These findings suggest that the flow regimes in the elbow were influenced by gravity forces and could change based on the flow rates of the two phases. It is necessary to carry out further

studies to fully understand the behavior of two-phase flow in large diameter vertical return elbows.

The researchers conducted experiments to analyze the flow patterns before and after elbows in a 75.3 mm pipe. They discovered that the churn/annular flow patterns were nearly identical before and after the pipe elbows were installed. The void fraction distributions were measured before and after the elbow using a wire mesh sensor that was directed vertically upward and horizontally at gas velocities of 12 m/s and liquid velocities of 0.015 m/s. During the investigation, they observed a flow transition from annular churn flow at one point in the pipe's length to wavy stratified flow at the opposite point. These findings suggest that the flow patterns in the pipe are affected by several factors such as the pipe geometry, flow rates, and the positions of the wire mesh sensors. Further investigations are necessary to fully understand the behavior of the two-phase flow and its characteristics in pipes with elbows [1].

Vieira conducted a comprehensive investigation to study the impact of a 90-degree standard elbow on the flow characteristics of horizontal gas-liquid stratified and annular flows in a stratified-wavy horizontal pipeline. To accomplish this, the author employed dual wire-mesh sensors to measure void fraction distributions. The horizontal test section was constructed with a 17-meter-long pipe having an inner and outer diameter of 0.0851 m, which produced stratified-wavy and annular flows. Two sensors with a 16×16 wire-mesh design was placed 0.81 and 0.59 m upstream and downstream of the elbow, respectively. The tests were performed at various superficial liquid velocities ranging from 0.03 to 0.3 m/s and superficial gas velocities ranging from 10 to 33 m/s using wire-mesh sensors.

The author analyzed the cross-sectional averaged void fraction time series for stratified and annular flows in the upstream and downstream regions and found that they had a significant resemblance, indicating that they were produced by the same mechanism. The transition from stratified to slug flow was also investigated, and it was observed that wave instability was the most prominent characteristic. After passing through the 90-degree horizontal elbow, there was a slight increase in cross-sectional time-averaged void fraction values, and more liquid was present in the pipe's perimeter, with smaller waves than upstream conditions. The findings suggest that the presence of a standard elbow in a horizontal pipeline does not significantly affect the churn and annular flow patterns [7].

Suleimanov [8] and his colleagues proposed a comprehensive approach that involves analyzing the characteristics of the transported fluid and the pipeline. They discuss the different methods that can be used to determine the fluid composition, including laboratory testing and mathematical modelling. They also discuss the importance of accurately predicting the pipeline route profile, which can help to identify potential prob-

lem areas. Gromov [9] and colleagues presented a new measurement and computing system for diagnosing thermodynamic processes of multiphase flows in pipelines. The authors discussed the challenges associated with diagnosing the thermodynamic processes of multiphase flows in pipelines, including the lack of accurate measurement and computing systems. They introduced their new system, which combines advanced measurement techniques with modern computing technology to provide accurate and reliable data on the thermodynamic processes of multiphase flows.

Serov [10] conducted a numerical study to investigate the effect of the inclination angle of the pipeline on the pressure drop and flow regime in a multiphase flow system. His research highlights the importance of accurate modelling and simulation of multiphase flow systems to optimize pipeline design and operation. The authors concluded by recommending further research on the effect of pipeline position on multiphase flow regimes and the development of more accurate modelling techniques to improve the efficiency and safety of pipeline operations.

Buznikov [11] discussed the impact of the choice of a hydrate inhibitor on ensuring uninterrupted flow in long offshore multiphase fluid pipelines. The authors examined the performance of two commonly used hydrate inhibitors and their impact on pipeline flow stability. They provided an overview of the challenges associated with maintaining uninterrupted flow in long offshore multiphase fluid pipelines, including the formation of hydrates and their impact on pipeline integrity. The authors then described the experimental study they conducted to investigate the effectiveness of two hydrate inhibitors in preventing hydrate formation and ensuring uninterrupted flow in the pipeline.

Kopteva [12] presented a method for developing an intelligent information-measuring system for controlling complex parameters of multiphase flows in conditions of uncertainty. The focus was on creating an adaptive information-measuring system for the transport parameters of oil and the detection of organic deposits on the inner surface of pipelines to improve the efficiency of the state information system of the fuel and energy complex.

Taherifard utilized Computational Fluid Dynamics (CFD) to investigate the characteristics of both water and gas within the pipeline, and to make predictions about potential erosion. Specifically, he focused on a pipeline with a diameter of 76.2 mm, and conducted simulations of churn, slug, and annular flow in order to identify where erosion may occur and estimate its size. By analyzing the behavior of fluids under these different flow conditions, Taherifard was able to gain insight into how erosion is likely to develop in the pipeline over time. The results of his investigation may have significant implications for pipeline safety and maintenance [13, 14].

Zhao [3] and colleagues conducted an experimental investigation in the laboratory to study the transition between two-phase flow regimes in a double-bend pipeline. They investigated gas-liquid flows at two 90-degree bends in sequence with a constant separation distance and measured the phase distribution using capacitance measurements inside and outside the elbows. The results showed that the two-phase flows underwent transformative flow due to secondary flows and gravity forces at the bend. Slug and churn flows were observed upstream of the elbow, whereas stratified churn, wavy, and slug flows were recorded downstream of the bend at different gas and liquid surface velocities. The bend transformed upstream bubbly flow into stratified flow downstream of the elbow at certain liquid and gas superficial velocities whereas upstream slug flow transformed into churn flow downstream of the elbow at other liquid and gas superficial velocities. The liquid phase drained to the pipe's bottom during the passage of the two-phase flow around the bend and into the horizontal sections, due to gravity, and converted to stratified flow. They found that a minimum distance of 10 to 50 D from the 90-degree bend was required for the formation of the flow after the bend, depending on the flow rates. The study highlighted a knowledge gap in the previous literature regarding two-phase current switching on curves with different separation lengths. These pipe designs are widely used in offshore oil and gas drilling rigs, refineries, and food processing facilities to create novel curved connections.

According to the aforementioned literature study, there is a knowledge gap in the understanding of two-phase flow transition in pipeline with two elbows. Such pipe structure is predominantly reported on offshore oil and natural gas processing facilities. This work seeks to provide a knowledge of two-phase flow (gas/water) pattern, and its behavior in the pipe with two elbows including slug and churn flow. The instability of two-phase gas-liquid flow is still one of the most important issues in the study of multiphase flows, whether it is done experimentally or numerically. CFD analysis for the flow and moving phase interaction can provide important information about the interaction of the two-phase gas-liquid flow and moving phase. It is a commonly used as an approach for multiphase flow modelling that includes accurate interfaces, such as layered flow patterns or slugs, and is known as volume of fluid method (VOF) [4, 15–19]. The Euler model was employed in this work, together with the multifluid VOF model. The multifluid-VOF model is one of the hybrid approaches that have been produced by combining the Two-Fluid approach with the Volume of Fluid (VOF) method proposed by Cerne [20]. The volume interface model is employed to analyze evolution prior to and following the emergence of multiphase flows with a various separation length of elbows.

MATERIALS AND METHODS

Simulations numerical

To simulate the slug and churn flow regimes and capture the interface between gas and liquid phases, this study used the Eulerian two-phase model along with the Multifluid-VOF model, an interface capture method in Ansys Fluent. The simplified modelling assumption of Interfacial Area Concentration (IAC) transport equation was used in this hybrid model to account for different bubble sizes, bubble breakage, and coalescence without delving into the details of bubble size distribution as in the population balance model.

Eulerian-Eulerian two-phase flow modelling

The phase continuity equations are:

$$\frac{\partial \rho_i \alpha_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = 0; \quad (1)$$

$$\sum_q^n \alpha_i = 1, \quad (2)$$

where α_i , ρ_i and \vec{v}_i are the volume fraction, density and velocity of the individual phases.

The momentum formulas for the stages are as follows:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i \vec{v}_i) = \\ = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot \tau_i + \alpha_i \rho_i \vec{g} + \vec{F}_{ij}, \end{aligned} \quad (3)$$

where p and τ_i are the pressure and stress-strain tensor of the individual phase, \vec{g} is acceleration due to gravity and \vec{F}_{ij} is the interfacial force between the phases.

The governing equation of the interfacial force \vec{F}_{ij} from equation (3) is given as:

$$\vec{F}_{ij} = K_{ij} (\vec{v}_i - \vec{v}_j), \quad (4)$$

where K_{ij} is the interphase momentum exchange coefficient between the phases. The second phase in Eulerian-Eulerian two-phase flows is considered as bubbles, and the interphase exchange coefficient is given by:

$$K_{ij} = \frac{\rho_i f}{6 \tau_i} X_p, \quad (5)$$

where X_p is the interfacial area concentration; f is the drag co-efficient and τ_i is the particle relaxation time given by:

$$\tau_i = \frac{\rho_i d_i^2}{18 \mu_j}. \quad (6)$$

To compute the drag coefficient f , the Schiller model is employed.

Eulerian-Eulerian two-phase flow modelling is needed to understand fluid behavior in pipes because it can track two different fluid phases simultaneously and predict flow pattern, pressure drop, velocity distribution, and phase holdup. This approach is necessary to optimize system design and operation in various industries.

Turbulence simulation

k – ε turbulence models with Re-Normalization Group (RNG) equations were used to model the processes in the pipe [21]. The RNG k – ε transfer formulas are as follows.

Kinetic Energy, k :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{v}_i) = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon. \end{aligned} \quad (7)$$

Dissipation rate, ε :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{v}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \\ + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon, \end{aligned} \quad (8)$$

where α_k and α_ε are given in which the inverse effective Prandtl numbers for k and ε respectively; G_k is the production of turbulent kinetic energy as a result of mean velocity gradients; $G_{1\varepsilon}$ and $C_{2\varepsilon}$ are 1.42 and 1.68; μ_{eff} is the effective viscosity. The effective viscosity is given by:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t, \text{ and } \mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}, \quad (9)$$

where G_μ is 0.085.

RNG k – ε is more precise and dependable over a broader range of flows. They are also more sensitive to the effects of fast strain and streamline deformation, making them ideal for flow through elbows [22]:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3 k}; \quad (10)$$

$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}; \quad \eta_0 = 4.38, \quad \beta = 0.012, \quad (11)$$

where S is strain rate of fluid flow.

The k – ε turbulence model with RNG is necessary to use in computational fluid dynamics (CFD) to accurately model the turbulence in confined flows such as pipes. It takes into account the effects of turbulence on fluid properties such as velocity and pressure. The model uses two transport equations to model kinetic energy and the rate of dissipation of turbulence. The RNG approach is used to improve the accuracy of the model in certain flow situations. Overall, the k – ε turbulence model with RNG is widely accepted and effective for predicting the behavior of fluid flows in pipes.

Mathematic approaches to solving problems

The governing equations for mass, velocity, phase volume fraction, and turbulence were numerically solved using Ansys Fluent version 2020R1. The simulations were three-dimensional and transient, with the assumption that the fluid and gas phases were immiscible and did not exchange mass. The upwind tech-

nique was used to discretize the velocity and turbulence equations, and the velocity and pressure equations were linked through the SIMPLE phase-coupled algorithm. The under-relaxation factor for pressure, momentum, and interfacial area density equations was set to 0.3, while the volume fraction was set at 0.5, and the turbulence kinetic energy and power dissipation rate equations were set at 0.6. The solutions were obtained using a transient method with a time interval of 0.001 s, and convergence was achieved when the particles of all equations were less than 106. Each time step required between ten and twenty iterations to achieve convergence.

Flow

The two elbows pipeline with a standardized gap distance (Length/Diameter) of 15 between two elbows were created in Ansys. There are three-meter vertical pipes and 2-meter horizontal pipes upstream and downstream of a typical 90-degree elbow, respectively, and fluid flows from an upward vertical to a horizontal direction, similar to the 3-D discrete mathematics employed by Parsi [23]. The pipe's diameter and the radius of the elbow's curve are both 0.0762 m and 1.5 of diameters, respectively. The input parameters of boundary conditions are represented in Table 1, regarding the pipe size, and the sand particles data.

Table 1. Input parameters for the calculation

Input parameters	Value
Pipe Diameter, mm	76.2
Elbow Radius of curvature	1.5
Sand Diameter, μm	300
Sand Density, kgm^{-3}	2,650
Sand Flow Rate, kg/s	0.0265
Gas velocity, m/s , in validation study	18.1
Gas velocity in churn flow, m/s	15.3
Gas velocity in slug flow, m/s	0.8
Liquid velocity, m/s	0.3

Boundary conditions

To define the boundary conditions for velocity-inlet and pressure-outlet, the researchers established conditions at both the inlet and outlet of the system. The wall was constructed using the conventional log-law method. The inlet was designed to have a 9 percent flow velocity. To facilitate faster flow development, the pipe intake surface was divided into two sections, as shown in Fig. 1, which is similar to the CFD simulation conducted by Parsi [23]. The diagram shows that the gas was introduced into the domain through the center of the inlet, while the liquid was added circumferentially. The velocities from formulas (1) and (2) were used to incorporate both the fluid and gas phases into the domain. Initially, the liquid phase was introduced

into the domain at a constant velocity of zero degrees Celsius and filled the entire space:

$$V_{inlet-gas} = \frac{V_{sg} A_p}{A_g}; \quad (12)$$

$$V_{inlet-liq} = \frac{V_{sl} A_p}{A_l}. \quad (13)$$

In this equation, V_{sg} as well as V_{sl} are the subsurface gas and liquid kinematics, A_p is the perimeter of the pipe, and A_g as well as A_l are the gas and liquid intake areas, respectively.

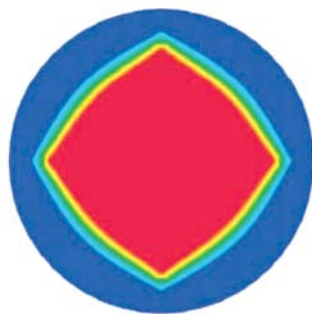


Fig. 1. Phase injection is accomplished through the intake, and the colors red and blue represent air and water, correspondingly

Creation of mesh

The mesh cells used in this study had an element size of 281,608 grids, according to the research made by Parsi which the mesh size of 236,250 was used for modelling in Ansys for particle tracking in multiphase flow [23]. Parsi used smaller mesh size due to lower computational expense, however, the bigger mesh size, the more accurate the result will be.

Conditions of flow

It was found that simulations are to implement for both single and double bend pipes under two different flow conditions, with superficial liquid and gas velocity values of 0.3 and 18.1 m/s, respectively. The gas and water phases of the experiment were air and water, correlatively. There are two types of fluid properties in vertical pipes for this study: slug and churn. Fig. 2, *a* shows the map of vertical fluid flow developed by Liu [24]. Fig. 2, *b* shows the flow conditions in horizontal pipes, which are closer to the elongated bubble/slug boundary and therefore include the slug and annular fluid flow. The points on the figures demonstrate the chosen velocity for case 1, and case 2.

RESULTS OF THE RESEARCH

Validation of a single elbow

Previously, Parsi conducted a study on void fraction at a location 1m before the elbow and published

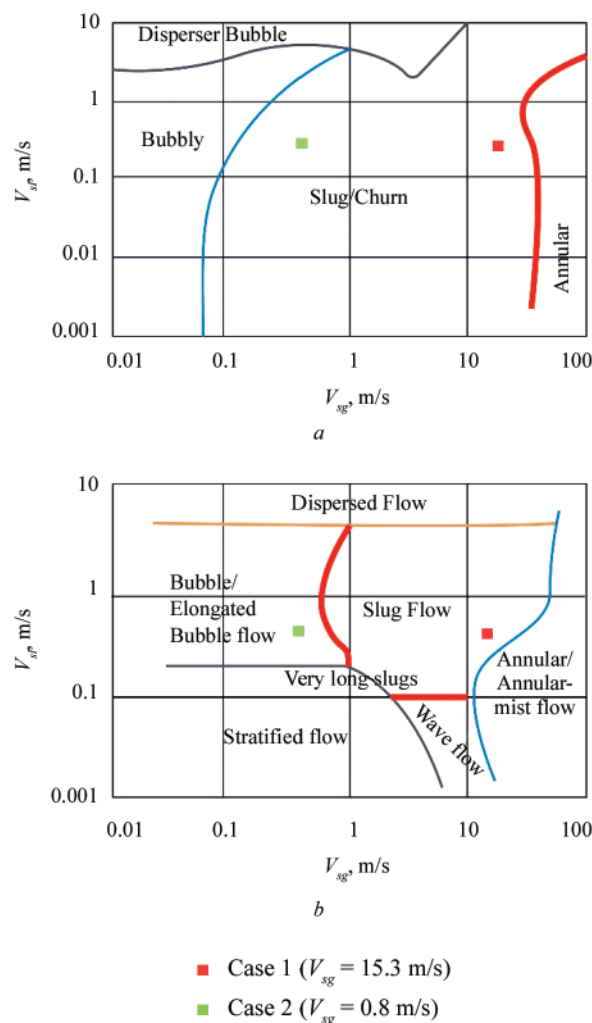


Fig. 2. The formation of the flow's structure multiphase flow: *a* — vertical pipes; *b* — horizontal pipes

a paper. The aim of the study was to compare experimental and modelling data to identify any discrepancies and validate the experiments. The surface gas velocity was 18.1 m/s, and the liquid surface velocity was 0.3 m/s. In Fig. 3, the average steam quality in a cycle section with an internal gas velocity V_{sg} of 18.1 m/s and a liquid velocity V_{sl} of 0.3 m/s was compared. Parsi presented experimental and numerical time series data on void fraction content [25], characterized by a high value of 0.9 representing the gas component with few drops and a low value of 0.2 representing the periodic transition of the liquid. The minimum void fraction decreases in the experimental and numerical data presented by Parsi was 0.69 and 0.73, respectively, while this study has a minimum volume fraction of 0.75. The maximum void fraction in the Parsi's experimental and CFD data was 0.97, while it was 0.98 in this study.

As can be seen in Fig. 3, when V_{sg} is 18.1 and V_{sl} is 0.3, the results of the current investigation and the experimental work of Parsi are in agreement. Thus, the next step is to investigate pipe with two elbows.

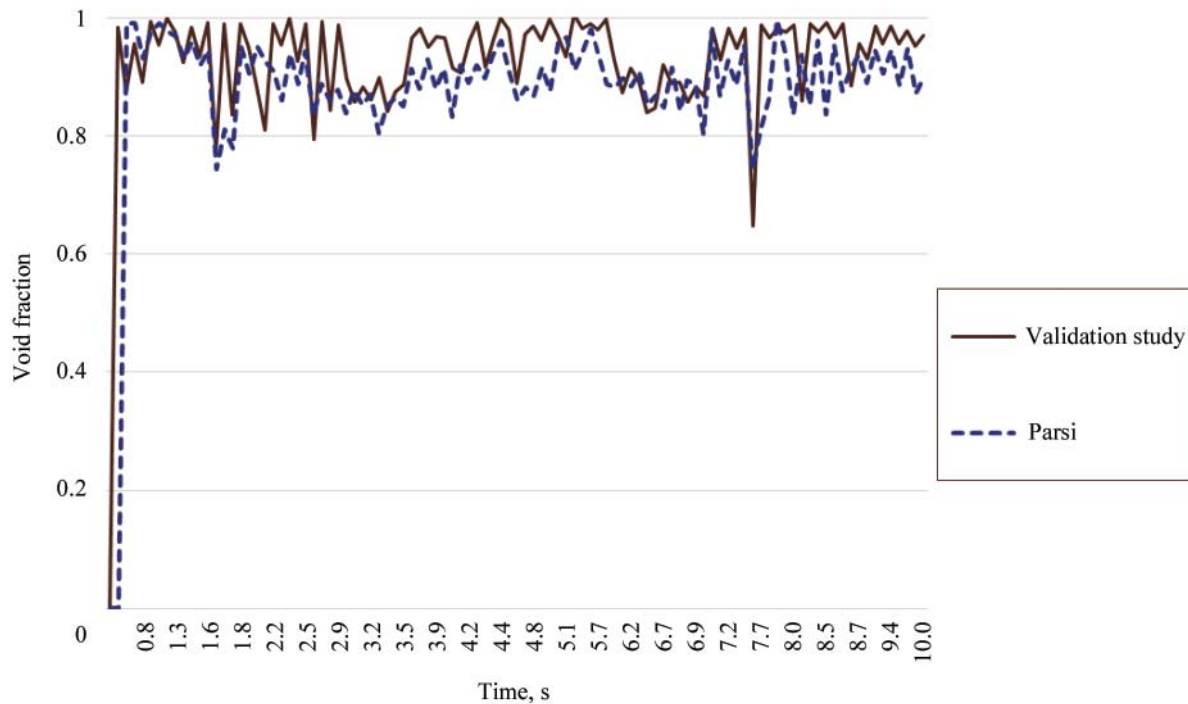


Fig. 3. Time series of averaged cross-sectional void fraction from Parsi's experiment and the current study of $V_{sg} = 18.1$ m/s and $V_{sl} = 0.3$ m/s

Geometries with two elbows and multiphase flows

This study investigated the velocity distribution of a multiphase slug/churn flow with a constant liquid velocity, considering two different gas velocities ranging from 0.8 to 15.3 m/s. The liquid velocity was fixed at 0.3 m/s. The study included four observation levels, and their positions are illustrated in Fig. 4.

Flow visualization

Case 1 and Case 2 contour are plots after 100 seconds of simulation time ($V_{sg} = 15.3$ m/s; $V_{sl} = 0.3$ m/s) which are shown in Fig. 5, *a*, *b*, respectively. Conurbation flows are used to differentiate flow rates upstream of Elbow 1 when the standardized separation distance is zero, as indicated by the contour plots. When running a churn flow, there are no clearly defined boundaries be-

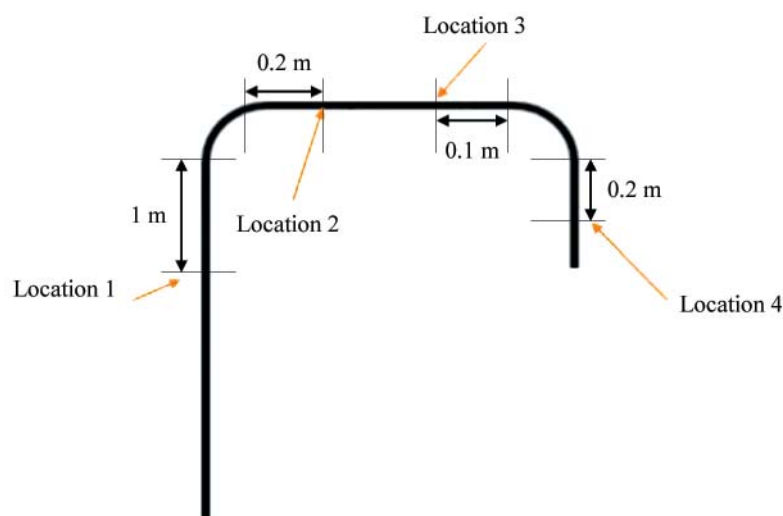


Fig. 4. Domains in the field of computation

tween the liquid and gas phases. This is despite the existence of oscillations and periodic gas cores [26, 27]. Some authors believe that this sort of flow is essentially annular in character, with massive perturbation waves transported by the gas flow; similarly to the findings of this study, massive waves in churn stream have also been reported by Parsi and Riva Col [16, 28].

The aim of this analysis was to investigate the multiphase flow behavior in the horizontal section following bend 1, with the standardized separation distance set at 15. The contour plots presented in Fig. 6 depict the mean void percentage over a homogeneous surface of the flow at a gas velocity of 15.3 m/s and a liquid velocity of 0.3 m/s. In the first bend, the gas and liquid phases split, forming a wavy stratified flow in the churn regime. As the relatively stable displace-

ment vector increases, a subtle but noticeable difference in the flow advancement in the cross pipe (between the elbows) is observed due to the effect of secondary flow and gravitational forces inside the elbow. When the length to diameter ratio (L/D) is equal to 15, the liquid phase flows behave more like a thin layer pushed towards the outer perimeter of the second elbow. Table 2 shows the constant flow development across the four flow sectors, which is influenced by various factors in the flow sectors spanning L/D equivalent to 15. The analysis reveals that the flow behaves more like annular flow in the transverse surface prior to the first elbow, as evidenced by the presence of gas. Whereas, the phases detach into a stratified flow at the outlet of the upstream elbow (elbow 1) as the flow traverses into the horizontal section after passing through elbow 1.

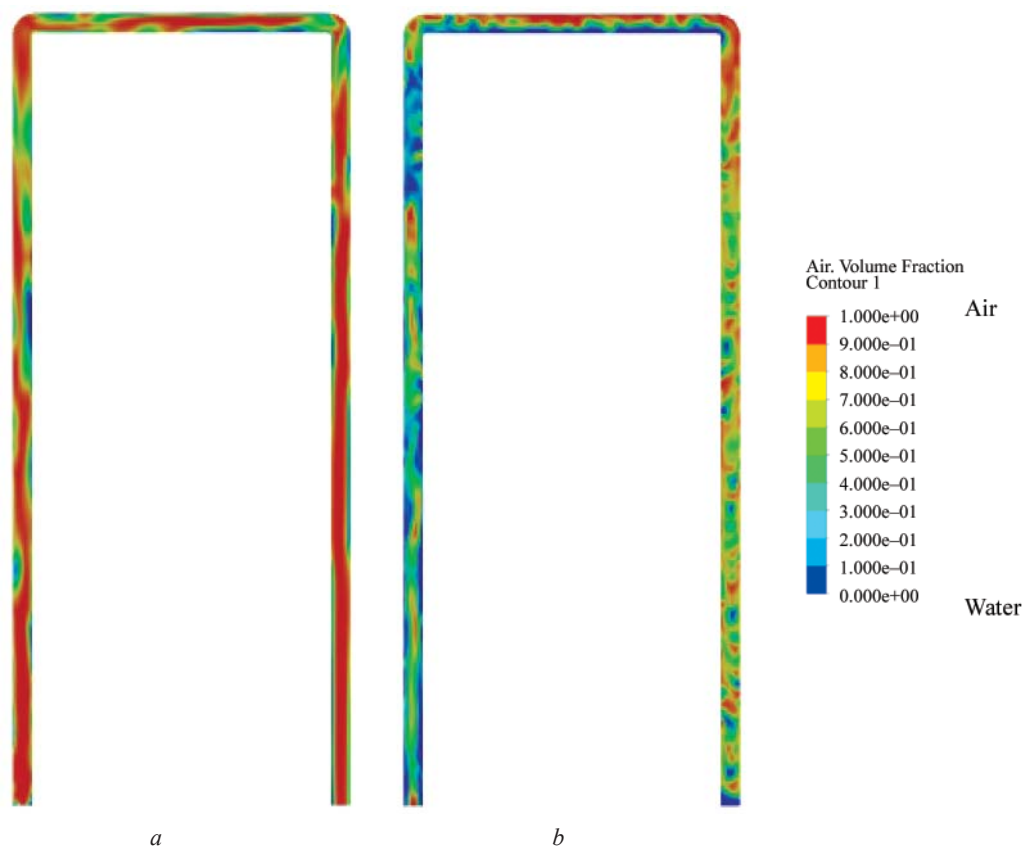
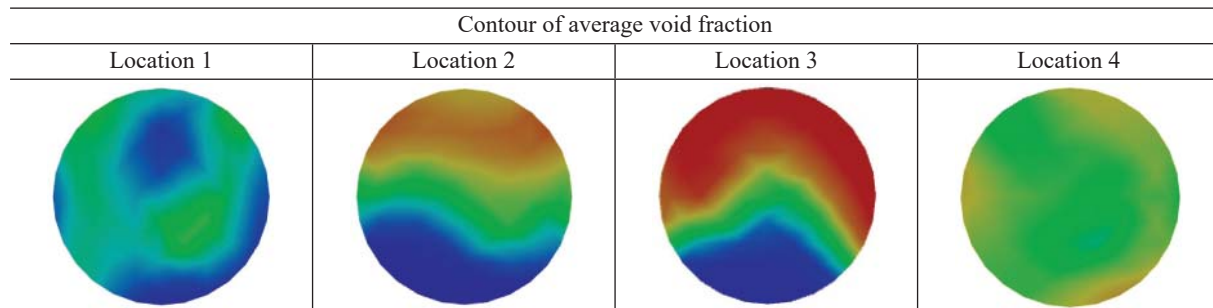


Fig. 5. Void fraction on the length of the pipeline under the conditions of different velocity of gas and water: Case *a* — Churn flow contour plot; Case *b* — Slug flow contour plot

Table 2. Contour graphs the monitoring cross-sections, of void fractions for the multiphase flow with gas velocity of 15.3 m/s

Contour of average void fraction			
Location 1	Location 2	Location 3	Location 4

Table 3. Contour graphs the monitoring cross-sections, of void fractions for the multiphase flow with gas velocity of 0.8 m/s



The analysis was conducted on a ten-second flow in the axis of symmetry, where the internal gas velocity was 0.8 m/s and the boundary fluid velocity was 0.3 m/s. The average void fraction content of the flow is presented in Table 3. The contour plot shows that the flow is divided horizontally, and the liquids in various portions of the pipe fill over 50 % of the fluid flow and part of the surface area including location 1, resulting in a sinusoidal shape of the gas phase. These parameters depict the slug's passage across the horizontal pipe, where the liquid slug at the pipe's bottom connects the gas phases in different locations including location 2 and 3, leading to the formation of air pockets referred to as Taylor bubbles. On location 4, we observe the huge bubble which demonstrates the churn flow.

The gas velocity for two different flow types, churn and slug flow, was measured and compared using monitoring points during a 100-second simulation, as shown in Fig. 6. The results of the analysis revealed that for churn flow, the gas velocity decreases as it moves towards the horizontal side of the pipeline, specifically at locations 2 and 3, while increasing in the vertical section. Conversely, the gas velocity for slug flow at locations 2 and 3, which represent the horizontal side of the pipe, is higher than in the vertical sections. Notably, for churn flow, the gas velocity at location 1 on the vertical pipe is higher than at location 4, whereas for slug flow, the velocity of gas at location 4 is higher than at location 1.

In summary, the findings suggest that the behavior of the gas flow varies depending on the flow type and the location within the pipeline. Churn flow exhibits a decrease in velocity as it moves towards the horizontal side, while slug flow displays higher gas velocity in these sections. Furthermore, the velocity of gas in churn flow is higher in the vertical pipe at location 1 compared to location 4, whereas for slug flow, the opposite is true. These insights can provide valuable information for designing and optimizing pipeline systems for improved performance.

Evaluation of different flow characteristics caused by double bend using quantitative methods

The development of two-phase flow induced by double bends was studied utilizing the area-average

void fraction throughout the length of the pipe, as well as the cumulative distribution function and probability density function. Statistical analysis of the behavior in void fraction is a method for elucidating flow patterns in a double bend pipe design. According to Costigan and Rezkallah [26], each two-phase flow pattern has a unique probability density function (PDF) of void percent. The PDF curve of churn flow has a solitary peak at high porous proportions and a wide tail at low void fractions. A single peak at high void percentage indicates that the flow is approaching annular flow, while the broad tail indicates the presence of unstable slugs. According to Lowe and Rezkallah, a typical churn flow PDF curve has an average void fraction ranging from 0.7 to 0.9. Conversely, slug flow displays two peaks in the PDF curve of the mean void fraction data set, with one peak at low aspect fraction and another at high void fraction. These peaks correspond to the passage of two distinct characteristics of slug flow; the Taylor bubble at high porosity and the fluid slug at low porosity. In this research, MATLAB's Ksdensity function was utilized to produce the Probability Density Function (PDF) features for average void fraction time series. Multiple researchers, such as Liu and Hanafizadeh, have used this method [29], Ye and Guo [30], Franca [31], and Bouyahiaoui [32] have also employed PDF to denote distinct flow regimes.

The study was conducted by positioning the reference point at four different locations, namely 1.1 m before the first elbow, 0.2 m after the first elbow, 0.7 m after the first elbow, and 0.2 m after the second elbow. The contour plots in Fig. 7 show that the periodic fluctuations observed in the flow instability and uncertainty can be attributed to the complex interconnections between the liquid and gas phases in these flow circumstances.

The results indicate that there is a drop in the monitored surface as the liquid structure passes through it, with more droplets being produced as more liquid flows through the control surface. On the other hand, the liquid phase expands in response to the rising apparent gas velocity, resulting in a massive disturbance wave. The amplitude of the time series grows in proportion to the flow inflation level.

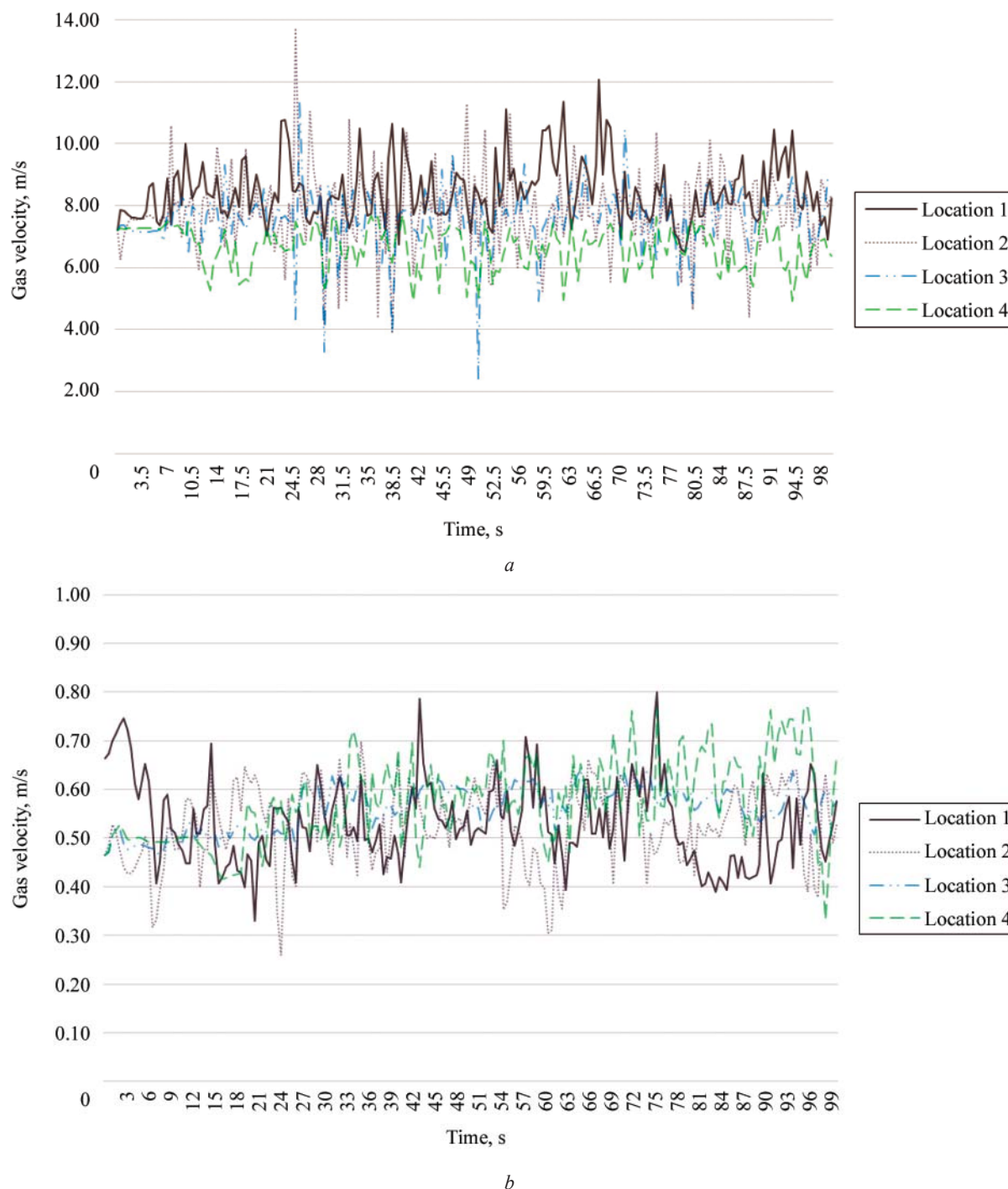


Fig. 6. Velocity of gas in all cross-section locations for churn and slug flow: *a* — gas velocity of initial condition 15.3 m/s; *b* — gas velocity of initial condition 0.8 m/s

In addition, the experiment revealed the occurrence of intermittent flow or cross flow between the slug flow and the circulation flow, which are normal features. These cross-flows can cause disturbances in the flow, resulting in periodic fluctuations and instability. Understanding the complex interconnections between the liquid and gas phases is essential for accurately modelling multiphase flow in such circumstances. Furthermore, the results indicate that in churn flow, a large water bubble is transported through

the pipe in a more periodic manner, while in slug flow, the movement of water bubbles is observed more frequently. Churn flow is characterized by large water bubbles that are carried through the pipe in a cyclical or periodic manner, often accompanied by a frothy layer of air or gas. On the other hand, slug flow is defined by the movement of elongated or cylindrical water bubbles, which move through the pipe intermittently and can cause significant pressure fluctuations and flow instabilities.

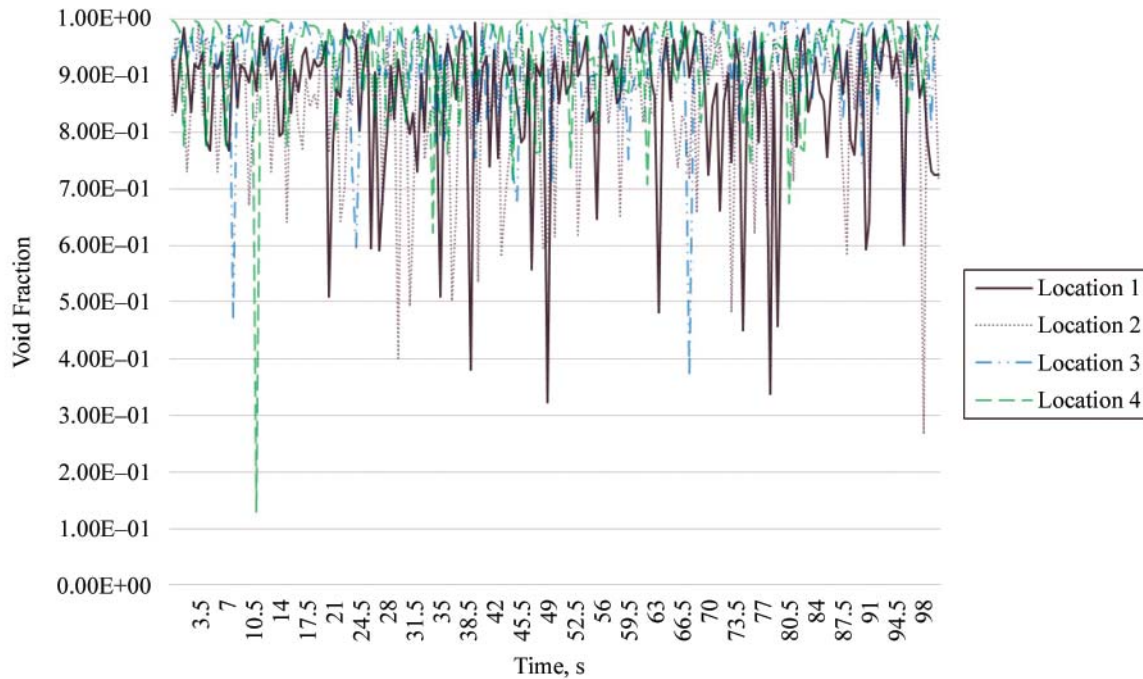


Fig. 7. Time series of the cross-sectional averaged void fraction ($V_{sl} = 0.3$ m/s and $V_{sg} = 15.3$ m/s)

The graph in Fig. 8 clearly displays the time-dependent behavior of the average steam performance in low surface gas velocity conditions. The periodic variations in the performance can be attributed to the discontinuous flows of gas and liquid phases across the monitoring plane, as shown in the cross-sectional image. The high values of the performance metric indicate

that a large amount of air or gas has passed through, which occurs when the Taylor bubbles, mentioned earlier, pass through the monitoring surface. On the other hand, the low values of the performance metric indicate the passage of fluid slugs with low porosity.

It should be noted that these variations in steam performance are influenced by various factors such as

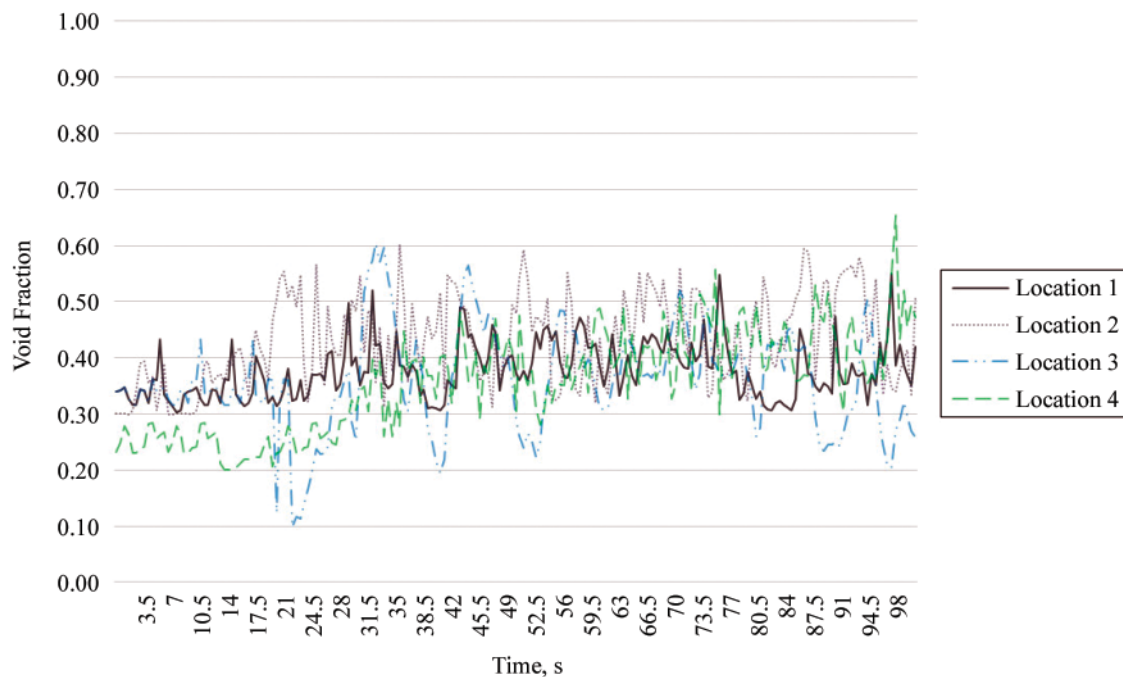


Fig. 8. Averaged void fraction time series across cross-sections ($V_{sl} = 0.3$ m/s and $V_{sg} = 0.8$ m/s)

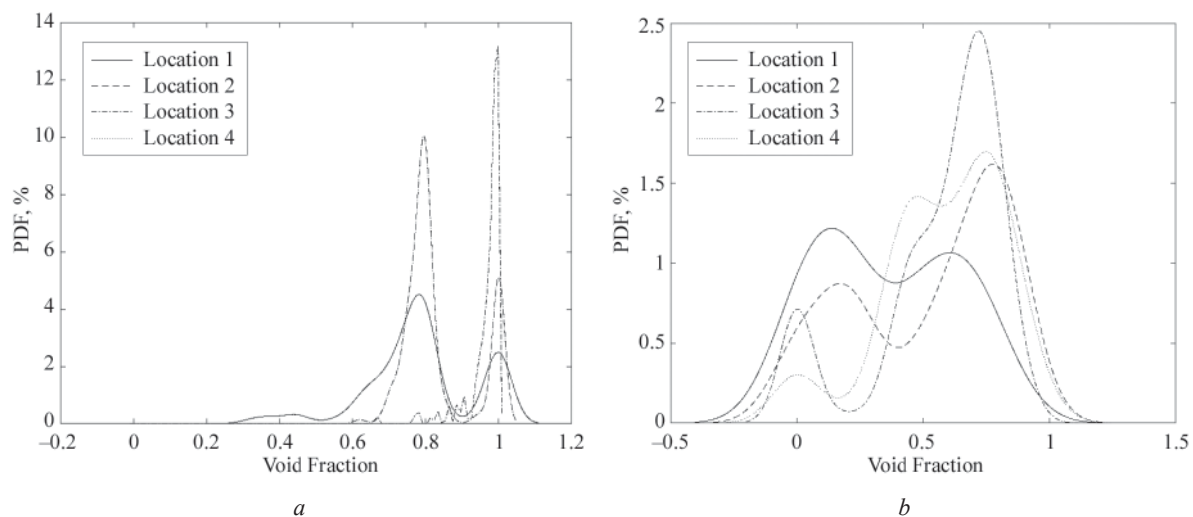


Fig. 9. Demonstrates the PDF for: *a* — churn flow; *b* — slug flow

the velocity of the gas and liquid phases, the cross-sectional area of the pipe, and the presence of any obstructions or bends in the pipe. These factors can cause significant changes in the flow pattern, resulting in complex behavior and periodic fluctuations in the performance metric.

Understanding the behavior of these multiphase flows is critical for the design and optimization of various industrial processes, such as chemical reactors and oil pipelines. Therefore, further studies are needed to explore the intricate dynamics of multiphase flows and develop accurate models that can predict their behavior under different operating conditions.

When the peaks in the inclination angles are high, it is an indication of turbulent flow, and there is no clear distinction between phases. However, when the peaks are low and sustained for a short period of time, it is indicative of bubble deformation flow. The PDF curve, in this case, shows a large peak at porous structure and a wide body at low porosity, which is a characteristic feature of bubble deformation flow.

On the other hand, when the flow is on the verge of becoming annular, it is reflected in the PDF curve as having a single summit with a large proportion of empty space. In contrast, when unstable slugs pass through the flow, the PDF curve shows a broad tail.

In the case of slug flow, the probability density function (PDF) of the transitional air portion of the time series exhibits multiple peaks. One peak is at small pores, while the other is at highly porous, indicating the presence of slug-like flow. These peaks represent the periodic passing of the two features of slug flow, namely, Taylor bubbles for high porosity and liquid slugs for low porosity. Furthermore, the flow data in the investigated slug flow patterns are spread across two PDF peaks because the flow transitions from primary slug flow to Taylor bubble flow as it ex-

pands. As a result, the proportion of voids in the slug to voids in the Taylor bubble increases. Fig. 9 illustrates the PDF curve for the slug flow patterns studied in this research.

In summary, the PDF curves provide valuable insights into the nature of multiphase flow patterns, such as slug flow and bubble deformation flow. By examining the peaks and widths of the curves, it is possible to discern the characteristics of the flow and the transitions between different flow regimes.

CONCLUSION

The simulation results have revealed significant insights into the behavior of different flow patterns in the pipeline system. Specifically, the initial churn flow observed in the upper vertical portion of the pipeline was found to transform into a wavy stratified flow in the horizontal section between the two elbows. This transition can be attributed to the changes in the flow dynamics resulting from the geometry of the pipe and the interaction between gas and liquid phases. Subsequently, the flow pattern was observed to transition into a wavy annular flow in the vertical pipe after the second elbow.

In contrast, the slug flow pattern remained unchanged after the first elbow. However, it was observed that the Taylor bubbles were longer in the horizontal portion between the first and second elbows. Additionally, the initial slug flow in the upper vertical portion continued as slug flow throughout the horizontal and downward vertical sections following the bend. These findings have significant implications for the design of various industrial applications such as boiling/condensing heat exchangers, new integrated bend/T-junction separators, and oil and gas pipelines in offshore processing platforms. A better understanding of the flow behavior can help improve the efficiency and reliability of these systems, reduce operational costs, and minimize the risk of accidents.

REFERENCES

1. Asgharpour A., Zahedi P., Vieira R., Parsi M., Shirazi S.A., McLaury B.S. Investigation of churn/annular and pseudo-slug flow characteristics before and after pipe elbows. *11th North American Conference on Multiphase Production Technology*. 2018.
2. Doroshenko Y., Doroshenko J., Zapukhliak V., Poberezhny L., Maruschak P. Modeling computational fluid dynamics of multiphase flows in elbow and T-junction of the main gas pipeline. *Transport*. 2019; 34(1):19-29. DOI: 10.3846/transport.2019.7441
3. Zhao D., Omar R., Abdulkadir M., Abdulkareem L.A., Azzi A., Saidj F. et al. The control and maintenance of desired flow patterns in bends of different orientations. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2017; 53:230-242. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2016.09.003
4. Parsi M. *Sand particle erosion in vertical slug/churn flow*. The University of Tulsa, 2015; 175.
5. De Kerpel K., De Keulenaer T., De Schampheleire S., De Paepe M. Capacitance sensor measurements of upward and downward two-phase flow in vertical return bends. *International Journal of Multiphase Flow*. 2014; 64:1-10. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.04.003
6. Abdulkadir M., Zhao D., Azzi A., Lowndes I.S., Azzopardi B.J. Two-phase air–water flow through a large diameter vertical 180° return bend. *Chemical Engineering Science*. 2012; 79:138-152. DOI: 10.1016/j.ces.2012.05.029
7. Vieira R.E., Kesana N.R., McLaury B.S., Shirazi S.A., Torres C.F., Schleicher E. et al. Experimental investigation of the effect of 90 standard elbow on horizontal gas–liquid stratified and annular flow characteristics using dual wire-mesh sensors. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014; 59:72-87. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.08.001
8. Suleymanov V.A., Buznikov N.A. Multiphase flow assurance in an extensional subsea pipeline: effects of the transported fluid composition and the pipeline route profile. *SOCAR Proceedings. Transportation, Storage of Oil and Gas*. 2021; 3:92-99. DOI: 10.5510/OGP20210300534 (rus.).
9. Gromov V.A., Semenov T.V., Yashnik I.L., Petrov A.M. New generation measuring and computing complex for diagnosing thermodynamic processes of multiphase flows in pipelines. *Scientific Bulletin of the Arctic*. 2022; 13:101-105. DOI: 10.52978/25421220_2022_13_101–105 (rus.).
10. Serov N.V., Kurushina V.A. Modelling the effect of pipeline inclination on the multiphase flow regime. *Architecture, Construction, Transport*. 2022; 1(99):88-95. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-1-88-95 (rus.).
11. Buznikov N.A., Suleymanov V.A., Trofimov I.A. Influence of hydrate inhibitor choice on flow assurance in long subsea multiphase pipelines. *Pipeline Transport: Theory and Practice*. 2018; 1(65): 34-38. (rus.).
12. Kopteva A.V., Koptev V.Yu., Poddubnyi D.A. Information support for the process of multiphase flows transportation based on the introduction of a radioisotope non-separation hydrocarbon measuring system. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2019; 7(2):220-226. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-220-226 (rus.).
13. Taherifard A., Elistratov V.V. Numerical modeling of erosion in a pipe with a multiphase flow of oil and gas. *Izvestiya VNIIG named after B.E. Vedeneva*. 2023; 307:16-28. (rus.).
14. Taherifard A., Elistratov V.V. 3D Modelling of double elbow pipeline erosion in methane – water – sand multiphase medium. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(5):717-725. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.717-725 (rus.).
15. Karami H., Torres C.F., Parsi M., Pereyra E., Sarica C. CFD simulations of low liquid loading multiphase flow in horizontal pipelines. *Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2014; V002T06A011. DOI: 10.1115/fedsm2014-21856
16. Bortolin S., Da Riva E., Del Col D. Condensation in a square minichannel: application of the VOF method. *Heat Transfer Engineering*. 2014; 35(2):193-203. DOI: 10.1080/01457632.2013.812493
17. Hernandez-Perez V., Abdulkadir M., Azzopardi B.J. Grid generation issues in the CFD modelling of two-phase flow in a pipe. *The Journal of Computational Multiphase Flows*. 2011; 3(1):13-26. DOI: 10.1260/1757-482x.3.1.13
18. Ratkovich N.R., Majumder S.K., Bentzen T.R. Empirical correlations and CFD simulations of vertical two-phase gas–liquid (Newtonian and non-Newtonian) slug flow compared against experimental data of void fraction. *Chemical Engineering Research and Design*. 2013; 91(6):988-998. DOI: 10.1016/j.cherd.2012.11.002
19. Saad S.B., Gentric C., Fourmigué J.-F., Clement P., Leclerc J.-P. CFD and experimental investigation of the gas–liquid flow in the distributor of a compact heat exchanger. *Chemical Engineering Research and Design*. 2014; 92(11):2361-2370. DOI: 10.1016/j.cherd.2014.02.002
20. Cerne G., Petelin S., Tiselj I. Coupling of the interface tracking and the two-fluid models for the simulation of incompressible two-phase flow. *Journal of Computational Physics*. 2001; 171(2):776-804. DOI: 10.1006/jcph.2001.6810
21. Yakhot V., Orszag S.A., Thangam S., Gatski T.B., Speziale C. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique.

Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. 1992; 4(7):1510-1520. DOI: 10.1063/1.858424

22. Ferziger J.H. Large eddy simulation. *Simulation and Modeling of Turbulent Flows*. 1996. DOI: 10.1093/oso/9780195106435.003.0007

23. Parsi M., Agrawal M., Srinivasan V., Vieira R.E., Torres C.F., McLaury B.S. et al. CFD simulation of sand particle erosion in gas-dominant multiphase flow. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015; 27:706-718. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.09.003

24. Liu Y., Miwa S., Hibiki T., Ishii M., Morita H., Kondoh Y. et al. Experimental study of internal two-phase flow induced fluctuating force on a 90° elbow. *Chemical Engineering Science*. 2012; 76:173-187. DOI: 10.1016/j.ces.2012.04.021

25. Parsi M., Agrawal M., Srinivasan V., Vieira R.E., Torres C.F., McLaury B.S. et al. Assessment of a hybrid CFD model for simulation of complex vertical upward gas-liquid churn flow. *Chemical Engineering Research and Design*. 2016; 105:71-84. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.10.044

26. Costigan G., Whalley P.B. Slug flow regime identification from dynamic void fraction measurements in vertical air-water flows. *International Journal of Multiphase Flow*. 1997; 23(2):263-282. DOI: 10.1016/S0301-9322(96)00050-X

27. Lowe D.C., Rezkallah K.S. Flow regime identification in microgravity two-phase flows using void

fraction signals. *International Journal of Multiphase Flow*. 1999; 25(3):433-457. DOI: 10.1016/S0301-9322(98)00058-5

28. Parsi M., Vieira R.E., Torres C.F., Kesana N.R., McLaury B.S., Shirazi S.A. et al. Characterizing slug/churn flow using wire mesh sensor. *Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2014. DOI: 10.1115/FEDSM2014-21678

29. Hanafizadeh P., Eshraghi J., Taklifi A., Ghanbarzadeh S. Experimental identification of flow regimes in gas-liquid two phase flow in a vertical pipe. *Mechanica*. 2016; 51(8):1771-1782. DOI: 10.1007/s11012-015-0344-4

30. Ye J., Guo L. Multiphase flow pattern recognition in pipeline-riser system by statistical feature clustering of pressure fluctuations. *Chemical Engineering Science*. 2013; 102:486-501. DOI: 10.1016/j.ces.2013.08.048

31. Franca F., Acikgoz M., Lahey R.T., Clausse A. The use of fractal techniques for flow regime identification. *International Journal of Multiphase Flow*. 1991; 17(4):545-552. DOI: 10.1016/0301-9322(91)90049-9

32. Bouyahiaoui H., Azzi A., Zeghloul A., Hassan A.H., Al-Sarkhi A., Parsi M. Vertical upward and downward churn flow: similarities and differences. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020; 73:103080. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.103080

Received November 27, 2022.

Adopted in revised form on March 24, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

BIONOTES: Alireza Taherifard — postgraduate student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); 29 Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; Scopus: 57191530010, ORCID: 0000-0001-5973-7419; taherifard.a@edu.spbstu.ru;

Viktor V. Elistratov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Higher School of Hydrotechnical and Power Engineering; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); 29 Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; elistratov@spbstu.ru.

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

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Asgharpour A., Zahedi P., Vieira R., Parsi M., Shirazi S.A., McLaury B.S. Investigation of churn/annular and pseudo-slug flow characteristics before and after pipe elbows // 11th North American Conference on Multiphase Production Technology. 2018.

2. Doroshenko Y., Doroshenko J., Zapukhliak V., Poberezhny L., Maruschak P. Modeling computational fluid dynamics of multiphase flows in elbow and T-junction of the main gas pipeline // Transport. 2019. Vol. 34. Issue 1. Pp. 19–29. DOI: 10.3846/transport.2019.7441

3. Zhao D., Omar R., Abdulkadir M., Abdulkareem L.A., Azzi A., Saidj F. et al. The control and maintenance of desired flow patterns in bends of different orientations // Flow Measurement and Instrumentation. 2017. Vol. 53. Pp. 230–242. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2016.09.003

4. Parsi M. Sand particle erosion in vertical slug/churn flow. The University of Tulsa, 2015. 175 p.

5. De Kerpel K., De Keulenaer T., De Schampheleire S., De Paepe M. Capacitance sensor measurements of upward and downward two-phase flow in vertical re-

turn bends // *International Journal of Multiphase Flow*. 2014. Vol. 64. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.04.003

6. *Abdulkadir M., Zhao D., Azzi A., Lowndes I.S., Azzopardi B.J.* Two-phase air–water flow through a large diameter vertical 180° return bend // *Chemical Engineering Science*. 2012. Vol. 79. Pp. 138–152. DOI: 10.1016/j.ces.2012.05.029

7. *Vieira R.E., Kesana N.R., McLaury B.S., Shirazi S.A., Torres C.F., Schleicher E. et al.* Experimental investigation of the effect of 90 standard elbow on horizontal gas–liquid stratified and annular flow characteristics using dual wire-mesh sensors // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014. Vol. 59. Pp. 72–87. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.08.001

8. *Сулейманов В.А., Бузников Н.А.* Обеспечение бесперебойности многофазного потока в протяженном морском трубопроводе: влияние состава транспортируемого флюида и профиля трассы трубопровода // *SOCAR Proceedings. Transportation, Storage of Oil and Gas*. 2021. № 3. С. 92–99. DOI: 10.5510/OGP20210300534

9. *Громов В.А., Семенов Т.В., Яшник И.Л., Петров А.М.* Измерительно-вычислительный комплекс нового поколения для диагностики термодинамических процессов многофазных потоков в трубопроводах // *Научный вестник Арктики*. 2022. № 13. С. 101–105. DOI: 10.52978/25421220_2022_13_101–105

10. *Серов Н.В., Курушина В.А.* Моделирование влияния положения трубопровода на режим многофазного потока // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2022. № 1 (99). С. 88–95. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-1-88-95

11. *Бузников Н.А., Сулейманов В.А., Трофимов И.А.* Влияние выбора ингибитора гидратообразования на обеспечение бесперебойности потока в протяженных морских трубопроводах многофазного флюида // *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. 2018. № 1 (65). С. 34–38.

12. *Коптева А.В., Коптев В.Ю., Поддубный Д.А.* Информационное обеспечение процесса транспортирования многофазных потоков на основе внедрения радиоизотопной бессепарационной системы учета углеводородов // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2019. Т. 7. № 2. С. 220–226. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-220-226

13. *Тахерифард А., Елистратов В.В.* Численное моделирование эрозии в трубе при многофазном потоке нефти и газа // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 2023. Т. 307. С. 16–28.

14. *Тахерифард А., Елистратов В.В.* Трехмерное моделирование эрозии трубопровода с двойным коленом в многофазной среде метан – вода – песок // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 5. С. 717–725. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.717-725

15. *Karami H., Torres C.F., Parsi M., Pereyra E., Sarica C.* CFD simulations of low liquid loading multi-

phase flow in horizontal pipelines // *Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2014. P. V002T06A011. DOI: 10.1115/fedsm2014-21856

16. *Bortolin S., Da Riva E., Del Col D.* Condensation in a square minichannel: application of the VOF method // *Heat Transfer Engineering*. 2014. Vol. 35. Issue 2. Pp. 193–203. DOI: 10.1080/01457632.2013.812493

17. *Hernandez-Perez V., Abdulkadir M., Azzopardi B.J.* Grid generation issues in the CFD modelling of two-phase flow in a pipe // *The Journal of Computational Multiphase Flows*. 2011. Vol. 3. Issue 1. Pp. 13–26. DOI: 10.1260/1757-482x.3.1.13

18. *Ratkovich N.R., Majumder S.K., Bentzen T.R.* Empirical correlations and CFD simulations of vertical two-phase gas–liquid (Newtonian and non-Newtonian) slug flow compared against experimental data of void fraction // *Chemical Engineering Research and Design*. 2013. Vol. 91. Issue 6. Pp. 988–998. DOI: 10.1016/j.cherd.2012.11.002

19. *Saad S.B., Gentric C., Fourmigué J.-F., Clement P., Leclerc J.-P.* CFD and experimental investigation of the gas–liquid flow in the distributor of a compact heat exchanger // *Chemical Engineering Research and Design*. 2014. Vol. 92. Issue 11. Pp. 2361–2370. DOI: 10.1016/j.cherd.2014.02.002

20. *Cerne G., Petelin S., Tiselj I.* Coupling of the interface tracking and the two-fluid models for the simulation of incompressible two-phase flow // *Journal of Computational Physics*. 2001. Vol. 171. Issue 2. Pp. 776–804. DOI: 10.1006/jcph.2001.6810

21. *Yakhot V., Orszag S.A., Thangam S., Gatski T.B., Speziale C.* Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique // *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*. 1992. Vol. 4. Issue 7. Pp. 1510–1520. DOI: 10.1063/1.858424

22. *Ferziger J.H.* Large eddy simulation // *Simulation and Modeling of Turbulent Flows*. 1996. DOI: 10.1093/oso/9780195106435.003.0007

23. *Parsi M., Agrawal M., Srinivasan V., Vieira R.E., Torres C.F., McLaury B.S. et al.* CFD simulation of sand particle erosion in gas-dominant multiphase flow // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015. Vol. 27. Pp. 706–718. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.09.003

24. *Liu Y., Miwa S., Hibiki T., Ishii M., Morita H., Kondoh Y. et al.* Experimental study of internal two-phase flow induced fluctuating force on a 90° elbow // *Chemical Engineering Science*. 2012. Vol. 76. Pp. 173–187. DOI: 10.1016/j.ces.2012.04.021

25. *Parsi M., Agrawal M., Srinivasan V., Vieira R.E., Torres C.F., McLaury B.S. et al.* Assessment of a hybrid CFD model for simulation of complex vertical upward gas–liquid churn flow // *Chemical Engineering Research and Design*. 2016. Vol. 105. Pp. 71–84. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.10.044

26. *Costigan G., Whalley P.B.* Slug flow regime identification from dynamic void fraction measurements

in vertical air-water flows // *International Journal of Multiphase Flow*. 1997. Vol. 23. Issue 2. Pp. 263–282. DOI: 10.1016/s0301-9322(96)00050-x

27. Lowe D.C., Rezkallah K.S. Flow regime identification in microgravity two-phase flows using void fraction signals // *International Journal of Multiphase Flow*. 1999. Vol. 25. Issue 3. Pp. 433–457. DOI: 10.1016/s0301-9322(98)00058-5

28. Parsi M., Vieira R.E., Torres C.F., Kesana N.R., McLaury B.S., Shirazi S.A. et al. Characterizing slug/churn flow using wire mesh sensor // *Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2014. DOI: 10.1115/FEDSM2014-21678

29. Hanafizadeh P., Eshraghi J., Taklifi A., Ghanbarzadeh S. Experimental identification of flow regimes in gas-liquid two phase flow in a vertical pipe //

Meccanica. 2016. Vol. 51. Issue 8. Pp. 1771–1782. DOI: 10.1007/s11012-015-0344-4

30. Ye J., Guo L. Multiphase flow pattern recognition in pipeline-riser system by statistical feature clustering of pressure fluctuations // *Chemical Engineering Science*. 2013. Vol. 102. Pp. 486–501. DOI: 10.1016/j.ces.2013.08.048

31. Franca F., Acikgoz M., Lahey R.T., Clausse A. The use of fractal techniques for flow regime identification // *International Journal of Multiphase Flow*. 1991. Vol. 17. Issue 4. Pp. 545–552. DOI: 10.1016/0301-9322(91)90049-9

32. Bouyahiaoui H., Azzi A., Zeghloul A., Hasan A.H., Al-Sarkhi A., Parsi M. Vertical upward and downward churn flow: similarities and differences // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 73. P. 103080. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.103080

Поступила в редакцию 27 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 24 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Алиреза Тахерифард** — аспирант; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; Scopus: 57191530010, ORCID: 0000-0001-5973-7419; taherifard.a@edu.spbstu.ru;

Виктор Васильевич Елистратов — доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; elistratov@spbstu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 627.8

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.917-926

Влияние факторов на фильтрационный режим земляной плотины при сработке верхнего бьефа

Николай Алексеевич Анискин, Андрей Владимирович Ступивцев*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Как показывает статистика наблюдений за грунтовыми водоподпорными сооружениями, одним из самых значимых факторов, вызывающих возникновение аварийных ситуаций в этих сооружениях, является возникновение в теле плотины фильтрационных деформаций. Часто следствием этого становится появление ходов сосредоточенной фильтрации. Спровоцировать возникновение этих явлений может быстрое понижение уровня верхнего бьефа (ВБ), называемое сработкой водохранилища. Она может быть вызвана технологическими требованиями эксплуатации гидроузла или аварийной ситуации. Современные нормы проектирования требуют обязательного рассмотрения случая быстрой сработки с оценкой фильтрационного режима и устойчивости сооружения.

Материалы и методы. Рассматриваются результаты численных исследований неуставившейся фильтрации в однородной земляной плотине при сработке водохранилища. Численные исследования проведены на основе метода конечных элементов с помощью программного комплекса (ПК) PRAXIS. Выполнены тестовые расчеты, показавшие достоверность полученных результатов. Анализируется влияние коэффициента фильтрации грунта плотины, скорости сработки и заложения откоса сооружения на изменение положения депрессионной кривой и величину максимального градиента напора.

Результаты. Для рассмотренных вариантов грунтовых плотин с разными характеристиками получены параметры фильтрационного потока при изменении уровня ВБ: положения депрессионной кривой и величины максимальных градиентов напора. Дана оценка возможности появления фильтрационных деформаций грунтов верховой призмы плотины.

Выводы. Использование ПК PRAXIS для решения задач неуставившейся фильтрации при изменении уровней бьефов позволяет получить достоверные результаты, хорошо сопоставимые с результатами других апробированных методов. При определенных скоростях сработки для грунтов различной проницаемости в верховой призме грунтовой плотины возможно возникновение больших значений градиентов напора, превышающих критические значения. Это говорит о необходимости контроля процесса сработки и применения противофильтрационных мероприятий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неуставившаяся фильтрация, сработка водохранилища, градиент фильтрации, фильтрационные деформации, депрессионная поверхность, коэффициент фильтрации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Анискин Н.А., Ступивцев А.В. Влияние факторов на фильтрационный режим земляной плотины при сработке верхнего бьефа // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 917–926. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.917-926

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Анискин, aniskin@mgsu.ru.

Influence of factors on filtration regime of an earth dam under headwater drawdown

Nikolai A. Aniskin, Andrey V. Stupivtsev*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. As the statistics of observations of groundwater retaining structures shows, one of the most significant factors of emergencies in these structures is the occurrence of filtration deformations in the dam body. This often results in the appearance of moves of concentrated filtration. The occurrence of these phenomena can be provoked by a rapid decrease of the headwater level known as reservoir drawdown. It can be caused either by the technological requirements of the operation of the hydraulic unit or by the occurrence of an emergency situation. Modern design standards require mandatory consideration of the case of rapid drawdown with an assessment of the filtration regime and stability of the structure.

Materials and methods. The results of numerical studies of unsteady filtration in a homogeneous earth dam under reservoir drawdown are considered. Numerical studies were carried out on the basis of the finite element method using the PRAXIS software package. Test calculations were carried out, which showed the reliability of the results obtained. The influence of the soil filtration coefficient of the dam, the rate of drawdown and the slope of the structure on the change in the position of the depression curve and the value of the maximum pressure gradient is analyzed.

Results. For the considered variants of earth dams with different characteristics, the parameters of the filtration flow are obtained when the headwater level changes: the position of the depression curve and the values of the maximum pressure gradients. An assessment of the possibility of occurrence of filtration deformations of soils of the upper prism of the dam is given. **Conclusions.** The use of the PLAXIS software package for solving problems of unsteady filtration under reservoir level changes allows to obtain reliable results that are well comparable with the results of other proven methods. At certain rates of runoff for soils of different permeability in the upper prism of an earth dam, large values of pressure gradients exceeding critical values may occur. This indicates the necessity to control the process of drawdown and the use of antifiltration measures.

KEYWORDS: unsteady filtration, reservoir drawdown, filtration gradient, filtration deformations, depression surface, filtration coefficient

FOR CITATION: Aniskin N.A., Stupitshev A.V. Influence of factors on filtration regime of an earth dam under headwater drawdown. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):917-926. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.917-926 (rus.).

Corresponding author: Nikolai A. Aniskin, aniskin@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Как показывает статистика, вторым по значимости фактором (после перелива воды через гребень), вызывающим аварии на грунтовых плотинах, являются фильтрационные деформации грунтов и возникновение в теле плотин сосредоточенной фильтрации [1, 2]. Эти процессы могут быть следствием ошибок в проектировании, технологии возведения и эксплуатации сооружений.

При эксплуатации грунтовых водоподпорных сооружений часто происходит изменение уровня верхнего бьефа (ВБ). Оно может быть вызвано как технологическими требованиями эксплуатации гидроузла (например, при работе ГЭС в меженный период), так и необходимостью снижения уровня воды в ВБ при аварийной ситуации. Снижение уровня ВБ (сработка водохранилища) приводит к изменению нагрузок, влияющих на устойчивость откоса грунтовой плотины. При этом условия чаще всего ухудшаются (особенно при быстрой сработке на большую величину) [3, 4]. Сработка ведет к изменению фильтрационного режима грунтового сооружения: меняется положение депрессионной поверхности, фильтрационные градиенты и направление скоростей фильтрационного потока. В верховой призме грунтовой плотины появляется объемная гидродинамическая нагрузка, действующая в сторону ВБ и снижающая устойчивость откоса [3, 4]. Увеличение фильтрационных градиентов может привести к возникновению фильтрационных деформаций в массиве грунта или на поверхности откоса верховой призмы [5, 6]. В практике гидротехники известно множество случаев возникновения аварийных ситуаций, связанных с понижением уровня воды водохранилища [7, 8]. Степень изменений устойчивости конструкции и фильтрационного режима зависят от нескольких факторов: проницаемости грунтов верховой призмы плотины, величины и скорости сработки, заложения верхового откоса [9].

При проектировании грунтовых плотин обязательным является выполнение фильтрационных

расчетов и расчетов фильтрационной прочности¹. Результаты выполненных фильтрационных исследований затем используются в расчетах устойчивости сооружения.

Для оценки устойчивости верхового откоса грунтовой плотины следует рассматривать максимально возможное снижение воды в водохранилище с наибольшей возможной скоростью. При этом учитываются фильтрационные силы неустановившейся фильтрации. Таким образом, необходимым элементом расчетного обоснования грунтовых плотин служит решение задач неустановившейся фильтрации. Один из определяемых в этих решениях параметров — градиент напора. Величины и направленность градиентов напора — основа для оценки фильтрационной прочности грунта тела плотины и установления фильтрационной гидродинамической нагрузки, влияющей на устойчивость откоса плотины [7–9].

В силу трудности решения задач неустановившейся фильтрации с середины XX в. большое распространение получили гидравлические методы, основанные на решении уравнения Буссинеска с принятием некоторых допущений [10]. Методы и результаты исследований представлены в работах иностранных и российских авторов [10]. Позднее развитие продолжилось в разработке как аналитических [11], так и гидравлических методов расчета [12–14].

Все исследования неустановившейся фильтрации, представленные выше, проводились при определенных ограничениях, что обусловлено несовершенством используемых методов. Как правило, рассматривалась однородная изотропная зона по материалам, постоянная скорость сработки водохранилища, ограниченный круг конструкций. Эти ограничения не позволяли провести полноценный анализ поведения сооружения при изменении уровня водохранилища.

Значительный прогресс в решении задач неустановившейся фильтрации сегодня достигнут

¹ СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05–84*.

с использованием численных методов и, в первую очередь, метода конечных элементов (МКЭ). В современных трудах [15–20] основной акцент сделан на решении фильтрационных задач (определение депрессионной кривой, высоты промежутка высачивания, величин фильтрационного расхода и градиента) методом контрольного объема, методом граничных элементов, МКЭ.

Решение задачи фильтрации в большинстве применяемых расчетных программ и комплексах сводится к решению основного дифференциального уравнения теории фильтрации с известными граничными условиями [10]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) - \mu \frac{\partial H}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где $H = f(x, y, z, t)$ — функция напора в рассматриваемой области, изменяющаяся по координатам x, y, z и во времени t ; K_x, K_y, K_z — коэффициенты фильтрации в направлениях осей x, y, z ; μ — коэффициент потерь воды в грунте.

Предполагается, что движение воды между частицами почвы происходит, когда поры полностью заполняются водой под действием гидравлического градиента из области с более высоким давлением в область с более низким давлением. Положение депрессионной кривой определяется путем исключения из расчетной области конечных элементов (КЭ), для которых полученное из решения значение фильтрационного напора оказывается меньше их высотного положения [17, 20].

Задачи неустановившейся фильтрации изучаются и в таком научном направлении, как почвенная гидрология [21, 22]. В рассматриваемых задачах движение фильтрационного потока происходит как в насыщенной, так и в ненасыщенной областях. Задачи гидрологии почв анализировались в работах известных зарубежных [23–26], советских и российских ученых [27–31].

В основе расчета движения почвенной влаги широко используется известное уравнение Л.А. Ричардса [22], являющееся модификацией уравнения Дарси применительно к условиям ненасыщенной среды. Одна из форм записи этого уравнения при переносе влаги в вертикальном направлении (когда градиент гравитационного давления равен 1) выглядит следующим образом:

$$\mu \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \partial \frac{k \frac{\partial \Psi}{\partial z} - 1}{\partial z}, \quad (2)$$

где μ — коэффициент дифференциальной влагоемкости почвы, см вод. ст.⁻¹; Ψ — капиллярное давление грунтовой (почвенной) влаги, см вод. ст.; t — время, сут; k — коэффициент гидравлической проводимости грунта (почвы), см/сут, является

функцией от давления влаги Ψ ; z — координата по вертикальной оси, см.

Решение такого уравнения возможно только с помощью численных методов. Входящие в уравнение (2) коэффициенты являются функцией капиллярного давления влаги: $\mu = \mu(\Psi)$ и $k = k(\Psi)$, и ключевой проблемой в поиске решения служит отсутствие исчерпывающего обоснования их определения. При поиске решения обычно применяют эмпирические зависимости этих параметров, полученные на основе экспериментальных данных [29–32]. В лабораторных условиях определяют зависимость объемной влажности почвы θ от капиллярного давления влаги Ψ , которую называют основной гидрофизической характеристикой (ОГХ) [22, 28].

Ван Генухтеном [25] при использовании метода Муалема [24] была предложена модель описания гидрофизических свойств грунтов (почв) с применением выражений, известная как модель Муалема – ван Генухтена. Она нашла широкое применение в практике численного моделирования фильтрационных процессов [5, 7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Рассматривалась земляная однородная плотина высотой 24,0 м на непроницаемом основании.

Заложение верхового откоса принято 1:3,0, низового — 1:1,85. Отметка нормального уровня воды $H_1 = 22,0$ м, отметка уровня воды ниже по течению от плотины $H_2 = 3,0$ м. Схема конструкции приведена на рис. 1.

Исследовались следующие варианты грунтов тела плотины: песок средней зернистости, песок мелкой зернистости, супесь и суглинки. Используемые характеристики грунтов представлены в табл. 1.

Исследования проводились численным МКЭ с помощью программного комплекса (ПК) PLAXIS, включающего модули для выполнения расчетов фильтрации в грунте. Модуль PlaxFlow позволяет проводить расчеты неустановившейся фильтрации. Используется одна из самых распространенных и проверенных моделей — модель ван Генухтена [25].

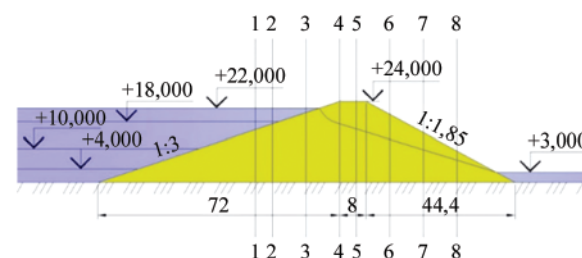


Рис. 1. Схема грунтовой однородной плотины
Fig. 1. Scheme of an earth homogeneous dam

Табл. 1. Характеристики грунта тела плотины для сравнительного анализа положения депрессионной кривой

Table 1. Characteristics of the soil of the dam body for a comparative analysis of the position of the depression curve

Вариант грунта Soil option	Размер частиц, мм Particle size, mm	Процентное соотношение частиц грунта, % Percentage of soil particles, %	Коэффициент фильтрации, м/сут Filtration coefficient, m/day
Песок средней зернистости Medium grain sand	< 0,002	4	10,000
	0,002–0,05	4	
	0,05–2	92	
Песок мелкозернистый Fine-grained sand	< 0,002	4	1,920
	0,002–0,05	4	
	0,05–2	92	
Песок заглинированный Clay sand	< 0,002	42	0,100
	0,002–0,05	5	
	0,05–2	53	
Супесь Sandy loam	< 0,002	6	0,010
	0,002–0,05	11	
	0,05–2	83	
Суглинок Loam	< 0,002	20	0,0010
	0,002–0,05	40	
	0,05–2	40	

Тестовые расчеты

Для проверки методики расчета в ПК PLAXIS проведены тестовые расчеты плотины при сработке уровня воды ВБ. В качестве начального условия принимался результат решения стационарной фильтрационной задачи при наполненном уровне ВБ и отметке нижнего бьефа +3,00 (рис. 1). Моделирование сработки производилось со скоростью снижения горизонта воды водохранилища 1 м/сут.

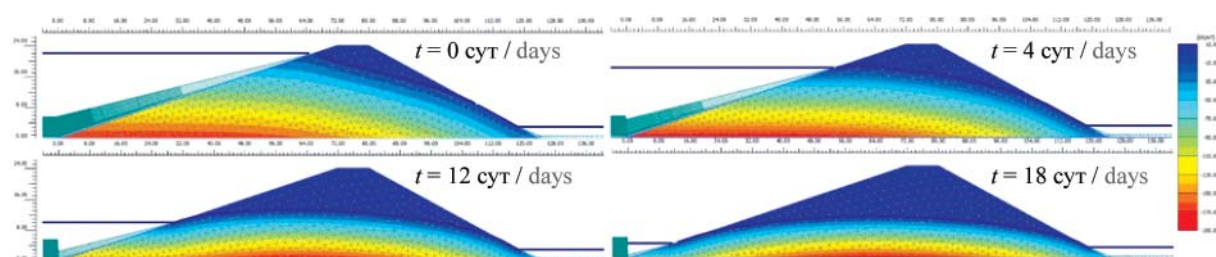
Результаты решения тестовой задачи в виде положения депрессионной кривой и полей распределения порового давления в плотине на начальный момент и на периоды времени, соответствующие выбранным этапам, представлены на рис. 2. Результаты моделирования тестовой задачи, полученные в PLAXIS, сравнивались с результатами, полученными в работах В.М. Шестакова (на основе гидравлического метода с решением уравне-

ния Буссинеска) и В.С. Лукьянова (моделирование на гидравлическом интеграторе) [33]. Сравнение положения депрессионной кривой выполнялось в восьми выбранных сечениях (положение сечений показано на рис. 1). Значения положения точек депрессионной поверхности в сечениях, полученные разными методами, приведены в табл. 2.

Расхождение полученных значений разными методами не превысило в большинстве точек 5 %, что говорит о допустимости решения данной задачи в ПК PLAXIS.

Постановка исследований

Изучалось влияние выбранных факторов на параметры фильтрационного потока через однородную земляную плотину при изменении во времени уровня воды в ВБ. В качестве влияющих факторов были выбраны: коэффициент фильтрации грунта

Рис. 2. Результаты определения положения депрессионной кривой при $K = 1,92$ м/сут в ПК PLAXIS.

Изополями показано поровое давление в теле плотины

Fig. 2. The results of determining the position of the depression curve at $K = 1.92$ m/day in the PC PLAXIS.

The isopotentials show the pore pressure in the body of the dam

Табл. 2. Результаты расчета положения депрессионной кривой в теле плотины

Table 2. The results of calculating the position of the depression curve in the body of the dam

Этап сработки/время после начала сработки Drawdown stage/ reservoir drawdown time	Метод расчета Calculation method	Высота депрессионной кривой по сечению, м Depression curve height in cross section, m							
		1–1	2–2	3–3	4–4	5–5	6–6	7–7	8–8
Расстояние от подошвы плотины со стороны ВБ, м Distance from the base of the dam from the headwater side, m		47,0	52,0	62,0	72,0	77,0	87,0	97,0	107,0
№ 1/4 дня No. 1/4 days	Гидравлический интегратор Hydraulic integrator	–	18,0	18,0	17,1	16,0	14,3	11,9	8,5
	Метод В.М. Шестакова Method V.M. Shestakova	–	18,0	17,3	16,8	15,7	13,9	11,6	7,9
	PLAXIS	–	18,0	18,2	17,2	16,6	14,7	12,4	9,0
№ 2/12 дней No. 2/12 days	Гидравлический интегратор Hydraulic integrator	12,3	13,0	13,5	12,8	12,3	11,2	9,7	7,2
	Метод В.М. Шестакова Method V.M. Shestakova	13,0	13,9	14,0	13,7	13,0	12,0	10,0	7,8
	PLAXIS	12,7	13,0	13,1	12,8	12,6	11,6	10,0	7,8
№ 3/18 дней No. 3/18 days	Гидравлический интегратор Hydraulic integrator	9,5	10,0	10,6	10,5	10,2	9,2	8,2	6,2
	Метод В.М. Шестакова Method V.M. Shestakova	11,6	11,9	12,0	11,5	11,0	10,0	8,9	6,0
	PLAXIS	10,2	10,6	10,8	10,8	10,5	9,8	8,6	6,8

плотины, скорость сработки водохранилища, положение верхового откоса. По результатам расчетов проанализировано влияние факторов на положение депрессионной поверхности и максимальную величину фильтрационного градиента вблизи верхового откоса плотины.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние коэффициента фильтрации на положение депрессионной кривой

Рассматривалась однородная земляная плотина (рис. 1) с вариантами грунтов, представленными в табл. 1. В результате расчетов для каждого варианта плотины в зависимости от коэффициента фильтрации получены положения депрессионной кривой для различных этапов сработки (табл. 2).

На рис. 3 показаны положения депрессионной кривой на момент времени, равный 18 суткам с начала сработки для различных по проницаемости вариантов грунтов. Можно отметить, что для глинистых грунтов с коэффициентом фильтрации $K_f \leq 1 \cdot 10^{-2}$ изменение положения депрессионной кривой происходит лишь вблизи верхового откоса.

Для остальных грунтов изменения затрагивают практически весь профиль грунтовой плотины. Полученные результаты будут использованы на следующем этапе для оценки устойчивости откоса.

Влияние коэффициента фильтрации и скорости сработки на величину максимального градиента напора

Для плотины с размерами, представленными на рис. 1, рассматривалась различная скорость сра-

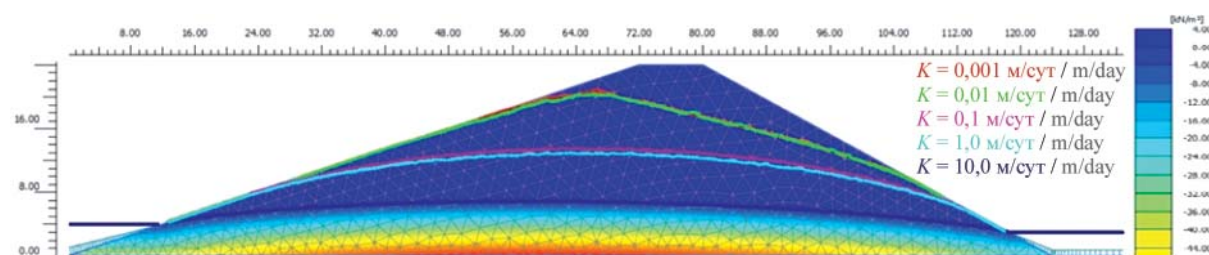


Рис. 3. Положение депрессионной кривой при различных коэффициентах фильтрации материала тела плотины на 18 сут с начала сработки

Fig. 3. The position of the depression curve at different filtration coefficients of the material of the dam body on the 18th day from the beginning of drawdown

ботки уровня ВБ: 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м/сут. В результате расчетов получены максимальные градиенты напора в теле плотины вблизи верховой грани для рассмотренных вариантов. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Видно, что для всех типов грунтов с увеличением скорости сработки происходит увеличение максимальных градиентов. Для сильно проницаемых грунтов ($K_{\phi} = 10$ м/сут) при скорости сработки 0,1–0,25 м/сут максимальные градиенты незначительны и находятся в интервале 0,043–0,105. При возрастании скорости сработки до 1,0–2,0 м/сут их величина возрастает до 0,356–0,406. Это свидетельствует о том, что при таких больших скоростях сработки вода в верховой призме не успевает за уровнем ВБ. Для глинистых грунтов с коэффициентами фильтрации 0,01–0,001 м/сут характерны достаточно большие значения градиента, изменяющиеся от значений 0,468–0,469 при сработке со скоростью 0,10 м/сут до значений 0,484–0,643 при сработке со скоростью 2,0 м/сут.

Влияние коэффициента фильтрации и заложения откоса на величину максимального градиента напора

Рассматривались варианты с различными коэффициентами фильтрации (табл. 1) и заложениями верхового и низового откосов: 1:1,5; 1:2,0; 1:2,5; 1:3,0; 1:3,5; 1:4,0. Скорость сработки при этом задавалась 1 м/сут. Результаты расчета приведены в табл. 4 и на рис. 4.

Можно отметить достаточно большое влияние заложения верхового откоса на величину максимального градиента напора. Для глинистого грунта с коэффициентом фильтрации $K_{\phi} = 0,001$ м/сут значение градиента увеличивается с 0,394 при заложении 1:4,0 до 0,956 при заложении 1:1,5. В большинстве случаев максимальный градиент напора зафиксирован на верховом откосе плотины в точке выхода кривой депрессии на отметке +4,00, что соответствует положению уровня воды после сработки. Но в случае с заложениями откоса 1:3,5 и 1:4,0 и коэффициентом фильтрации 0,001 м/сут депрессионная кривая выходит на откос на отметках 20–22 м, где и получены самые большие значения градиента напора.

Табл. 3. Максимальные градиенты напора при различных коэффициентах фильтрации и скоростях сработки

Table 3. Maximum filtration gradients at various filtration coefficients and drawdown rates

Скорость сработки, м/сут Drawdown speed, m/day	0,10	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00
Коэффициент фильтрации, м/сут Filtration coefficient, m/day	Градиент фильтрации, $ J_{\max} $ Filtration gradient, $ J_{\max} $					
0,001	0,476	0,486	0,506	0,538	0,586	0,643
0,01	0,468	0,469	0,470	0,476	0,479	0,484
0,1	0,420	0,445	0,457	0,463	0,465	0,466
1,0	0,255	0,383	0,425	0,451	0,458	0,462
10,0	0,043	0,105	0,247	0,356	0,388	0,406

Табл. 4. Максимальные фильтрационные градиенты при различных коэффициентах фильтрации и заложениях откосов

Table 4. Maximum filtration gradients at various filtration coefficients and slopes

Заложения откосов Slopes	1:1,5	1:2,0	1:2,5	1:3,0	1:3,5	1:4,0
Коэффициент фильтрации, м/сут Filtration coefficient, m/day	Градиент фильтрации, $ J_{\max} $ Filtration gradient, $ J_{\max} $					
0,001	0,956	0,77	0,621	0,508	0,441	0,394
0,01	0,881	0,702	0,557	0,444	0,387	0,329
0,1	0,781	0,669	0,542	0,435	0,38	0,319
1,0	0,697	0,632	0,521	0,426	0,378	0,33
10,0	0,468	0,431	0,480	0,411	0,393	0,301

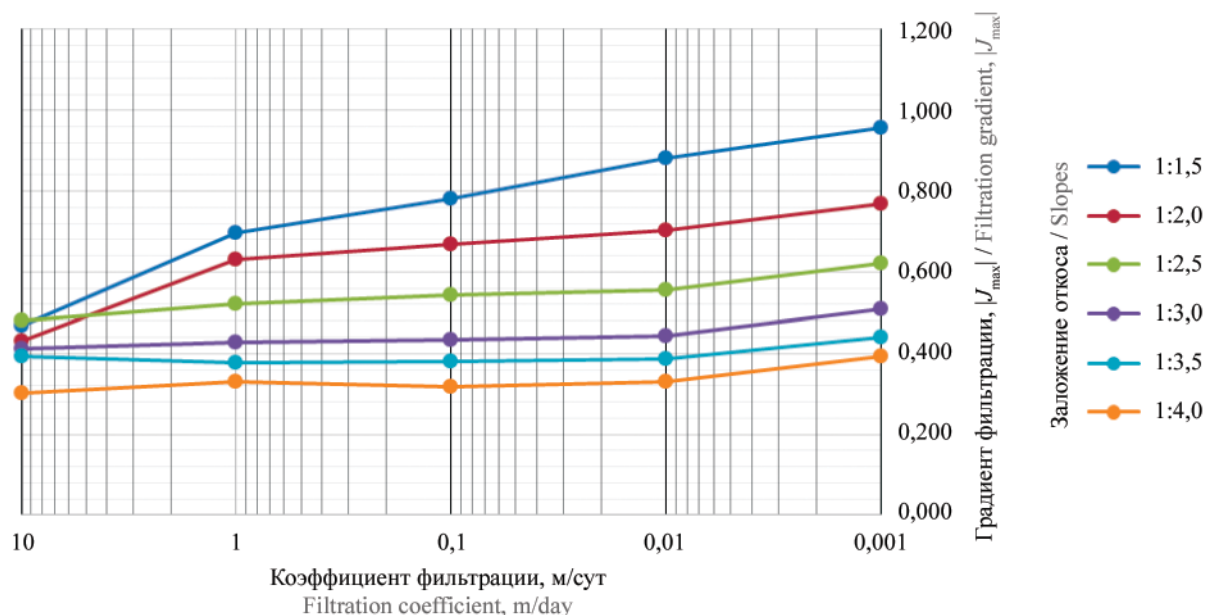


Рис. 4. Максимальные градиенты напора при различных коэффициентах фильтрации и скоростях сработки

Fig. 4. Maximum filtration gradients at various filtration coefficients and drawdown rates

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнено сравнение результатов решения тестовой задачи, полученных с помощью ПК PLAXIS, с решениями гидравлическим методом и с использованием гидравлического интегратора. Результаты расчета показали хорошую сопоставимость, что позволяет говорить о достоверности результатов численных исследований.

Полученные из численных экспериментов значения продемонстрировали существенную зависимость параметров фильтрационного потока (положение депрессионной поверхности, величины градиента напора) от коэффициента фильтрации.

Максимальные градиенты напора зафиксированы в точках выхода депрессионной кривой на верховой откос. Величины максимальных градиентов достаточно велики, что говорит о необходимости оценки фильтрационной прочности грунтов плотины.

Скорость сработки и заложение верхового откоса влияют на величину максимального градиента напора. Градиент напора увеличивается с увеличением скорости сработки и уменьшением заложения откоса.

В дальнейших исследованиях следует определить влияние быстрой сработки водохранилища и рассмотренных факторов на устойчивость откосов плотины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беллендир Е.Н., Ивашинов Д.А., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. Т. 1. СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2003. 556 с.
2. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam safety problems related to seepage // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering. 2020. Vol. 10. Issue 6. Pp. 191–239.
3. Fattah M.Y., Omran H.A., Hassan M.A. Behavior of an earth dam during rapid drawdown of water in reservoir — case study // International Journal of Advanced Research. 2015. Vol. 3. Issue 10. Pp. 110–122.
4. Upomo T.C., Effendi M.K., Kusumawardani R. Behaviour of levee on softsoil caused by rapid drawdown // AIP Conference Proceedings. 2018. DOI: 10.1063/1.5028103
5. López-Acosta N., Sánchez M., Auvinet G., Pereira J. Assessment of exit hydraulic gradients at the toe of levees in water drawdown conditions // Scour and Erosion. 2014. Pp. 171–181. DOI: 10.1201/b17703-21
6. Okeke A.C.-U., Wang F. Critical hydraulic gradients for seepage-induced failure of landslide dams // Geoenvironmental Disasters. 2016. Vol. 3. Issue 1. DOI: 10.1186/s40677-016-0043-z
7. Stark T.D., Jafari N.H., Zhindon J.S.L., Baghdady A. Unsaturated and transient seepage analysis of san luis dam // Journal of Geotechnical and Geoen-

Environmental Engineering. 2017. Vol. 143. Issue 2. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001602

8. *Vandenberge D.R.* Total stress rapid draw-down analysis of the pilarcitos dam failure using the finite element method // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2014. Vol. 8. Issue 2. Pp. 115–123. DOI: 10.1007/s11709-014-0249-7

9. *Perzlsmaier S.* Hydraulic criteria for internal erosion in cohesionless soil // *Internal Erosion of Dams and Their Foundations*. 2007. Pp. 179–198. DOI: 10.1201/9781482266146-20

10. *Аравин В.И., Афанасьева А.В., Бабушкин В.Д. и др.* Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917–1967). М. : Наука, 1969. 545 с.

11. *Анахаев К.Н.* О фильтрационном расчете перемычки // *Математическое моделирование*. 2011. Т. 23. № 2. С. 148–158.

12. *Chapman T.G., Dressler R.F.* Unsteady shallow groundwater flow over a curved impermeable boundary // *Water Resources Research*. 1984. Vol. 20. Issue 10. Pp. 1427–1434. DOI: 10.1029/WR020i010p01427

13. *Bukhartsev V.N., Petrichenko M.R.* Nonsteady filtration in a uniform soil mass // *Power Technology and Engineering*. 2012. Vol. 46. Issue 3. Pp. 198–200. DOI: 10.1007/s10749-012-0331-z

14. *Котов Е.В., Мусорина Т.А., Петриченко М.Р., Заборова Д.Д.* Слабые решения предельных задач Крокко // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2018. Т. 11. № 3. С. 27–38. DOI: 10.18721/JPM.11303

15. *Lee K.K., Leap D.I.* Simulation of a free-surface and seepage face using boundary-fitted coordinate system method // *Journal of Hydrology*. 1997. Vol. 196. Pp. 1–4. Pp. 297–309. DOI: 10.1016/S0022-1694(96)03246-5

16. *Billstein M.* Development of a numerical model of flow through embankment dams. Department of Environmental Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1998. P. 59.

17. *Hsiao C.C., Chen J.T., Chen K.H.* Application of hypersingular equations to free-surface seepage problems // *Computational Methods*. 2006. Pp. 73–77.

18. *Aniskin N.A., Antonov A.S.* Development geoseepage models for solving seepage problems of large dam's foundations, on an example of ANSYS Mechanical APDL // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1079–1080. Pp. 198–201. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1079-1080.198

19. *Yuan S., Zhong H.* Three dimensional analysis of unconfined seepage in earth dams by the weak form quadrature element method // *Journal of Hydrology*. 2016. Vol. 533. Pp. 403–411. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.034

20. *Yang J., Yin Z.Y., Laouafa F., Hicher P.Y.* Modeling coupled erosion and filtration of fine particles in granular media // *Acta Geotechnica*. 2019. Vol. 14.

Issue 6. Pp. 1615–1627. DOI: 10.1007/s11440-019-00808-8

21. *Al-Labban S.* Seepage and stability analysis of the earth dams under drawdown conditions by using the finite element method : Electronic Theses and Dissertations. 2018. P. 6157. URL: <https://stars.library.ucf.edu/etd/6157>

22. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М. : Изд-во Моск. ун-та, 2005. С. 430.

23. *Burdine N.T.* Relative permeability calculations from pore size distribution data // *Journal of Petroleum Technology*. 1953. Vol. 5. Issue 03. Pp. 71–78. DOI: 10.2118/225-G

24. *Mualem Y.* A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // *Water Resources Research*. 1976. Vol. 12. Issue 3. Pp. 513–522. DOI: 10.1029/WR012i003p00513

25. *Van Genuchten M.T.* A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // *Soil Science Society of America Journal*. 1980. Vol. 44. Issue 5. Pp. 892–898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

26. *Kosugi K.* General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal pore-size distribution // *Soil Science Society of America Journal*. 1999. Vol. 63. Issue 2. Pp. 270–277. DOI: 10.2136/sssaj1999.03615995006300020003x

27. *Роде А.А.* Основы учения о почвенной влаге. Т. 2. Л. : Гидрометеиздат, 1969. 286 с.

28. *Глобус А.М.* Экспериментальная гидрофизика почв. Л. : Гидрометеиздат, 1969. 355 с.

29. *Полужтков Р.А., Терлеев В.В.* Моделирование водоудерживающей способности почвы с использованием агрогидрологических характеристик // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 12. С. 98–103.

30. *Заславский Б.Г., Терлеев В.В.* Моделирование гидрофизических характеристик почв // *Автоматизация научных исследований и проектирования АСУ ТП в мелиорации : тез. докл. Всесоюзной школы-семинара*. 1988. С. 82.

31. *Terleev V.V., Mirschel W., Wenkel K.-O., Schindler U.* Estimation of soil water retention curve using some agrophysical characteristics and Voronin's empirical dependence // *International Agrophysics*. 2010. Vol. 24. Issue 4. Pp. 381–387.

32. *Терлеев В.В., Нарбут М.А., Тонаж А.Г., Мишель В.* Моделирование гидрофизических свойств почвы как капиллярно-пористого тела и усовершенствование метода Муалема – Ван Генухтена: теория // *Агрофизика*. 2014. № 2. С. 35–44.

33. *Aniskin N.A., Sergeev S.A.* The effect of draw-off on filtration regime of earth-fill dam // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18. Issue 1. Pp. 40–50. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-40-50

Поступила в редакцию 21 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Алексеевич Анискин** — доктор технических наук, профессор, директор Института гидротехнического и энергетического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 260568, Scopus: 6506856726, ResearcherID: B-6884-2016, ORCID: 0000-0002-4423-754X; aniskin@mgsu.ru;

Андрей Владимирович Ступивцев — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1176174, ORCID: 0000-0001-7262-2253; StupivtsevAV@gmail.com.

Вклад авторов:

Анискин Н.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание текста, доработка текста, итоговые выводы.

Ступивцев А.В. — проведение эксперимента и расчетных исследований, написание текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bellendir E.N., Ivashintsov D.A., Stefanishin D.V., Finagenov O.M., Shulman S.G. *Probabilistic methods for assessing the reliability of ground hydraulic structures. Vol. 1.* St. Petersburg, Publishing house of JSC “VNIIG named after B.E. Vedenev”, 2003; 556. (rus.).
2. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam safety problems related to seepage. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*. 2020; 10(6):191-239.
3. Fattah M.Y., Omran H.A., Hassan M.A. Behavior of an earth dam during rapid drawdown of water in reservoir — case study. *International Journal of Advanced Research*. 2015; 3(10):110-122.
4. Upomo T.C., Effendi M.K., Kusumawardani R. Behaviour of levee on softsoil caused by rapid drawdown. *AIP Conference Proceedings*. 2018. DOI: 10.1063/1.5028103
5. López-Acosta N., Sánchez M., Auvinet G., Pereira J. Assessment of exit hydraulic gradients at the toe of levees in water drawdown conditions. *Scour and Erosion*. 2014; 171-181. DOI: 10.1201/b17703-21
6. Okeke A.C.-U., Wang F. Critical hydraulic gradients for seepage-induced failure of landslide dams. *Geoenvironmental Disasters*. 2016; 3(1). DOI: 10.1186/s40677-016-0043-z
7. Stark T.D., Jafari N.H., Zhindon J.S.L., Baghdady A. Unsaturated and transient seepage analysis of san luis dam. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2017; 143(2). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001602
8. Vandenberghe D.R. Total stress rapid drawdown analysis of the pilarcitos dam failure using the finite element method. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2014; 8(2):115-123. DOI: 10.1007/s11709-014-0249-7
9. Perzlsmaier S. Hydraulic criteria for internal erosion in cohesionless soil. *Internal Erosion of Dams and Their Foundations*. 2007; 179-198. DOI: 10.1201/9781482266146-20
10. Aravin V.I., Afanas'eva A.V., Babushkin V.D. et al. *Development of research on the theory of filtration in the USSR (1917–1967)*. Moscow, Nauka Publ., 1969; 545. (rus.).
11. Anakhaev K.N. About filtration account the crosspiece. *Math Modeling*. 2011; 23(2):148-158. (rus.).
12. Chapman T.G., Dressler R.F. Unsteady shallow groundwater flow over a curved impermeable boundary. *Water Resources Research*. 1984; 20(10):1427-1434. DOI: 10.1029/WR020i010p01427
13. Bukhartsev V.N., Petrichenko M.R. Nonsteady filtration in a uniform soil mass. *Power Technology and Engineering*. 2012; 46(3):198-200. DOI: 10.1007/s10749-012-0331-z
14. Petrichenko M.R., Zaborova D.D., Kotov E.V., Musorina T.A. Weak solutions of the Crocco boundary problems. *St. Petersburg Polytechnic University Journal — Physics and Mathematics*. 2018; 11(3):27-38. DOI: 10.18721/JPM.11303 (rus.).
15. Lee K.K., Leap D.I. Simulation of a free-surface and seepage face using boundary-fitted coordinate system method. *Journal of Hydrology*. 1997; 196: 1-4:297-309. DOI: 10.1016/S0022-1694(96)03246-5
16. Billstein M. *Development of a numerical model of flow through embankment dams*. Department of Environmental Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 1998; 59.
17. Hsiao C.C., Chen J.T., Chen K.H. Application of hypersingular equations to free-surface seepage problems. *Computational Methods*. 2006; 73-77.

18. Aniskin N.A., Antonov A.S. Development geo-seepage models for solving seepage problems of large dam's foundations, on an example of ANSYS Mechanical APDL. *Advanced Materials Research*. 2014; 1079-1080:198-201. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1079-1080.198
19. Yuan S., Zhong H. Three dimensional analysis of unconfined seepage in earth dams by the weak form quadrature element method. *Journal of Hydrology*. 2016; 533:403-411. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.034
20. Yang J., Yin Z.Y., Laouafa F., Hicher P.Y. Modeling coupled erosion and filtration of fine particles in granular media. *Acta Geotechnica*. 2019; 14(6):1615-1627. DOI: 10.1007/s11440-019-00808-8
21. Al-Labban S. *Seepage and stability analysis of the earth dams under drawdown conditions by using the finite element method : Electronic Theses and Dissertations*. 2018; 6157. URL: <https://stars.library.ucf.edu/etd/6157>
22. Shein E.V. *Soil physics course*. Moscow, Publishing House of Moscow University, 2005; 432. (rus.).
23. Burdine N.T. Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Journal of Petroleum Technology*. 1953; 5(03):71-78. DOI: 10.2118/225-G
24. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. 1976; 12(3):513-522. DOI: 10.1029/WR012i003p00513
25. Van Genuchten M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1980; 44(5):892-898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
26. Kosugi K. General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal pore-size distribution. *Soil Science Society of America Journal*. 1999; 63(2):270-277. DOI: 10.2136/sssaj1999.03615995006300020003x
27. Rode A.A. *Fundamentals of the doctrine of soil moisture. Vol. 2*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969; 286. (rus.).
28. Globus A.M. *Experimental soil hydrophysics*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969; 356. (rus.).
29. Poluektov R.A., Terleev V.V. Modeling the water-holding capacity of the soil using agro-hydrological characteristics. *Meteorology and Hydrology*. 2005; 12:98-103. (rus.).
30. Zaslavskij B.G., Terleev V.V. Modeling of hydrophysical characteristics of soils. *Automation of scientific research and design of process control systems in land reclamation : abstracts of the reports of the All-Union School-Seminar*. 1988; 82. (rus.).
31. Terleev V.V., Mirschel W., Wenkel K.-O., Schindler U. Estimation of soil water retention curve using some agrophysical characteristics and Voronin's empirical dependence. *International Agrophysics*. 2010; 24(4):381-387.
32. Terleev V.V., Narbut M.A., Topaj A.G., Mirschel W. Modeling of hydrophysical properties of soil as a capillary-porous medium and modification of the mualem-van genuchten approach: theory. *Agrophysics*. 2014; 2:35-44. (rus.).
33. Aniskin N.A., Sergeev S.A. The effect of draw-off on filtration regime of earth-fill dam. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18(1):40-50. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-40-50

Received March 21, 2023.

Adopted in revised form on April 11, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

B I O N O T E S: **Nikolai A. Aniskin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Hydro-technical and Energy Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 260568, Scopus: 6506856726, ResearcherID: B-6884-2016, ORCID: 0000-0002-4423-754X; aniskin@mgsu.ru;

Andrey V. Stupitsev — postgraduate; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1176174, ORCID: 0000-0001-7262-2253; StupitsevAV@gmail.com.

Contribution of the authors:

Nikolai A. Aniskin — conceptualization, methodology, writing of the article, scientific editing of the text, supervision.

Andrey V. Stupitsev — gathering and processing, writing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.81

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.927-934

Энергетическая эффективность электрического котла с косвенным поверхностным резисторным нагревом теплоносителя

Алексей Леонидович Торопов

Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Доля энергии на теплоснабжение домохозяйств составляет до 80 % от общей потребляемой энергии. Работы по повышению энергетической эффективности оборудования HVAC вносят наибольший вклад в снижение техногенного воздействия на природную среду. Технология Power-to-Heat представляет собой электрические котлы, применяемые для отопления водяными системами с радиаторами и низкотемпературными приборами отопления «теплый пол». Представлено исследование энергетической эффективности настенного электрического котла, оснащенного теплогенератором косвенного поверхностного резисторного нагрева теплоносителя.

Материалы и методы. Объект исследования — серийно выпускаемый одноконтурный настенный электрический котел ARDERIA E24 номинальной мощностью 24 кВт·ч, оснащенный трехскоростным циркуляционным насосом, расширительным баком объемом 6 л, группой гидравлической безопасности и подпитки теплоносителя. Управление мощностью работы котла выполнено на симисторах с радиаторами охлаждения, расположенных на обратной магистрали контура циркуляции. На котле установлен электрический теплогенератор с косвенным резисторным поверхностным нагревом теплоносителя с «сухими» трубчатыми электронагревателями (ТЭН).

Результаты. Исследованные электрические теплогенераторы имеют высокую удельную объемную мощность, равную 9,3 кВт·ч/дм³. Средняя удельная мощность ТЭН — 25,1 Вт/см², максимальная — 28,8 Вт/см². Коэффициент энергетической эффективности работы котла составляет 0,986. Гидравлическое сопротивление блока — 1,25 м водяного столба при расходе 1,0 м³/ч.

Выводы. Применение конструкции электрического теплового генератора, состоящего из литого алюминиевого блока с размещенными внутри трубчатыми нагревательными элементами и спиральной трубы циркуляции теплоносителя, показало высокую энергетическую эффективность с коэффициентами 0,98–0,986 в диапазоне модуляции тепловой мощности. Коэффициент модуляции тепловой мощности электрического котла равен 12 (2–24 кВт). Энергоемкость конструкции теплового генератора составляет 9,3 кВт·ч/дм³, что значительно выше традиционных блоков генерации тепловой энергии с «мокрыми» ТЭН. Система управления тепловой мощностью котла исключает вероятность возникновения температуры на поверхности внутренней трубы циркуляции теплоносителя выше 88 °C.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: P2H, электрический котел, резистор, косвенный нагрев, ТЭН, энергетическая эффективность, инерционный нагрев

Благодарности. Автор благодарит рецензентов за замечания по стилю изложения и научно-технической сути, способствующие более глубокому раскрытию темы научной работы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Торопов А.Л. Энергетическая эффективность электрического котла с косвенным поверхностным резисторным нагревом теплоносителя // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 927–934. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.927-934

Автор, ответственный за переписку: Алексей Леонидович Торопов, toropov@aprilgroup.ru.

Energy efficiency of an electric boiler with indirect surface resistive heating of the heat carrier

Alexey L. Toropov

Engineering Center “April”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The share of energy for heating of households makes up to 80 % of the total energy consumption. Works on increase of energy efficiency of HVAC equipment make the biggest contribution to reduction of manmade impact on

the environment. Power-to-Heat technology — electric boilers used for heating with water systems with radiators and low-temperature heating devices of the “warm floor” type. The research of energy efficiency of the wall mounted electric boiler equipped with the heat generator of indirect surface resistive heating of the heat carrier is presented.

Materials and methods. The object of the research is an electric boiler ARDERIA E24, with a nominal capacity of 24 kWh, equipped with a circulation pump, an expansion tank with a volume of 6 L, a group of hydraulic safety and heat carrier recharge. Control of the capacity of the boiler is carried out on semistors with cooling radiators located on the reverse line of the circulation circuit. The boiler is equipped with an electric heat generator with indirect resistor surface heating of the heat carrier.

Results. The studied electric heat generators have high specific volumetric power equal to 9.3 kWh/dm³. The average specific power of tubular electric heaters is 25.1 watts/cm². The coefficient of energy efficiency of the boiler is 0.986. The hydraulic resistance of the unit is 1.25 meters of water column at a flow rate of 1.0 m³/h.

Conclusions. The application of the electric heat generator design consisting of a cast aluminum block with tubular heating elements placed inside and a spiral coolant circulation pipe showed high energy efficiency with coefficients of 0.98–0.986 in the modulation range of heat output. The heat output modulation factor of the electric boiler is 12 (2–24 kW). The energy intensity of the heat generator design is 9.3 kWh/dm³, which is significantly higher than traditional heat generation units with “wet” heating elements. The boiler’s heat output control system eliminates the possibility of the temperature rising above 88 °C on the inner heating medium circulation pipe surface.

KEYWORDS: Power-to-Heat, electric boiler, resistor, indirect heating, tubular electric heater, energy efficiency, inertial heating

Acknowledgements. The author would like to thank the reviewers for their comments on the presentation style and scientific and technical contents that helped to better disclose the topic of the scientific work.

FOR CITATION: 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: 10.22227/1997-0935.2023.6.927-934 (rus.).

Corresponding author: Alexey L. Toropov, toropov@aprilgroup.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации 78 % от общего потребления энергии домохозяйствами приходится на отопление и подготовку горячей воды¹. Аналогичные данные в Европейском Союзе — 79 %^{2, 3}, в США — 60 %⁴. Указанные цифры убедительно показывают, что именно работы по повышению энергетической эффективности оборудования HVAC (Heating, ventilation and air conditioning — отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха) вносят наибольший вклад в снижение техногенного воздействия технического оборудования домохозяйств на естественную природную среду. Для снижения выбросов парниковых газов все передовые

страны уделяют внимание повышению энергоэффективности зданий и систем теплоснабжения^{5, 6, 7}.

Технологии Power-to-Heat (PtH или P2H) относятся к оборудованию, в которых электрическая энергия генерирует тепло. P2H предлагает множество преимуществ для управления энергетическим переходом. Водяные P2H с использованием избыточной переменной возобновляемой энергии позволяют оптимизировать энергопотребление и сокращают применение углеводородного топлива. Электричество не является первичной энергией. Баланс потребления первичной энергии значительно дифференцирован. В Российской Федерации по данным за 2018 г. при производстве электрической энергии доля газа составляет 60 %, угля 16 %, нефтепродуктов 13 %, ядерного топлива 8 %, гидроэнергии 3 %, все виды возобновляемых источников энергии составляют 0,03 %¹. Каждая страна имеет

¹ О состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации : государственный доклад. М. : Министерство экономического развития Российской Федерации. 2020. 114 с. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c3901dba442f8e361d68bc019d7ee83f/Energyefficiency2020.pdf>

² Heating and cooling constitute around half of the EU energy consumption // Directorate-General for Energy. URL: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling_en?redir=1

³ Energy consumption and use by households // Eurostat. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20190620-1>

⁴ Energy balances of OECD countries 2014 // International Energy Agency (IEA). URL: https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/energy_bal_oecd-2014-en

⁵ Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (recast). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010L0031>

⁶ World energy balances 2020 edition. Database documentation. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/4f314df4-8c60-4e48-9f36-bfea3d2b7fd5/WorldBAL_2020_Documentation.pdf

⁷ Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон № 261-ФЗ. URL: <https://fzakon.ru/laws/federalnyy-zakon-ot-23.11.2009-n-261-fz/>

свой баланс использования природных ресурсов при производстве электрической энергии. В качестве единицы сравнения коэффициента трансформации электрической энергии с точки зрения углеродного следа для каждой страны целесообразно взять количество выбросов CO_2 при сжигании природного газа при производстве 1 кВт·ч тепловой энергии, равной 200 г⁸. В США в 2021 г. годовая выработка электроэнергии электростанциями разного типа происходила со средними выбросами 388 г на кВт·ч⁹, что соответствует коэффициенту 1,94 в сравнении с эмиссией при сжигании газобразного топлива. Реальные коэффициенты преобразования первичной энергии в электрическую различны в разных странах и меняются каждый год, причем не только в сторону уменьшения. По данным исследований [1, 2] в Китае — это 3,35, ФРГ — 2,2, в среднем по миру — 2,64.

Электрический котел — одно из популярных решений Р2Н, широко применяется в домохозяйствах для отопления водяными системами с радиаторами и низкотемпературными приборами отопления типа «теплый пол». Эта технология выгодна из-за комфортной, бесшумной и безопасной работы устройств, низкой начальной стоимости, простоты обслуживания, возможности аккумулирования энергии, интегрирования с устройствами генерации возобновляемой энергии. Классификация конструкций электрической генерации тепла в бытовых и промышленных зданиях представлена в работах [3–7]. В данной статье рассматриваются децентрализованные, низкотемпературные (менее 120 °С) электрические нагревательные котлы для систем теплоснабжения домовладения или коммерческих помещений небольшой мощности, использующие джоулев (резисторный) нагрев для преобразования электрической энергии в тепловую. В подавляющем большинстве в теплоснабжении домохозяйств применяются именно электрические котлы с косвенным резисторным типом нагрева теплоносителя^{10, 11} [8–14].

Преимущества данных систем:

1. Простота конструкции нагревательного элемента (НЭ), массовый характер производства, низкая стоимость.

2. Компактность, легкость монтажа и эксплуатации.

3. Возможность регулирования мощности в полном диапазоне изменения тепловой нагрузки.

4. Высокий коэффициент энергетической эффективности преобразования электрической энергии в тепловую, равный 0,95–0,99.

Недостатки систем косвенного нагрева теплоносителя резисторными нагревательными приборами:

1. Основаны на использовании электрической энергии. При оценке углеродного следа требуется учитывать коэффициенты трансформации первичного источника энергии в электрическую.

2. Ограниченный срок службы нагревательных элементов, связанный с материалами изготовления, конструкцией, интенсивностью работы.

3. Высокая температура поверхности в зоне контакта нагревательных деталей с жидкими теплоносителями (в большинстве случаев с водой), приводящая к закипанию поверхностного слоя теплоносителя.

4. Образование на поверхности НЭ отложений солей жесткости, значительно снижающих эффективность нагрева теплоносителя и уменьшающих срок службы НЭ.

5. Большая тепловая инерционность нагревательных элементов, приводящая к сложности в управлении тепловой нагрузкой.

6. Возможность возгорания устройств теплоснабжения и объемных деформаций при авариях в нештатных режимах работы.

Принцип работы и конструкция нагревательных элементов резисторного типа заключаются в следующем. На нагревательный элемент с высоким 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. Выделяемое тепло Q , Вт·ч, нагревает корпус НЭ через токоизолирующий материал. Корпус НЭ контактирует с теплоносителем системы теплоснабжения и нагревает его. Материалом НЭ часто служат нихромовая проволока (Ni 80 %, Cr 20 %), сплавы молибдена, вольфрама. Корпус НЭ — медь, нержавеющая сталь или керамика¹² [15]. Форма НЭ может быть произвольная.

В классификации электрических котлов различают два типа резисторных НЭ: «мокрый», у которого оболочка трубчатого электронагревателя (ТЭН) контактирует с теплоносителем, и «сухой», у которого оболочка ТЭН нагревает промежуточный элемент, контактирующий с теплоносителем. В свою

⁸ Specific Carbon Dioxide Emissions of Various Fuels. URL: https://www.volker-quaschning.de/datserv/CO2-spez/index_e.php

⁹ How much carbon dioxide is produced per kilowatthour of U.S. electricity generation? // U.S. Energy Information Administration. URL: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>

¹⁰ Сферы применения и особенности трубчатых нагревателей. URL: <https://polymernagrev.ru/nagrev-v-proizvodstve/sfery-primeneniya-i-osobennosti-trubchatykh-nagrevateley/>

¹¹ Nidek A.J. Heating elements. URL: <https://farnam-custom.com/heating-elements?locale=en>

¹² Трубчатый электронагреватель. URL: <https://magsbt.com/blog/trubchatyy-elektronagrevatel/>

очередь, ТЭН для котлов «сухого» типа по расположению делятся на внутренние объемные (внутри теплоносителя) и внешние поверхностные (теплоноситель находится внутри конструкции «сухого» ТЭН). На рис. 1 представлен блок ТЭН серийно выпускаемого на российском заводе «АРДЕРИЯ» настенного котла с одноименным названием ARDERIA, серия Е. Электрический теплогенератор состоит из шести трубчатых электрических НЭ, размещенных внутри спиральной трубы, по которой движется теплоноситель. Конструкция трубы теплоносителя и ТЭН расположены внутри цельнолитого алюминиевого блока.

Данный электрический теплогенератор с «сухим» типом ТЭН и внешним поверхностным нагревом трубки теплоносителя обладает следующими преимуществами по сравнению с «мокрым» типом:

1. Температура поверхности оболочки «мокрых» ТЭН не должна превышать 100 °С для снижения вероятности закипания теплоносителя на поверхности ТЭН, снижения интенсивности образования накипи. «Сухие» ТЭН рассматриваемого теплогенератора не контактируют с теплоносителем. Они нагревают весь объем алюминиевого блока и трубку движения теплоносителя. Данная конструкция допускает температуру оболочки ТЭН 150 °С, при этом температура в любой точке поверхности трубки движения теплоносителя не превышает 80 °С.

2. Эффективность нагрева. Максимальная удельная мощность «мокрого» ТЭН не превышает 15 Вт/см². Мощность ТЭН длиной 1 м при диаметре 10 мм не превышает 4 кВт·ч [16–19]. В этом случае для тепловых генераторов мощностью 24 кВт длина ТЭН при диаметре 10 мм должна быть не менее 6 м, что занимает большой объем

и вес. Теплогенератор котлов ARDERIA оснащен ТЭН с удельной мощностью до 30 Вт/см², что позволяет уменьшить их размер по сравнению с «мокрыми» трубчатыми НЭ.

3. Нагрев трубчатыми электронагревателями алюминиевого монолитного корпуса дает возможность обеспечить равномерный нагрев всей поверхности трубы, по которой движется теплоноситель. Площадь поверхности трубы в 1,5 раза превышает площадь поверхности нагревательных резисторных элементов «мокрого» типа.

4. При размещении на поверхности алюминиевого блока термостата с ограничением температуры 80 °С возможность закипания теплоносителя исключается. Тепловая инерционность оболочек ТЭН теплогенератора меньше, чем у вариантов с «мокрым» ТЭН. Благодаря этому снижается инерционный перегрев объема теплоносителя при аварийном отключении электрического питания котла, поскольку избыточная температура оболочки ТЭН перераспределяется на массу литого алюминиевого блока, а не на объем воды, находящийся в теплогенераторе.

5. Конструкция теплогенератора компактная, энергоемкость блока более высокая, чем при использовании «мокрых» ТЭН.

Цель исследования — определить энергетическую эффективность настенного электрического котла с теплогенератором в виде цельнолитого алюминиевого блока с расположенным внутри спиральным стальным трубчатым каналом циркуляции теплоносителя и блока ТЭН, гидравлическое сопротивление теплогенератора и тепловую инерционность при аварийном отключении энергоснабжения.

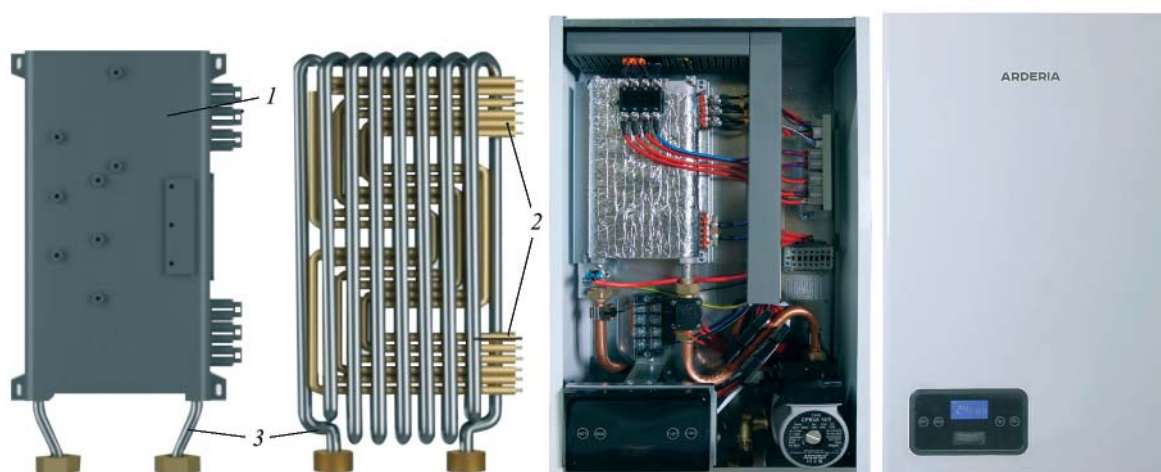


Рис. 1. Блок косвенного нагрева теплоносителя с использованием резисторных нагревательных элементов и электрический настенный котел ARDERIA, серия Е24: 1 — алюминиевый корпус нагревательного блока; 2 — электрический нагревательный элемент; 3 — трубка теплоносителя

Fig. 1. Block of indirect heating of the heat carrier with the use of resistor heating elements and electric wall-mounted boiler ARDERIA E24 series: 1 — aluminum body of the heating block; 2 — electric heating element; 3 — heat carrier tube

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — серийно выпускаемый одноконтурный настенный электрический котел ARDERIA E24 номинальной мощностью 24 кВт·ч, оснащенный трехскоростным циркуляционным насосом (ЦН) с мотором асинхронного типа, расширительным баком объемом 6 л, группой гидравлической безопасности и подпитки теплоносителя. Управление мощностью работы котла выполнено на симисторах с радиаторами охлаждения, расположенными на обратной магистрали контура циркуляции.

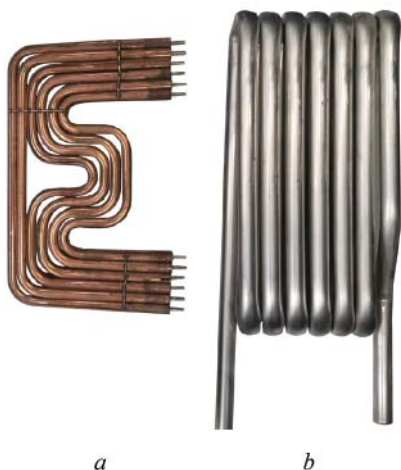


Рис. 2. Конфигурация ТЭН (а); форма спиральной трубки движения теплоносителя (б)

Fig. 2. Tubular electric heating element configuration (a); the shape of the spiral tube for the movement of the heat carrier (b)

Тепловой электрический блок — размер $150 \times 325 \times 53$ мм (Ш \times В \times Г), объем 2,58 дм³, удельная номинальная энергоемкость 9,3 кВт·ч/дм³. На рис. 2 представлены блок электрических ТЭН и сжатая спиралеобразная трубка движения теплоносителя. Длина трубки контура циркуляции теплоносителя внутри блока 4750 мм. Диаметр 18 мм, толщина стенки 1 мм, сталь AISI 304, площадь поверхности трубы 2684 см². Количество ТЭН — 6 штук, диаметр оболочки 10 мм. Средняя длина 513 мм, суммарная длина 3,08 м. Вес блока, включая вес ТЭН, спиральной трубки, патрубков подключения, без теплоносителя — 6,25 кг. Испытания проводились на исследовательском стенде завода «АРДЕРИЯ». Теплоноситель — вода. Количество циклов испытаний 5. Электрическая сеть трехфазная. Температура в помещении 18 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электрические котлы, оснащенные блоком косвенного поверхностного резисторного нагрева теплоносителя, имеют высокую удельную мощность,

равную 9,3 кВт·ч/дм³. Традиционные, погруженные в объем нагревательного блока, заполненного теплоносителем, трубчатые НЭ требуют наличия зазора между ТЭН и корпусом не менее 5 мм, что приводит к увеличению размеров блока. Удельная мощность блоков электрического нагрева с использованием ТЭН «мокрого» типа составляет менее 3,0 кВт·ч/дм³. Средняя удельная мощность ТЭН, используемых в исследуемом блоке косвенного резисторного поверхностного нагрева, составляет 25,1 Вт/см² при максимальной достигнутой мощности 28,8 Вт/см². Конструкция исследуемого блока косвенного нагрева теплоносителя исключает закипание теплоносителя в зоне его контакта с поверхностью трубки установкой блока термореле с температурой отключения питания, равной 90 °С, расположенного на внешней поверхности нагревательного литого блока, и пропорционального датчика температуры, установленного на выходной магистрали. Алгоритм работы котла ограничивает максимальную температуру теплоносителя 80 °С. Коэффициент энергетической эффективности работы котла составляет 0,98–0,986 в диапазоне модуляции мощности от 2 до 24 кВт·ч. Гидравлическое сопротивление блока электрического нагрева теплоносителя — 1,25 м водяного столба при расходе 1,0 м³/ч, что соизмеримо с гидравлическим сопротивлением настенного газового котла аналогичной мощности [20]. Электрические котлы с симисторной схемой управления тепловой нагрузкой имеют возможность «плавной» модуляции мощности с шагом изменения меньше номинальной мощности одного ТЭН. В исследуемом котле шаг изменения мощности равен половине мощности ТЭН, что по потребляемому току соответствует половине величины потребляемого тока одного ТЭН. Данный факт имеет преимущество перед релейными типами систем управления тепловой мощностью электрических котлов, поскольку допускает эффективное приоритетное распределение выделенной на домохозяйство электрической мощности в случае ее лимитирования [21]. Инерционный нагрев теплоносителя в зоне максимального нагрева при аварийном выключении электропитания и остановке движения теплоносителя при отключении ЦН составил 8 °С. Аварийный инерционный нагрев происходит за счет предварительного нагрева оболочки трубчатых НЭ до температуры 150 °С, размещенных в литом блоке косвенного нагрева. Избыточный нагрев оболочки ТЭН перераспределяется на нагрев всех элементов блока (вес 6,25 кг), включая алюминиевый блок, трубку движения теплоносителя, теплоноситель. Температура теплоносителя на входе в блок нагрева в момент аварийного отключения питания не превышает 60 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение конструкции электрического теплового генератора, состоящего из литого алюми-

ниевом блоке с размещенными внутри трубчатыми НЭ и спиральной трубы циркуляции теплоносителя, показало высокую энергетическую эффективность с коэффициентами 0,98–0,986 в диапазоне модуляции тепловой мощности. Коэффициент модуляции тепловой мощности электрического котла равен 12 (2–24 кВт). Энергоемкость конструкции теплового генератора высокая, составляет 9,3 кВт·ч/дм³, что значительно выше традиционных блоков генерации тепловой энергии с «мокрыми» ТЭН. Максимальная удельная мощность ТЭН, примененных в конструкции блока, — до 30 Вт/см². Система управления тепловой мощностью котла, включая установку термостата на внешней поверхности алюминиевого литого блока, позволяет ис-

ключить вероятность возникновения температуры на поверхности внутренней трубы циркуляции теплоносителя выше 80 °С. При аварийном отключении электрического питания котла и прекращении работы ЦН разогрев объема теплоносителя, находящегося в теплогенераторе, происходит за счет тепловой инерции ТЭН на температуру не более 8 °С. Температура теплоносителя в блоке нагрева в нормальном рабочем режиме не превышает 80 °С, скорость движения теплоносителя в нагревательной трубке существенно выше конструкций объемного нагрева с «мокрыми» ТЭН, что значительно снижает интенсивность нарастания твердых образований накипи на внутренней поверхности каналов движения теплоносителя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белобородов С.С. Снижения эмиссии CO₂: развитие когенерации или строительство ВИЭ? // Энергосовет. 2018. № 1 (51). С. 16–25.
2. Hussy C., Klaassen E., Koornneef J., Wigand F. International comparison of fossil power efficiency and CO₂ intensity — Update 2014. Netherlands, ECOFYS, 2014. 84 p.
3. 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
4. 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.2017.12.07
5. Pieper C. Transformation of the German energy system — Towards photovoltaic and wind power. Technology Readiness Levels 2018: Thesis for: Dr.-Ing. Technische Universität Dresden, 2018. 264 p.
6. Yilmaz H., Keles D., Chiodi A., Hartel R., Mikulic M. Analysis of the power-to-heat potential in the European energy system // Energy Strategy Reviews. 2018. Vol. 20. Pp. 6–19. DOI: 10.1016/j.esr.2017.12.009
7. Wong S., Pinard J.-P. Opportunities for smart electric thermal storage on electric grids with renewable energy // IEEE Transactions on Smart Grid. 2016. Pp. 1–9. DOI: 10.1109/TSG.2016.2526636
8. 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
9. Hegazy 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
10. 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
11. Пшеничников В. Коммерческие водонагреватели на предприятиях // С.О.К. — Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2011. № 6 (114). С. 40–43.
12. Горкин А.П. Энциклопедия «Техника». М. : Росмен, 2006. 488 с.
13. Белафин Ю.А., Евстигнеев М.А., Чернявский А.Н. Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением. М. : Энергоатомиздат, 1989. 157 с.
14. Boldrini A., Jiménez Navarro J.P., Crijns-Graus W.H.J., van den Broek M.A. The role of district heating systems to provide balancing services in the European Union // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 154. P. 111853. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111853
15. Пилипенко А.И. Промышленные электронагреватели // Промышленный электрообогрев и электроотопление. 2012. № 1. С. 28–34.
16. Заяц А.Е., Корко В.С., Кустова Р.И. Электрические элементные нагреватели : пособие. Минск : БГАТУ, 2011. 180 с.
17. Матвеев С.Д., Черкасов М.М. Повышение эффективности электроводонагревательных устройств для отопления вспомогательных помещений на животноводческих фермах // Современная техника и технологии. 2017. № 5. URL: <https://technology.snauka.ru/2017/05/13344>

18. Вадова Л.Ю. Способы и средства повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022. № 8. С. 51–55.

19. Балашов С.М., Балашов С.С., Фролов А.А., Балашов М.С. Совершенствование трубчатых электронагревателей // Теплоэнергетика. 2005. № 2. С. 53–56.

20. Торопов А.Л. Гидравлическая и тепловая устойчивость работы автономных систем поквартирного теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 7. С. 944–953. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.944-953

21. 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

Поступила в редакцию 13 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 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. Beloborodov S.S. Reduction of CO₂ emissions: development of cogeneration or construction of RES? *Energy Advice*. 2018; 1(51):16-25. (rus.).
2. Hussy C., Klaassen E., Koornneef J., Wigand F. *International comparison of fossil power efficiency and CO₂ intensity — Update 2014*. Netherlands, ECOFYS, 2014; 84.
3. 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; 53:102553. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102553
4. 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.2017.12.07
5. Pieper C. *Transformation of the German energy system — Towards photovoltaic and wind power. Technology Readiness Levels 2018 : Thesis for : Dr.-Ing.* Technische Universität Dresden, 2018; 264.
6. Yilmaz H., Keles D., Chiodi A., Hartel R., Mikulic M. Analysis of the power-to-heat potential in the European energy system. *Energy Strategy Reviews*. 2018; 20:6-19. DOI: 10.1016/j.esr.2017.12.009
7. Wong S., Pinard J.-P. Opportunities for smart electric thermal storage on electric grids with renewable energy. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016; 1-9. DOI: 10.1109/TSG.2016.2526636
8. 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
9. Hegazy 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
10. 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
11. Pshenichnikov V. Commercial water heaters in factories. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2011; 6(114):40-43. (rus.).
12. Gorkin A.P. *Encyclopedia "Equipment"*. Moscow, Rosmen Publ., 2006; 488. (rus.).
13. Belavin Yu.A., Evstigneev M.A., Chernyavskiy A.N. *Tubular electric heaters and installations with their application*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989; 157. (rus.).
14. Boldrini A., Jiménez Navarro J.P., Crijns-Graus W.H.J., van den Broek M.A. The role of district heating systems to provide balancing services in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022; 154:111853. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111853
15. Pilipenko A.I. Industrial electric heaters. *Industrial Electric Heating and Electric Heating*. 2012; 1:28-34. (rus.).
16. Zayats A.E., Korko V.S., Kustova R.I. *Electric elemental heaters: manual*. Minsk, BGATU, 2011; 180. (rus.).

17. Matveev S.D., Cherkasov M.M. Improving the efficiency of electric water heaters for heating auxiliary premises on livestock farms. *Modern Technique and Technologies*. 2017; 5. URL: <https://technology.snauka.ru/2017/05/13344> (rus.).

18. 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.).

19. Balashov S.M., Balashov S.S., Frolov A.A., Balashov M.S. Improving tubular electrical heaters. *Teploenergetika*. 2005; 2:53-56. (rus.).

20. Toropov A.L. Hydraulic and thermal stability of independent systems of apartment heating. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(7):944-953. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.944-953 (rus.).

21. 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.).

Received March 13, 2023.

Adopted in revised form on April 11, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

BIONOTES: Alexey L. Toropov — Candidate of Technical Sciences, General Director — Chief Designer; **Engineering Center “April”**; 13 Schelkovskoe shosse, Moscow, 105122, Russian Federation; ID RISC: 1030472, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05:004.94

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.935-961

Оптимизация характеристик организационно-технологических решений, направленных на снижение влияния проектных рисков

Анастасия Андреевна Черенева, Анастасия Вячеславовна Мишакова,

Антон Евгеньевич Радаев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);

г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследования определяется потребностью современных проектных и строительных организаций в объективном учете влияния различных категорий рисков на результаты реализации строительных проектов, а также ограниченностью существующих инструментальных средств, применяемых для обоснования параметров реализации строительных проектов, учитывая риски внутренней и внешней среды. Данные особенности обусловили целесообразность проведения исследования, целью которого является разработка инструментальных средств обоснования характеристик организационно-технологических решений (ОТР), направленных на снижение влияния рисков на результаты реализации строительных проектов.

Материалы и методы. Разработана методика обоснования характеристик ОТР, направленных на снижение влияния рисков на результаты реализации строительных проектов. Методика предполагает формирование аналитической модели зависимости значения показателя риска от параметров реализуемого строительного проекта (параметров риска) с последующим построением и реализацией оптимизационной модели обоснования изменений управляемых параметров риска на основе критериев суммарных затрат на реализацию указанных изменений, а также фактических значений показателей негативного влияния риска на результаты реализации строительного проекта.

Результаты. Разработанная методика реализована на практическом примере, в результате выполнения соответствующих расчетных процедур получены значения изменений параметров процесса функционирования инвестиционно-строительной организации нефтегазового сектора для обеспечения требуемых значений фактического среднего (по объектам) срока задержки сдачи в эксплуатацию и доли объектов, своевременно сданных в эксплуатацию.

Выводы. На основе адекватных результатов, полученных по итогам реализации предложенной методики на практическом примере, сделан вывод о высокой практической значимости разработанного инструментального средства. Идентифицированы особенности разработанной методики, уменьшающие область ее эффективного применения, в частности зависимость адекватности результатов реализации методики от адекватности аналитической модели зависимости значения показателя риска от параметров реализуемого строительного проекта. Для устранения выявленных недостатков запланировано совершенствование методики на дальнейших этапах исследования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительный проект, показатель риска, зависимость, оптимизационная модель, методика, объект строительства

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Черенева А.А., Мишакова А.В., Радаев А.Е. Оптимизация характеристик организационно-технологических решений, направленных на снижение влияния проектных рисков // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 935–961. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.935-961

Автор, ответственный за переписку: Антон Евгеньевич Радаев, tw-inc@yandex.ru.

Optimization of the characteristics of organizational and technological solutions aimed at reducing the impact of project risks

Anastasia A. Chereneva, Anastasia V. Mishakova, Anton E. Radaev

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

ABSTRACT

Introduction. The research relevance is determined by the need of modern design and construction organizations to objectively estimate the impact of various categories of risks on the results of the construction projects' implementation, as

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 6, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 6, 2023

well as the limitations of existing tools used to justify the parameters for the implementation of construction projects, taking into account the risks of the internal and external environment. The mentioned above features determined the feasibility of conducting the research, which purpose is to develop the tools for determination of the characteristics for organizational and technological solutions aimed at reducing the impact of risks on the results of construction projects' implementation.

Materials and methods. The methodology of the substantiation of the characteristics of organizational and technological solutions aimed at reducing the impact of risks on the results of construction projects has been developed. The methodology assumes forming the analytical model of dependence of risk indicator value from parameters of the construction project to be realized (risk parameters) with further building and realization of an optimization model to substantiate changes of the managed risk parameters on the basis of criteria of total expenses for realization of the indicated changes and actual values of indicators of negative influence of risk on the results of realization of construction project.

Results. The developed method has been realized by the practical example, as a result of the corresponding calculation procedures the values of the parameters' changes of the operating process of the investment and building organization of the oil and gas sector to provide the required values of the actual average (by objects) term of delay in putting into operation and the share of the objects put into operation on time have been obtained.

Conclusions. Based on the results of the implementation of the proposed methodology on a practical example, the conclusion of a high practical significance of the developed tool has been made. The features of the developed method that reduce the area of its effective application have been identified, in particular, dependence of the adequacy of the results of the method realization on the adequacy of the analytical model of dependence of the risk indicator value on the parameters of the ongoing construction project. For elimination of the revealed disadvantages, the updating of the methodology on the further stages of research is planned.

KEYWORDS: construction project, risk indicator, dependence, optimization model, technique, construction object

FOR CITATION: Chereneva A.A., Mishakova A.V., Radaev A.E. Optimization of the characteristics of organizational and technological solutions aimed at reducing the impact of project risks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):935-961. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.935-961 (rus.).

Corresponding author: Anton E. Radaev, tw-inc@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития строительной отрасли, характеризующихся повышением требований к срокам и качеству реализации проектов жилищного и промышленного строительства, особую важность приобретают вопросы рационального учета различных категорий рисков при обосновании целесообразности и экономической эффективности упомянутых проектов. Данное обстоятельство обусловлено не столько сложностью идентификации факторов внутренней и внешней среды, определяющих наличие рисков в рамках отдельного строительного проекта, сколько трудностью установления взаимосвязей между отдельными параметрами процесса реализации проекта и количественными характеристиками негативного влияния вышеуказанных рисков на результаты реализации проекта. При этом результаты предварительного обзора и анализа научных работ в области учета различных категорий рисков в строительной сфере свидетельствуют об отсутствии эффективных инструментальных средств для обоснования параметров реализации строительных проектов, учитывая риски внутренней и внешней среды. Указанные особенности определили целесообразность проведения исследования, целью которого является разработка инструментальных средств обоснования характеристик организационно-технологических решений (ОТР), направленных на снижение влияния рисков на результаты реализации строительных проектов.

Для достижения цели исследования сформулированы следующие задачи:

1. Обзор и анализ научных работ в области решения задач обоснования характеристик строитель-

ных процессов с учетом рисков внутренней и внешней среды.

2. Разработка методики обоснования характеристик ОТР, направленных на снижение влияния рисков на результаты реализации строительных проектов.

3. Реализация разработанной методики на практическом примере.

Объект исследования — ОТР, направленные на снижение влияния рисков на результаты реализации строительных проектов.

Предмет исследования — характеристики ОТР, а также взаимосвязи указанных характеристик с показателями риска.

На начальных этапах исследования был выполнен обзор и анализ научных трудов, относящихся к тематике настоящей работы [1–20]. По результатам выполнения соответствующих процедур сделаны частные выводы:

1. Все релевантные научные работы могут быть классифицированы по следующим основным признакам:

- характер научных разработок: методические разработки (имеющие обзорный или концептуальный характер) [3, 10, 12, 14, 16, 18, 20] и инструментальные средства (представляющие собой модели, алгоритмы и т.п. для решения конкретных прикладных задач) [1, 2, 3–6, 7–9, 11, 13, 15, 17, 19];

- объект рассмотрения: система риск-менеджмента на предприятиях строительной индустрии, в том числе организациях государственного строительного надзора [1, 3, 10, 12, 14, 16, 18, 20]; риски, оказывающие негативное влияние на пока-

затели реализации строительных проектов [2, 4, 6, 7–9, 13, 17, 19]; риски, оказывающие негативное влияние на показатели функционирования (эксплуатации) объекта строительства [5, 11, 15];

- категория научных результатов: элементы концепции (анализ проблем, классификация рисков, структура процесса управления рисками и т.д.) риск-менеджмента с учетом специфических особенностей предприятий строительной отрасли [3, 10, 12, 14, 16, 18, 20]; методика определения цены и уровня риска с учетом различных технических решений [11, 15]; аналитические модели оценки параметров риска с учетом агрегированных показателей (стоимости, длительности, качества) реализации строительных проектов [5, 6, 7–9, 13, 17]; методика оценки показателей риска как статистического показателя вариативности параметров для статистической совокупности проектов [1, 2, 19];

- категория применяемых инструментальных средств: методы экспертного оценивания и статистической обработки информации [1]; элементы теории вероятностей [8, 9, 13, 17]; методы анализа и аппроксимации данных с использованием алгоритмов оптимизации ISTA (Iterative Soft-Thresholding Algorithm) [2], а также Байесовской оптимизации [4]; методы структурной оптимизации [19]; методы нечеткой логики [8]; метод анализа иерархий [5, 6].

2. Существующие научные разработки, соответствующие тематике исследования, имеют основные недостатки:

- отсутствие формализованного (аналитического) описания взаимосвязей между характеристиками ОТР, формируемых на различных стадиях реализации строительного проекта, и показателями риска [1, 3, 10, 12, 14, 16, 18, 20];

- относительно небольшая степень универсальности разработки при рассмотрении влияния конкретного вида риска на процесс функционирования объекта строительства определенной категории с учетом соответствующих специфических особенностей [11, 15];

- отсутствие принципов формирования организационно-технологических или иных решений, направленных на уменьшение негативного влияния риска [2, 4–6, 7–9, 13, 17, 19], а также невозможность объективной оценки практической значимости научной разработки ввиду отсутствия результатов ее реализации на практическом примере [8, 9, 13, 17].

На основе вышеизложенного сделан вывод о недостаточной степени проработанности вопросов обоснования характеристик ОТР для уменьшения негативного влияния рисков на результаты реализации проектов строительства. Данное обстоятельство, в свою очередь, определило целесообразность разработки методики обоснования характери-

стик вышеупомянутых решений с использованием средств аналитического и оптимизационного моделирования. Подробное описание инструментального средства представлено в следующем разделе работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На промежуточных этапах исследования была разработана методика обоснования характеристик ОТР, направленных на снижение влияния рисков на результаты реализации строительных проектов.

Основными положениями разработанной методики явились следующие:

1. Объектом рассмотрения служит взаимосвязь между отдельными параметрами процесса реализации строительного проекта и количественными характеристиками риска несвоевременности завершения строительства (сдачи в эксплуатацию) соответствующего объекта относительно проектных сроков.

2. Основная количественная характеристика риска — срок задержки сдачи объекта строительства в эксплуатацию (далее — показатель риска).

3. Ключевые параметры процесса реализации объекта строительства, оказывающие наиболее существенное влияние на показатель риска (далее — параметры риска), в общем случае включают количественные характеристики, относящиеся как непосредственно к объекту строительства, так и к организациям, обеспечивающим выполнение соответствующих работ на послепроектной стадии строительства.

4. Существует линейная функциональная зависимость между значением показателя риска и значениями параметров риска для отдельного объекта строительства, определяемая выражением:

$$y = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j \cdot x_j, \quad (1)$$

где y — значение показателя риска, мес.; a_0 — значение условно-постоянной компоненты прогнозного значения показателя риска, мес.; n — количество параметров риска, ед.; a_j — значение коэффициента пропорциональности значения показателя риска значению параметра риска с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$), мес./ЕИ $_j$; x_j — значение параметра риска с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$), ЕИ; ЕИ $_j$ — единицы измерения, определяемые физическим смыслом каждого отдельного параметра риска с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$) в соответствии с табл. 2.1.

5. Параметры функциональной зависимости, указанной в п. 4, могут быть определены на основе выборки проектов (объектов) строительства, для которых известны значения параметров риска, а также показателя риска, с использованием про-

цедур многофакторной линейной регрессии, а также метода наименьших квадратов и метода Крамера для решения системы соответствующих линейных уравнений [21].

6. Адекватность аналитической модели функциональной зависимости, указанной в п. 4, может быть оценена по критерию коэффициента детерминации; при этом условие, обеспечивающее адекватность аналитической модели, имеет вид:

$$R^2 \geq 0,7, \quad (2)$$

где R^2 — коэффициент детерминации, вычисляемый на основе прогнозных и фактических значений показателя риска для каждого из объектов строительства в составе выборки, указанной в п. 5.

7. Параметры риска в общем случае могут быть разделены на следующие категории.

7.1. — в зависимости от возможности управления:

- неуправляемые параметры, значения которых не могут быть изменены в рамках реализации организационно-управленческих решений, направленных на снижение риска, указанного в п. 1;
- управляемые параметры, значения которых могут быть изменены посредством реализации организационно-управленческих решений, направленных на снижение риска, указанного в п. 1.

7.2. — в зависимости от принципа взаимосвязи с показателем риска:

- «положительные» параметры, увеличение значения которых обуславливает уменьшение значения показателя риска;
- «отрицательные» параметры, увеличение которых обуславливает увеличение значения показателя риска.

8. В процессе анализа влияния различных вариантов изменений значений управляемых параметров риска на прогнозных значениях показателя риска для объектов строительства в составе выборки, указанной в п. 5, последние в общем случае могут быть разделены на категории:

- объекты строительства, своевременно сдаваемые в эксплуатацию, для которых прогнозное значение показателя риска (для рассматриваемого варианта изменения управляемых параметров риска) принимает нулевое или отрицательное значение;
- объекты строительства, несвоевременно сдаваемые в эксплуатацию, для которых прогнозное значение показателя риска (для рассматриваемого варианта изменения управляемых параметров риска) принимает положительное значение.

9. Необходимо определить фактические значения изменений параметров риска, при которых будут обеспечиваться минимальные суммарные

затраты на реализацию указанных изменений при условии, что средние (по объектам строительства в составе выборки, указанной в п. 5) итоговые значения управляемых параметров риска и показателя риска, а также значение доли своевременно сдаваемых в эксплуатацию (в соответствии с прогнозными итоговыми значениями показателя риска) объектов строительства в общем количестве объектов будут находиться в пределах заданных допустимых значений.

Структура методики определяется блок-схемой, представленной на рис. 1, и предполагает последовательное выполнение следующих основных этапов:

1. Подготовка исходных данных, в том числе идентификация параметров реализации проекта строительства, определяющих показатель риска (срок задержки строительства объекта и, как следствие, сдачи его в эксплуатацию), а также формирование выборки строительных проектов с известными значениями параметров и показателя риска (блок 1 схемы на рис. 1). Общий перечень исходных данных представлен в табл. 1 (подразделы 1.1–1.7).

2. Формирование аналитической модели зависимости значения показателя риска от значений параметров риска в соответствии с пп. 4–6 основных положений методики, описанных в предыдущем подразделе работы (блок 2.1 схемы на рис. 1). Данная процедура предполагает последовательный расчет определенных расчетных характеристик (подробное описание которых представлено в табл. 2), а также проверку адекватности аналитической модели по условию (2) (блок 2.2 схемы на рис. 1). В случае невыполнения условия производится корректировка исходных данных в части выборки строительных проектов (блок 2.3 схемы на рис. 1) с последующим повторным выполнением процедуры до тех пор, пока для рассматриваемого варианта исходных данных не будет обеспечено выполнение условия (2); в противном случае производится выполнение нижеследующего этапа.

3. Формирование неизвестных переменных (табл. 1) и расчетных характеристик (табл. 3) оптимизационной модели обоснования характеристик ОТР, направленных на снижение влияния рисков на результаты реализации строительных проектов (блок 3 схемы на рис. 1). Более подробная информация представлена в табл. 1 (подразделы 2.1–2.3) и табл. 3.

4. Построение оптимизационной модели обоснования характеристик ОТР, направленных на снижение влияния рисков на результаты реализации строительных проектов.

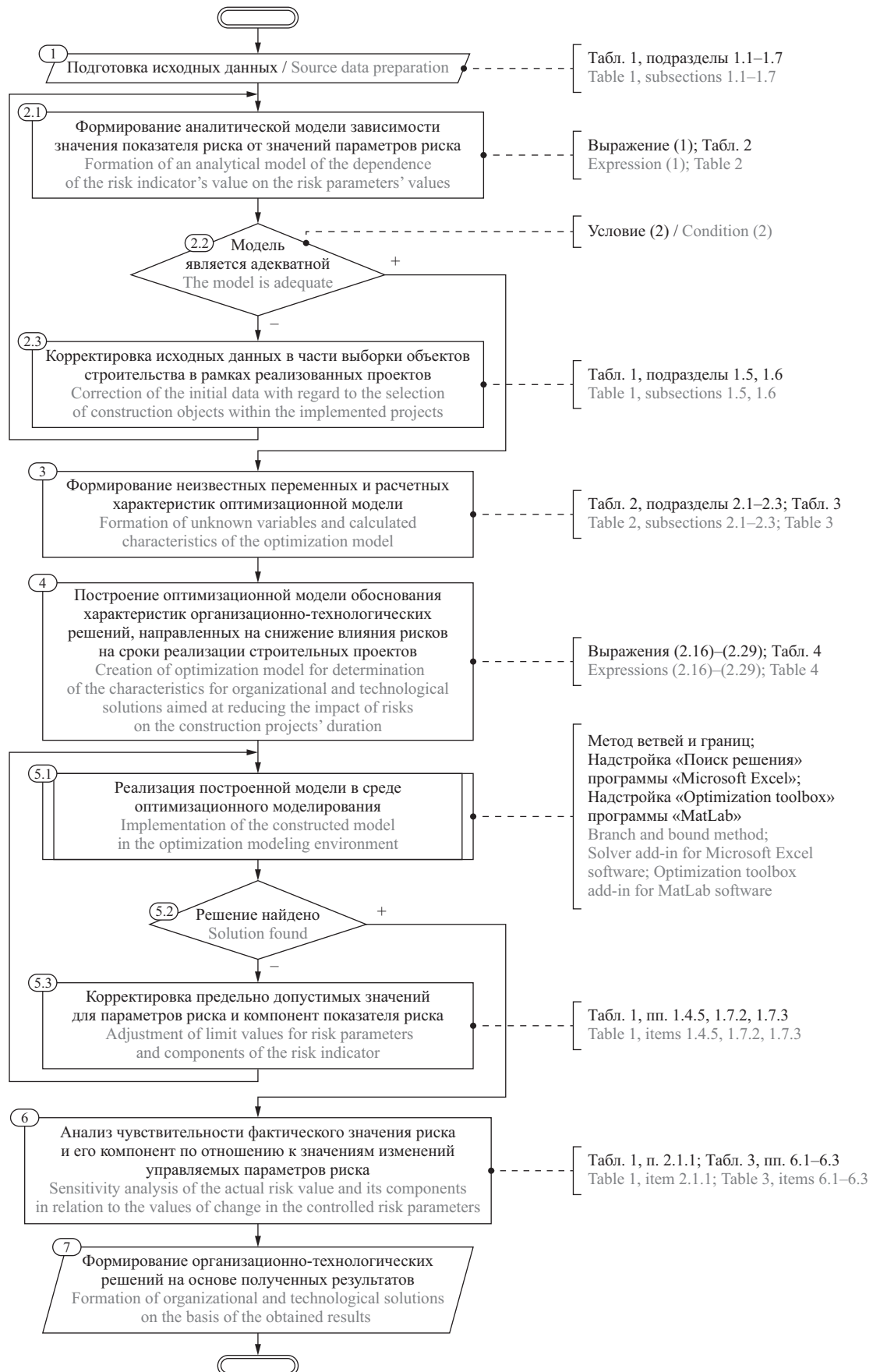


Рис. 1. Блок-схема, описывающая структуру разработанной методики
Fig. 1. Block diagram describing the structure of the developed procedure

Табл. 1. Исходные данные и неизвестные переменные, учитываемые в рамках разработанной методики

Table 1. Source data and unknown variables taken into account within the developed procedure

Номер Number	Наименование элемента исходных данных/категории неизвестных переменных Name of source data element/category of unknown variables	Единицы измерения ⁽¹⁾ Measure unit ⁽¹⁾	Обозначение/выражение Designation/expression
1	Исходные данные Source data		
1.1	Параметры структуры исходных данных Source data structure parameters		
1.1.1	Количество параметров риска Risk parameters number	ед. unit	n
1.1.2	Количество объектов строительства Construction objects number	ед. unit	m
1.2	Индексы и множества Indexes and sets		
1.2.1	Индекс параметра риска Risk parameter index	—	$j = 1, 2, \dots, n$
1.2.2	Индекс объекта строительства Construction object index	—	$i = 1, 2, \dots, m$
1.2.3	Множество индексов управляемых параметров риска ⁽²⁾ Set of indexes related to controlled risk parameters ⁽²⁾	—	J'
1.2.4	Множество индексов неуправляемых параметров риска ⁽³⁾ Set of indexes related to uncontrolled risk parameters ⁽³⁾	—	J''
1.2.5	Множество индексов целочисленных параметров риска Set of indexes related to integer risk parameters	—	J^{int}
1.2.6	Множество целых чисел Set of integer values	—	$Z = \{\dots, -1, 0, 1, \dots\}$
1.3	Исходные данные, учитываемые для каждого отдельного параметра риска с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$) Source data taken into account for each individual risk parameter with index j ($j = 1, 2, \dots, n$)		
1.3.1	Наименование параметра риска Risk parameter name	—	—
1.3.2	Индикатор принадлежности к управляемым параметрам ⁽⁴⁾ Indicator of belonging to controlled parameters ⁽⁴⁾	—	γ_j
1.4	Исходные данные, учитываемые для каждого отдельного управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J'$) Source data taken into account for each individual controlled risk parameter with index j ($j \in J'$)		
1.4.1	Предельное значение параметра риска ⁽⁵⁾ Limit value of the risk parameter ⁽⁵⁾	ЕИ MU_j	x_j^{lim}
1.4.2	Значение изменения параметра риска Risk parameter change value	минимальное minimal	Δx_j^{min}
1.4.3		максимальное ⁽⁶⁾ maximal ⁽⁶⁾	Δx_j^{max}
1.4.4	Удельные затраты на реализацию изменения параметра риска Specific costs for the implementation of a change in the risk parameter	д.е./ЕИ CU/MU_j	c_j
1.4.5	Предельное среднее итоговое значение параметра риска Threshold average final value of the risk parameter	ЕИ MU_j	\bar{x}_j^{lim}
1.5	Исходные данные, учитываемые для каждого отдельного объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) Source data taken into account for each individual construction object with index i ($i = 1, 2, \dots, m$)		
1.5.1	Регион строительства Construction region	—	—
1.5.2	Код стройки Construction code	—	—
1.5.3	Фактическое исходное значение показателя риска Actual initial value of risk indicator	мес. month	y_i^0

Окончание табл. 1 / End of Table 1

Номер Number	Наименование элемента исходных данных/категории неизвестных переменных Name of source data element/category of unknown variables	Единицы измерения ⁽¹⁾ Measure unit ⁽¹⁾	Обозначение/выражение Designation/expression
1.6	Исходные данные, учитываемые для каждого отдельного объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) в части каждого отдельного параметра риска с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$) Source data taken into account for each individual construction object with index i ($i = 1, 2, \dots, m$) in terms of each individual risk parameter with index j ($j = 1, 2, \dots, n$)		
1.6.1	Исходное значение параметра риска для объекта строительства The initial value of the risk parameter for the construction object	ЕИ _{j} MU_j	x_{ij}^0
1.7	Агрегированные исходные данные Aggregated source data		
1.7.1	Максимальное значение показателя риска ⁽⁷⁾ Maximal value of the risk indicator ⁽⁷⁾	мес. month	τ^{\max}
1.7.2	Максимальное среднее (по объектам строительства) значение показателя риска Maximal average (for construction objects) value of the risk indicator	мес. month	\bar{T}^{\max}
1.7.3	Минимальное значение доли своевременно сдаваемых объектов строительства Minimal value of the share of construction objects timely put into operation	—	P^{\min}
2	Неизвестные переменные Unknown variables		
2.1	Неизвестные переменные, учитываемые для каждого управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J'$) Unknown variables taken into account for each controlled risk parameter with index j ($j \in J'$)		
2.1.1	Фактическое значение изменения параметра риска The actual value of risk parameter change	ЕИ _{j} MU_j	Δx_j
2.2	Исходные данные, учитываемые для каждого отдельного объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) в части каждого отдельного управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J'$) Source data taken into account for each individual construction object with index i ($i = 1, 2, \dots, m$) in terms of each individual controlled risk parameter with index j ($j \in J'$)		
2.2.1	Корректирующее отклонение управляемого параметра риска для объекта строительства Corrective deviation of the controlled risk parameter for the construction object	ЕИ _{j} MU_j	Δx_{ij}
2.2.2	Индикатор достижения расчетным значением управляемого параметра риска соответствующего предельного значения ⁽⁸⁾ Indicator of the achievement by the calculated value of the controlled risk parameter of the corresponding limit value ⁽⁸⁾	—	λ_{ij}
2.3	Неизвестные переменные, учитываемые для каждого отдельного объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) Unknown variables taken into account for each individual construction object with index i ($i = 1, 2, \dots, m$)		
2.3.1	Индикатор своевременности сдачи объекта в эксплуатацию ⁽⁹⁾ Indicator of the timeliness of putting the object into operation ⁽⁹⁾	—	θ_i

Примечание: ⁽¹⁾ — обозначение ЕИ _{j} определяет уникальную для каждого отдельного параметра риска (с индексом j) единицу измерения в соответствии с его физическим смыслом (более подробная информация представлена в табл. 5);
⁽²⁾ — взаимосвязь элемента исходных данных с элементом п. 1.3.2 таблицы определяется выражением $J' = \{j | \gamma_j = 1\}$;
⁽³⁾ — взаимосвязь элемента исходных данных с элементом п. 1.3.2 таблицы определяется выражением $J'' = \{j | \gamma_j = 0\}$;
⁽⁴⁾ — значение элемента исходных данных является бинарным ($\gamma_j \in \{0; 1\}$) и формируется в соответствии со следующими принципами: $\gamma_j = 1$ в случае, если параметр риска с индексом j является управляемым; в противном случае $\gamma_j = 0$;
⁽⁵⁾ — значение элемента исходных данных должно удовлетворять следующему условию: $x_j^{\lim} \geq \max_i \{x_{ij}^0\}$, если параметр риска с индексом j является «положительным»; $x_j^{\lim} \leq \min_i \{x_{ij}^0\}$, если параметр риска с индексом j является «отрицательным»; ⁽⁶⁾ — значение элемента исходных данных может быть определено с использованием выражения:

$$\Delta x_j^{\max} = \begin{cases} x_j^{\lim} - \min_i \{x_{ij}^0\}, & j \in J^+; \\ \max_i \{x_{ij}^0\} - x_j^{\lim}, & j \in J^-; \end{cases}$$

компоненты выражения определяются пп. 1.4.1, 1.6.1 данной таблицы, а также пп. 1.1, 1.2 табл. 3; ⁽⁷⁾ — значение элемента исходных данных определяется значениями элемента п. 1.5.3 таблицы и должно удовлетворять условию: $\tau^{\max} \geq \max \{\tilde{y}_{ij}^0\}$; ⁽⁸⁾ — значение неизвестной переменной является бинарным ($\lambda_{ij} \in \{0; 1\}$) и формируется в соответствии со следующими принципами: $\lambda_{ij} = 1$ в случае, если $x_{ij}^0 + \Delta x_j \geq x_j^{\lim}$ при $\phi_j = 1$ или $x_{ij}^0 - \Delta x_j \leq x_j^{\lim}$ при $\phi_j = -1$; в противном случае $\lambda_{ij} = 0$; ⁽⁹⁾ — значение неизвестной переменной является бинарным ($\theta_i \in \{0; 1\}$) и формируется в соответствии со следующими принципами: $\theta_i = 1$ в случае, если объект строительства с индексом i является своевременно сдаваемым в эксплуатацию (в соответствии с прогнозным итоговым значением показателя риска); в противном случае $\theta_i = 0$.

Note: ⁽¹⁾ — the designation MU_j defines a measure unit that is unique for each individual risk parameter (with index j) in accordance with its physical meaning (more detailed information is presented in Table 5); ⁽²⁾ — the interconnection between the source data element and the element related to the item 1.3.2 of the table is determined by the expression $J' = \{j | \gamma_j = 1\}$; ⁽³⁾ — the interconnection between the source data element and the element related to the item 1.3.2 of the table is determined by the expression $J'' = \{j | \gamma_j = 0\}$; ⁽⁴⁾ — the value of the input data element is binary ($\gamma_j \in \{0; 1\}$) and is formed in accordance with the following principles: $\gamma_j = 1$ in case the risk parameter with index j is controlled; otherwise $\gamma_j = 0$; ⁽⁵⁾ — the value of the source data element must satisfy the following condition: $x_j^{\lim} \geq \max \{x_{ij}^0\}$, if the risk parameter with index j is “positive”; $x_j^{\lim} \leq \min \{x_{ij}^0\}$, if the risk parameter with index j is “negative”; ⁽⁶⁾ — the value of the source data element can be determined with the use of the expression:

$$\Delta x_j^{\max} = \begin{cases} x_j^{\lim} - \min \{x_{ij}^0\}, j \in J^+; \\ \max \{x_{ij}^0\} - x_j^{\lim}, j \in J^-; \end{cases}$$

the components of the expression are defined by items 1.4.1, 1.6.1 of this table, as well as items 1.1, 1.2 of table 3; ⁽⁷⁾ — the value of the source data element is determined by the values of the element related to the item 1.5.3 of the table and must satisfy the condition: $\tau^{\max} \geq \max \{\tilde{y}_{ij}^0\}$; ⁽⁸⁾ — the value of the unknown variable is binary ($\lambda_{ij} \in \{0; 1\}$) and is formed in accordance with the following principles: $\lambda_{ij} = 1$ in case $x_{ij}^0 + \Delta x_j \geq x_j^{\lim}$ and $\phi_j = 1$ or $x_{ij}^0 - \Delta x_j \leq x_j^{\lim}$ and $\phi_j = -1$; otherwise $\lambda_{ij} = 0$; ⁽⁹⁾ — the value of the unknown variable is binary ($\theta_i \in \{0; 1\}$) and is formed in accordance with the following principles: $\theta_i = 1$ in case the construction object with the index i is timely put into operation (in accordance with the predicted final value of the risk indicator); otherwise $\theta_i = 0$.

Табл. 2. Расчетные характеристики, вычисляемые в рамках процедуры формирования аналитической модели зависимости значения показателя риска от значений параметров риска

Table 2. Calculated characteristics enumerated during the creation of analytical model for the dependence of the risk indicator's value on the risk parameters' values

Номер Number	Наименование расчетной характеристики Calculated characteristic name	Единицы измерения ⁽¹⁾ Measure unit ⁽¹⁾	Обозначение/выражение Designation/expression
1	Расчетные характеристики, вычисляемые в процессе формирования аналитической модели Calculated characteristics enumerated during the analytical model's formation		
1.1	Агрегированные расчетные характеристики Aggregated calculated characteristics		
1.1.1	Главная матрица системы уравнений ⁽²⁾ The main matrix connected to the system of equations ⁽²⁾	—	$A = \{A_{kl}\};$ $A_{kl} = \begin{cases} m_k, & \text{if } k = 0, l = 0; \\ \sum_{i=1}^m x_{ij=k}^0, & \text{if } k \geq 1, l = 0; \\ \sum_{i=1}^m x_{ij=l}^0, & \text{if } k = 0, l \geq 1; \\ \sum_{i=1}^m x_{ij=k}^0 \cdot x_{ij=l}^0, & \text{otherwise} \end{cases}$
1.1.2	Определитель главной матрицы системы уравнений Determinant of the main matrix connected to the system of equations	—	$\Delta = A $
1.2	Расчетные характеристики, вычисляемые для каждого отдельного параметра аналитической модели с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$) ⁽³⁾ Estimated characteristics calculated for each individual parameter of the analytical model with index j ($j = 1, 2, \dots, n$) ⁽³⁾		

Окончание табл. 2 / End of Table 2

Номер Number	Наименование расчетной характеристики Calculated characteristic name	Единицы измерения ⁽¹⁾ Measure unit ⁽¹⁾	Обозначение/выражение Designation/expression
1.2.1	Частная матрица системы уравнений ⁽²⁾ Partial matrix connected to the system of equations ⁽²⁾	—	$A_j = \{A_{kl}^j\};$ $A_{kl}^j = \begin{cases} \sum_{i=1}^m y_i^0, & \text{if } k = 0, l = j; \\ \sum_{i=1}^m y_i^0 \cdot x_{ij=k}^0, & \text{if } k \geq 1, l = j; \\ A_{kl}, & \text{otherwise} \end{cases}$
1.2.2	Определитель частной матрицы системы уравнений Determinant of the partial matrix connected to the system of equations	—	$\Delta_j = A_j $
1.2.3	Значение параметра аналитической модели Analytical model parameter value	мес./ (EI_j) month/ (MU_j)	$a_j = \frac{\Delta_j}{\Delta}$
2	Расчетные характеристики, вычисляемые в процессе оценки адекватности аналитической модели Calculated characteristics enumerated during the analytical model's adequacy assessment		
2.1	Расчетные характеристики, вычисляемые для каждого отдельного объекта строительства с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$) Calculated characteristics enumerated for each individual construction object with an index j ($j = 1, 2, \dots, n$)		
2.1.1	Прогнозное исходное значение показателя риска Predicted initial value of the risk indicator	мес. month	$\tilde{y}_i^0 = a_{j=0} + \sum_{j=1}^n a_j \cdot x_{ij}^0$
2.2	Агрегированные расчетные характеристики Aggregated calculated characteristics		
2.2.1	Коэффициент детерминации Determination ratio	—	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (\tilde{y}_i^0 - y_i^0)^2}{\sum_{i=1}^m \left(y_i^0 - \frac{\sum_{i'=1}^m y_{i'}^0}{m} \right)^2}$

Примечание: ⁽¹⁾ — обозначение EI_j определяет уникальную для каждого отдельного параметра риска единицу измерения в соответствии с его физическим смыслом (более подробная информация представлена в табл. 4); ⁽²⁾ — матрица имеет $n + 1$ строк и $n + 1$ столбцов; для описания соответствующих структурных элементов используются индекс строк k ($0, 1, \dots, n$) и индекс столбцов l ($0, 1, \dots, n$); ⁽³⁾ — при индексе параметра аналитической модели $j = 0$ последний является условно-постоянной компонентой прогнозного значения показателя риска (параметр a_0 в выражении (1)); при индексе параметра аналитической модели $j > 0$ последний представляет собой коэффициент пропорциональности значения показателя риска значению параметра риска с индексом j (параметр a_j в выражении (1)).

Note: ⁽¹⁾ — the designation MU_j defines a unique measure unit for each individual risk parameter in accordance with its physical meaning (more detailed information is presented in table 4); ⁽²⁾ — the matrix has $n + 1$ rows and columns; row index k ($k = 0, 1, \dots, n$) and column index l ($l = 0, 1, \dots, n$) are used to describe the corresponding structural elements; ⁽³⁾ — in case index value parameter of the analytical model corresponds to the conditionally constant component of the predicted value of the risk indicator (the parameter in expression (1)); in case index value parameter of the analytical model corresponds to the coefficient describing proportionality of the risk indicator's value to the value of the risk parameter with the index (the parameter in expression (1)).

Табл. 3. Расчетные характеристики, формируемые при построении оптимизационной модели

Table 3. Calculated characteristics formed during the optimization model's creation

Номер Number	Наименование расчетной характеристики Calculated characteristic name	Единицы измерения ⁽¹⁾ Measure unit ⁽¹⁾	Обозначение/выражение Designation/expression
1	Множества / Sets		
1.1	Множество индексов «положительных» параметров риска ⁽²⁾ Set of indexes related to “positive” risk parameters ⁽²⁾	–	$J^+ = \{j \varphi_j = 1\}$
1.2	Множество индексов «отрицательных» параметров риска ⁽²⁾ Set of indexes related to “negative” risk parameters ⁽²⁾	–	$J^- = \{j \varphi_j = -1\}$
2	Расчетные характеристики, вычисляемые для каждого отдельного параметра риска с индексом j ($j = 1, 2, \dots, n$) Calculated characteristics enumerated for each individual risk parameter with index j ($j = 1, 2, \dots, n$)		
2.1	Минимальное исходное значение параметра риска Minimal initial value of the risk parameter	ЕИ _{j} MU_j	$x_j^{0\min} = \min_i \{x_{ij}^0\}$
2.2	Максимальное исходное значение параметра риска Maximal initial value of the risk parameter	ЕИ _{j} MU_j	$x_j^{0\max} = \max_i \{x_{ij}^0\}$
2.3	Среднее исходное значение параметра риска Average initial value of the risk parameter	ЕИ _{j} MU_j	$\bar{x}_j^0 = \frac{\sum_{i=1}^m x_{ij}^0}{m}$
2.4	Коэффициент влияния на показатель риска ^{(3), (4)} The coefficient of influence on the risk indicator ^{(3), (4)}	–	$\varphi_j = -\text{sign}(a_j)$
3	Расчетные характеристики, вычисляемые для каждого отдельного управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J'$) Calculated characteristics enumerated for each individual controlled risk parameter with index j ($j \in J'$)		
3.1	Приведенное среднее итоговое значение параметра риска Reduced average final value of the risk parameter	фактическое ⁽⁵⁾ actual ⁽⁵⁾ ЕИ _{j} MU_j	$\chi_j = \varphi_j \cdot \frac{\sum_{i=1}^m x_{ij}}{m} = \varphi_j \cdot \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij}^0 + \varphi_j \cdot (\Delta x_j - \Delta x_{ij}))}{m}$
3.2		минимальное minimal ЕИ _{j} MU_j	$\chi_j^{\min} = \varphi_j \cdot \bar{x}_j^{\lim}$
4	Расчетные характеристики, вычисляемые для каждого отдельного объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) в части каждого отдельного управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J'$) Calculated characteristics enumerated for each individual construction object with index i ($i = 1, 2, \dots, m$) in terms of each individual controlled risk parameter with index j ($j \in J'$)		
4.1	Максимальное значение корректирующего отклонения Maximal value of corrective deviation	ЕИ _{j} MU_j	$\Delta x_{ij}^{\max} = \Delta x_j^{\max} \cdot \lambda_{ij}$
4.2	Итоговое значение параметра риска The final value of the risk parameter	ЕИ _{j} MU_j	$x_{ij} = x_{ij}^0 + \varphi_j \cdot (\Delta x_j - \Delta x_{ij})$
4.3		фактическое actual ЕИ _{j} MU_j	$\Delta x_{ij} = \varphi_j \cdot (\Delta x_j - \Delta x_{ij})$
4.4	Интегральное отклонение параметра риска Integral deviation of the risk parameter	минимальное minimal ЕИ _{j} MU_j	$\Delta X_{ij}^{\min} = \begin{cases} (x_j^{\lim} - x_{ij}^0) \cdot \lambda_{ij}, & j \in J^+; \\ x_j^{\lim} - x_{ij}^0, & j \in J^- \end{cases}$
4.5		максимальное maximal ЕИ _{j} MU_j	$\Delta X_{ij}^{\max} = \begin{cases} x_j^{\lim} - x_{ij}^0, & j \in J^+; \\ (x_j^{\lim} - x_{ij}^0) \cdot \lambda_{ij}, & j \in J^- \end{cases}$

Окончание табл. 3 / End of Table 3

Номер Number	Наименование расчетной характеристики Calculated characteristic name	Единицы измерения ⁽¹⁾ Measure unit ⁽¹⁾	Обозначение/выражение Designation/expression
5	Расчетные характеристики, вычисляемые для каждого отдельного объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) Calculated characteristics enumerated for each individual construction object with index i ($i = 1, 2, \dots, m$)		
5.1	Итоговое прогнозное значение показателя риска Final predicted value of the risk indicator	фактическое actual	мес. month
5.2		минимальное minimal	мес. month
5.3		максимальное maximal	мес. month
6	Агрегированные расчетные характеристики Aggregated calculated characteristics		
6.1	Фактическое среднее (по объектам строительства) значение показателя риска — срока задержки сдачи объекта строительства в эксплуатацию The actual average (for construction objects) value of the risk indicator — the period of delay for construction object's putting into operation	мес. month	$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^m \tilde{y}_i}{m} = a_0 + \frac{\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j \in J'} a_j \cdot (x_{ij}^0 + \varphi_j \cdot (\Delta x_j - \Delta x_{ij})) + \sum_{j \in J''} a_j \cdot x_{ij}^0 \right)}{m}$
6.2	Фактическое значение доли своевременно сдаваемых объектов строительства The actual value of the share of construction projects timely put into operation	—	$P = \frac{\sum_{i=1}^m \theta_i}{m}$
6.3	Фактическое значение риска Actual risk value	—	$\Omega = \bar{T} \cdot (1 - P)$
6.4	Суммарные затраты на реализацию изменений параметров риска Total costs for implementation of the changes in risk parameters	д.е. CU	$C^\Sigma = \sum_{j \in J'} c_j \cdot \Delta x_j$

Примечание: ⁽¹⁾ — обозначение EU_j определяет уникальную для каждого отдельного параметра риска единицу измерения в соответствии с его физическим смыслом (более подробная информация представлена в табл. 5); ⁽²⁾ — значение расчетной характеристики определяется значением элемента п. 2.4 таблицы; ⁽³⁾ — значение расчетной характеристики определяет характер влияния значения параметра риска на значение показателя риска: значение $\varphi_j = 1$ соответствует «положительному» параметру риска с индексом j ; значение $\varphi_j = -1$ — соответственно «отрицательному» параметру риска (см. п. 5 основных положений методики); ⁽⁴⁾ — функция sign в составе соответствующего выражения возвращает знак соответствующей расчетной величины (принимает значение $-1, 0, 1$ при соответственно отрицательном, нулевом и положительном значении аргумента); ⁽⁵⁾ — значение расчетной характеристики определяется значением элемента п. 4.2 таблицы.

Note: ⁽¹⁾ — the designation EU_j defines a measure unit that is unique for each individual risk parameter (with index j) in accordance with its physical meaning (more detailed information is presented in Table 5); ⁽²⁾ — the value of the calculated characteristic is determined by the value of the element related to the item 2.4 of the table; ⁽³⁾ — the value of the calculated characteristic determines the nature of the influence of the risk parameter's value on the risk indicator's value: the value $\varphi_j = 1$ corresponds to the “positive” risk parameter with index j ; value $\varphi_j = -1$ — according to the “negative” risk parameter (see paragraph 5 of the procedure's main provisions); ⁽⁴⁾ — the function “sign” as part of the corresponding expression returns the sign of the corresponding calculated value (takes the value $-1, 0, 1$ for negative, zero and positive values of the argument, respectively); ⁽⁵⁾ — the value of the calculated characteristic is determined by the value of the element related to the item 4.2 of the table.

Структура оптимизационной модели определяется следующими выражениями:

- в обобщенной форме записи:

$$C^{\Sigma}(\{\Delta x_j\}) \rightarrow \min; \quad (3)$$

$$\Delta x_j^{\min} \leq \Delta x_j \leq \Delta x_j^{\max}, j \in J'; \quad (4)$$

$$\Delta x_{ij} \geq 0, i = 1, 2, \dots, m; j \in J'; \quad (5)$$

$$\Delta x_j \in Z, j \in J'; j \in J^{\text{int}}; \quad (6)$$

$$\Delta x_{ij} \in Z, i = 1, 2, \dots, m; j \in J'; j \in J^{\text{int}}; \quad (7)$$

$$\lambda_{ij} \in \{0; 1\}, i = 1, 2, \dots, m; j \in J'; \quad (8)$$

$$\theta_i \in \{0; 1\}, i = 1, 2, \dots, m; \quad (9)$$

$$\Delta x_{ij} \leq \Delta x_{ij}^{\max}(\lambda_{ij}), i = 1, 2, \dots, m; j \in J'; \quad (10)$$

$$\chi_j(\Delta x_j, \Delta x_{ij}) \geq \chi_j^{\min}, j \in J'; \quad (11)$$

$$\Delta x_{ij}^{\min}(\lambda_{ij}) \leq \Delta x_{ij}(\Delta x_j, \Delta x_{ij}) \leq \Delta x_{ij}^{\max}(\lambda_{ij}), \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j \in J';$$

$$\tilde{y}_i^{\min}(\theta_i) \leq \tilde{y}_i(\{\Delta x_j\}, \{\Delta x_{ij}\}) \leq \tilde{y}_i^{\max}(\theta_i), \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, m;$$

$$\bar{T}(\{\Delta x_j\}, \{\Delta x_{ij}\}) \leq \bar{T}^{\max}; \quad (14)$$

$$P(\{\theta_i\}) \geq P^{\min}; \quad (15)$$

- в развернутой форме записи:

$$\sum_{j \in J'} c_j \cdot \Delta x_j \rightarrow \min; \quad (16)$$

$$\Delta x_j^{\min} \leq \Delta x_j \leq \Delta x_j^{\max}; j \in J'; \quad (17)$$

$$\Delta x_{ij} \geq 0, i = 1, 2, \dots, m; j \in J'; \quad (18)$$

$$\Delta x_j \in Z, j \in J'; j \in J^{\text{int}}; \quad (19)$$

$$\Delta x_{ij} \in Z, i = 1, 2, \dots, m; j \in J'; j \in J^{\text{int}}; \quad (20)$$

$$\lambda_{ij} \in \{0; 1\}, i = 1, 2, \dots, m; j \in J'; \quad (21)$$

$$\theta_i \in \{0; 1\}, i = 1, 2, \dots, m; \quad (22)$$

$$\Delta x_{ij} \leq \Delta x_{ij}^{\max} \cdot \lambda_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j \in J'; \quad (23)$$

$$\varphi_j \cdot \frac{\sum_{i=1}^m x_{ij}^0 + \varphi_j \cdot (\Delta x_j - \Delta x_{ij})}{m} \geq \varphi_j \cdot \bar{x}_j^{\text{lim}}, j \in J'; \quad (24)$$

$$(x_j^{\text{lim}} - x_{ij}^0) \cdot \lambda_{ij} \leq \varphi_j \cdot (\Delta x_j - \Delta x_{ij}) \leq x_j^{\text{lim}} - x_{ij}^0, \quad (25)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j \in J'; j \in J^+;$$

$$x_j^{\text{lim}} - x_{ij}^0 \leq \varphi_j \cdot (\Delta x_j - \Delta x_{ij}) \leq (x_j^{\text{lim}} - x_{ij}^0) \cdot \lambda_{ij}, \quad (26)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j \in J'; j \in J^-;$$

$$-\tau^{\max} \cdot \theta_i \leq a_0 + \sum_{j \in J'} a_j \cdot (x_{ij}^0 + \varphi_j \cdot (\Delta x_j - \Delta x_{ij})) + \quad (27)$$

$$+ \sum_{j \in J''} a_j \cdot x_{ij}^0 \leq \tau^{\max} \cdot (1 - \theta_i), i = 1, 2, \dots, m;$$

$$a_0 + \left(\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j \in J'} a_j \cdot (x_{ij}^0 + \varphi_j \cdot (\Delta x_j - \Delta x_{ij})) + \right. \right. \quad (28)$$

$$\left. \left. + \sum_{j \in J''} a_j \cdot x_{ij}^0 / m \right) \right) \leq \bar{T}^{\max};$$

$$\frac{\sum_{i=1}^m \theta_i}{m} \geq P^{\min}. \quad (29)$$

Описание компонент целевой функции и непосредственных ограничений модифицированной модели представлено в табл. 1–3. Описание структурных элементов модели приведено в табл. 4.

5. Реализация вышеупомянутой оптимизационной модели с использованием современных программных сред оптимизационного моделирования выполняется для нахождения наиболее предпочтительных значений характеристик ОТР, направленных на снижение риска. Ввиду того, что структурные элементы модели (в частности, выражения (16)–(29)) соответствуют процедуре целочисленной линейной оптимизации, модель может быть эффективно реализована с помощью метода ветвей и границ, доступного в том числе в программах Microsoft Excel (надстройка «Поиск решения») и MatLab (надстройка Optimization Toolbox) [22].

6. Анализ чувствительности фактического значения риска и его компонент (см. пп. 6.1–6.3 табл. 3) по отношению к значениям изменений управляемых параметров риска (см. п. 2.2.1 табл. 1) осуществляется для наиболее объективной оценки взаимосвязи между значениями характеристик вышеупомянутых ОТР и показателями негативного влияния риска на результаты реализации строительного проекта.

7. Формирование ОТР, направленных на снижение риска, на основе результатов выполнения вышеописанных этапов. Фактические значения характеристик указанных решений могут отличаться от результатов, полученных в рамках этапа 5 методики, ввиду наличия ограниченного количества ресурсов или иных особенностей процессов реализации строительных проектов.

Таким образом, разработанная методика базируется на использовании средств аналитического и оптимизационного моделирования для обоснования характеристик ОТР, направленных на уменьшение негативного влияния риска на результаты реализации строительных проектов. Тем не менее для объективной оценки практической значимости разработанного инструментального средства методика была реализована на практическом примере. Более подробная информация представлена в следующем разделе работы.

Табл. 4. Описание структурных элементов оптимизационной модели

Table 4. Description of the optimization model's structural elements

Номер выражения как структурного элемента модели Index of expression as a structural element of the model		Описание Description
Обобщенная форма записи Generalized notation	Развернутая форма записи Extended notation	
(3)	(16)	Целевая функция — суммарные затраты на реализацию изменений параметров риска — минимизируется The objective function — the total cost of implementation of changes in risk parameters — is minimized
(4)	(17)	Прямые ограничения, определяющие соответствие значения переменной Δx_j диапазону допустимых значений для каждого управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J'$) Direct constraints that determine correspondence of the value of the variable Δx_j to the range of acceptable values for each controlled risk parameter with index j ($j \in J'$)
(5)	(18)	Прямые ограничения, определяющие неотрицательность значения переменной Δx_{ij} для каждого управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J'$) и каждого объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) Direct constraints that determine the non-negativity of the variable Δx_{ij} value for each controlled risk parameter with index j ($j \in J'$) and each construction object with index i ($i = 1, 2, \dots, m$)
(6)	(19)	Прямые ограничения, определяющие принадлежность значения переменной Δx_j множеству целых чисел для каждого целочисленного управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J', j \in J^{int}$) Direct constraints that determine belonging of the variable Δx_j value to a set of integer values for each integer controlled risk parameter with index j ($j \in J', j \in J^{int}$)
(7)	(20)	Прямые ограничения, определяющие принадлежность значения переменной Δx_{ij} множеству целых чисел для каждого целочисленного управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J', j \in J^{int}$) и каждого объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) Direct constraints that determine belonging of variable Δx_{ij} value to a set of integer values for each integer controlled risk parameter with index j ($j \in J', j \in J^{int}$) and each construction object with index i ($i = 1, 2, \dots, m$)
(8)	(21)	Прямые ограничения, определяющие бинарность значения переменной λ_{ij} для каждого управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J'$) и каждого объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) Direct constraints that determine the binary value of the variable λ_{ij} for each controlled risk parameter with index j ($j \in J'$) and each construction object with index i ($i = 1, 2, \dots, m$)
(9)	(22)	Прямые ограничения, определяющие бинарность значения переменной θ_i для каждого объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) Direct constraints that determine the binary value of the variable θ_i for each construction object with the index i ($i = 1, 2, \dots, m$)
(10)	(23)	Непрямые ограничения, определяющие взаимосвязь между переменными Δx_{ij} и λ_{ij} для каждого управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J'$) и каждого объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) по принципу: $\Delta x_{ij} \geq 0$ в случае, если $\lambda_{ij} = 1$; в противном случае $\Delta x_{ij} = 0$ Indirect constraints that determine the interconnection between variables Δx_{ij} and λ_{ij} for each controlled risk parameter with index j ($j \in J'$) and each construction object with index i ($i = 1, 2, \dots, m$) in accordance with the principle: $\Delta x_{ij} \geq 0$ in case $\lambda_{ij} = 1$; otherwise $\Delta x_{ij} = 0$

Номер выражения как структурного элемента модели Index of expression as a structural element of the model		Описание Description
Обобщенная форма записи Generalized notation	Развернутая форма записи Extended notation	
(11)	(24)	Непрямые ограничения, определяющие соответствие среднего (по объектам строительства) итогового значения каждого управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J'$) диапазону допустимых значений Indirect constraints that determine the correspondence of the average (for construction projects) final value of each managed risk parameter with index j ($j \in J'$) to the range of acceptable values
(12)	(25), (26)	Непрямые ограничения, определяющие взаимосвязь между переменными Δx_{ij} и λ_{ij} для каждого «положительного» («отрицательного») управляемого параметра риска с индексом j ($j \in J', j \in J^{(-)}$) и каждого объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) по принципу: $ \Delta x_j - \Delta x_{ij} = x_j^{\text{lim}} - x_{ij}^0 $ в случае, если $\lambda_{ij} = 1$; в противном случае $ \Delta x_j - \Delta x_{ij} \leq x_j^{\text{lim}} - x_{ij}^0 $ Indirect constraints that determine the relationship between variables Δx_{ij} and λ_{ij} for each “positive” (“negative”) controlled risk parameter with index j ($j \in J', j \in J^{(-)}$) and each construction object with index i ($i = 1, 2, \dots, m$) in accordance with the principle: $ \Delta x_j - \Delta x_{ij} = x_j^{\text{lim}} - x_{ij}^0 $ in case $\lambda_{ij} = 1$; otherwise $ \Delta x_j - \Delta x_{ij} \leq x_j^{\text{lim}} - x_{ij}^0 $
(13)	(27)	Непрямые ограничения, определяющие взаимосвязь между переменными Δx_j , Δx_{ij} и θ_i для каждого объекта строительства с индексом i ($i = 1, 2, \dots, m$) по принципу: $\tilde{y}_i(\{\Delta x_j\}, \{\Delta x_{ij}\}) \leq 0$ в случае, если $\theta_i = 1$; в противном случае $\tilde{y}_i(\{\Delta x_j\}, \{\Delta x_{ij}\}) > 0$ Indirect constraints that determine the interconnection between variables Δx_j , Δx_{ij} and θ_i for each construction object with an index i ($i = 1, 2, \dots, m$) in accordance with the principle: $\tilde{y}_i(\{\Delta x_j\}, \{\Delta x_{ij}\}) \leq 0$ in case $\theta_i = 1$; otherwise $\tilde{y}_i(\{\Delta x_j\}, \{\Delta x_{ij}\}) > 0$
(14)	(28)	Непрямое ограничение, в соответствии с которым фактическое среднее (по объектам строительства) значение показателя риска не должно превышать соответствующее максимальное значение Indirect constraint, according to which the actual average (for construction projects) value of the risk indicator must not exceed the corresponding maximum value
(15)	(29)	Непрямое ограничение, в соответствии с которым фактическое значение доли своевременно сдаваемых объектов строительства не должно быть меньше соответствующего минимального значения Indirect constraint, according to which the actual value of the share of construction objects timely put into operation must not be less than the corresponding minimum value

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На заключительных этапах исследования произведена реализация разработанной методики на практическом примере — для решения задачи обоснования ОТР в области процесса функционирования инвестиционно-строительной организации нефтегазового сектора, направленных на снижение риска несвоевременности завершения строительства (сдачи в эксплуатацию) объектов — участков газопроводов, расположенных на территории РФ, на основе имеющихся исходных данных по выборке уже реализованных строительных проектов [21]. Состав параметров риска, рассматриваемых в про-

цессе решения задачи, представлен в табл. 5. В качестве управляемых параметров риска рассматривались следующие:

- количество договоров аренды ($j = 1$), определяемое в том числе эффективностью работы отдела экономической оценки строительных проектов;
- количество сотрудников, проверяющих документацию ($j = 4$), определяемое кадровой политикой организации;
- среднее количество документов, предоставляемых агентом ($j = 9$), определяемое в том числе составом функций, перекладываемых на стороннюю организацию.

Значения удельных затрат на реализацию изменений управляемых параметров риска назначались с использованием экспертных методов с учетом возможностей и ресурсных резервов организации.

В рамках выполнения основных этапов методики использовалась программная среда Microsoft Excel. Фрагменты рабочего листа соответствующей книги, содержащие значения элементов ис-

ходных данных, а также результаты формирования аналитической модели зависимости значения показателя риска от значений параметров риска (этап 2 методики) и результаты реализации оптимизационной модели обоснования характеристик ОТР (этап 4 методики) представлены на рис. 2. Принципы заполнения ячеек рабочего листа приведены в табл. 6.

Табл. 5. Состав параметров риска, рассматриваемых в рамках процесса реализации методики на практическом примере

Table 5. Composition of the risk parameters considered during the implementation of the procedure on a practical example

Номер j Number j	Наименование параметра риска Risk parameter name	Единица измерения ЕИ _{j} Measure unit MU_j
1	Количество договоров аренды Number of lease agreements	ед. unit
2	Среднее количество ошибок в документах, предоставляемых генеральным подрядчиком Average number of errors in documents provided by the general contractor	ед. unit
3	Индикатор наличия сопоставительной ведомости ⁽¹⁾ Comparative sheet's availability indicator ⁽¹⁾	—
4	Количество сотрудников, проверяющих документацию Number of employees checking the documentation	чел. prsn.
5	Расстояние от областного центра региона строительства до Санкт-Петербурга Distance from the regional center of the construction region to St. Petersburg	км km
6	Временная разница с Северо-Западным федеральным округом Temporary difference with St. Petersburg	ч h
7	Идентификатор организации, ведущей технический надзор ⁽²⁾ Technical supervision organization identifier ⁽²⁾	—
8	Среднее количество ошибок в документах, предоставляемых агентом Average number of errors in documents provided by the agent	ед. unit
9	Среднее количество документов, предоставляемых агентом Average number of documents provided by the agent	ед. unit
10	Частота допущения ошибок при реализации договоров аренды ⁽³⁾ Frequency of errors during the execution of lease agreements ⁽³⁾	—
11	Срок договора аренды Lease agreement term	дн. day
12	Индикатор наличия пометки «срочный объект» ⁽⁴⁾ Indicator of the “urgent” mark's presence ⁽⁴⁾	—

Примечание: ⁽¹⁾ — значение параметра риска является бинарным и формируется по следующему принципу: значение 1 соответствует наличию подписанной ведомости, значение 0 — отсутствию документа; ⁽²⁾ — значение параметра риска является бинарным и формируется по следующему принципу: значение 0 соответствует организации-агенту, значение 1 — прочей организации; ⁽³⁾ — значение параметра риска варьируется в диапазоне [0; 10], где значение 0 соответствует наименьшей частоте допущения ошибок, а значение 10 — наибольшей частоте; ⁽⁴⁾ — значение параметра риска является бинарным и формируется по следующему принципу: значение 0 соответствует наличию пометки «срочный объект», значение 1 — наличию пометки «несрочный объект».

Note: ⁽¹⁾ — the value of the risk parameter is binary and is formed according to the following principle: the value 1 corresponds to the presence of a signed comparative sheet, the value 0 corresponds to the absence of a document; ⁽²⁾ — the value of the risk parameter is binary and is formed according to the following principle: the value 1 corresponds to the agent organization, the value 0 corresponds to another organization; ⁽³⁾ — the value of the risk parameter varies in the range [0; 10], where the value 0 corresponds to the lowest frequency of errors, and the value 10 corresponds to the highest frequency; ⁽⁴⁾ — the value of the risk parameter is binary and is formed according to the following principle: the value 0 corresponds to the presence of the “urgent” mark, the value 1 — the presence of the “non-urgent” mark.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U		
1	Таблица 1. Параметры структуры исходных данных / Table 1. Source data structure parameters																					
2	№ п.п. No	Наименование элемента структуры исходных данных / Source data structure's parameter name							Обозн. Designation	Ед. изм. Meas. unit	Значение / Value											
3	1	Количество параметров риска / Risk parameters number							n	ед. unit	12											
4	2	Количество объектов строительства / Construction objects number							m	ед. unit	159											
5																						
6	Таблица 2. Исходные данные в части параметров риска / Table 2. Source data related to risk parameters																					
7	Индекс параметра риска / Risk parameter index	Наименование параметра риска / Risk parameter name								Единица измерения / Measure unit	Индикатор принадлежности к управл. параметрам / Controlled parameters indicator	Кумул. кол-во управл. параметров / Cumul. number of contr. parameters										
8																						
9																						
10																						
11																						
12		1	-										ЕД ₁ MU ₁	γ ₁	Γ ₁							
13		-	-										-	-	ЕД ₁ MU ₁							
14		1	Количество договоров аренды / Number of lease agreements								ед. unit	1	1									
15		2	Среднее количество ошибок в документах, предоставляемых генеральным подрядчиком / Average number of errors in documents provided by the general contractor								ед. unit	0	1									
16		3	Индикатор наличия сопоставительной ведомости / Comparative sheet's availability indicator								-	0	1									
17		4	Количество сотрудников, проверяющих документацию / Number of employees checking the documentation								чел. pers.	1	2									
18		5	Расстояние от областного центра региона строительства до Санкт-Петербурга / Distance from the regional center of the construction region to St. Petersburg								км km	0	2									
19		6	Временная разница с Северо-западным федеральным округом / Temporary difference with St. Petersburg								ч h	0	2									
20		7	Идентификатор организации, ведущей технический надзор / Technical supervision organization identifier							-	0	2										
21	8	Среднее количество ошибок в документах, предоставляемых агентом / Average number of errors in documents provided by the agent							ед. unit	0	2											
22	9	Среднее количество документов, предоставляемых агентом / Average number of documents provided by the agent							ед. unit	1	3											
23	10	Частота допущения ошибок при реализации договоров аренды / Frequency of errors during the execution of lease agreements							-	0	3											
24	11	Срок договора аренды / Lease agreement term							дн. day	0	3											
25	12	Индикатор наличия помехи "срочный объект" / Indicator of the "urgent" mark's presence							-	0	3											
26																						
27	Таблица 3.1. Исходные данные, неизвестные переменные и расчетные характеристики в части объектов строительства и параметров риска / Table 3.1. Initial data, unknown variables and calculated characteristics related to the construction objects and risk parameters																					
28	Индекс объекта / Object index	Регион строительства / Construction region	Код стройки / Construction code	Исходное значение параметра риска с индексом (j) / Initial value of risk parameter with index (j)												Исходное значение показателя риска - срока задержки / The initial value of the risk indicator - the delay period						
29																фактиче- ское / actual		прогно- зное / predicted				
30																						
31																						
32																						
33				1	-	-	-	X ⁰ ₁₋₁	X ⁰ ₁₋₂	X ⁰ ₁₋₃	X ⁰ ₁₋₄	X ⁰ ₁₋₅	X ⁰ ₁₋₆	X ⁰ ₁₋₇	X ⁰ ₁₋₈	X ⁰ ₁₋₉	X ⁰ ₁₋₁₀	X ⁰ ₁₋₁₁	X ⁰ ₁₋₁₂	γ ⁰ ₁	μ ⁰ ₁	
34				-	-	-	-	ед. unit	ед. unit	ед. unit	чел. pers.	км km	ч h	ед. unit	ед. unit	дн. day	дн. day	дн. day	дн. day	мес. month	мес. month	
35				1	Псковская область / Pskov region	60/302-2	27	1	1	3	2412	0	0	4	23	6	81	0	56,8	57,68		
36				2	Псковская область / Pskov region	60/303-2	25	1	0	8	2412	0	0	4	23	6	81	1	32,433333	46,96		
37				3	Псковская область / Pskov region	60/304-2	7	1	1	8	2412	0	0	4	23	6	81	1	43,566667	48,64		
38				4	Томская область / Tomsk region	70/305-2	3	1	1	7	4074	4	0	7	35	4	92	1	33,366667	39,77		
39				5	Томская область / Tomsk region	70/306-2	8	1	1	7	4074	4	0	7	35	4	92	1	35,333333	39,70		
189	155	Орловская область / Oryol region	57/730-2	4	7	0	9	1070	0	1	4	23	3	67	1	0	-0,02					
190	156	Орловская область / Oryol region	57/731-2	24	7	0	9	1070	0	1	4	23	3	67	1	0	-0,32					
191	157	Иркутский край / Irkut region	59/67-2	15	1	0	6	1865	2	1	6	23	6	81	1	0	-4,68					
192	158	Рязанская область / Ryazan region	62/235-2	6	3	0	9	912	0	1	2	23	4	67	1	0	7,12					
193	159	Рязанская область / Ryazan region	62/239-2	4	3	0	9	912	0	1	2	23	4	67	1	0	7,15					
194	Минимальное значение / Minimal value		X ⁰ _{min}	ЕД ₁ MU ₁	1	1	0	0	0	0	0	2	23	3	67	0						
195	Максимальное значение / Maximal value		X ⁰ _{max}	ЕД ₁ MU ₁	61	7	1	10	9458	7	1	7	42	8	92	1						
196	Среднее значение / Average value		X ⁰ _{ср}	ЕД ₁ MU ₁	8,8301887	2,490566	0,2641509	8,1320755	1592,1824	0,5597484	0,7861635	3,7295597	24,899371	5,0503145	73,471698	0,9559748						
197	Индикатор принадлежности к неупр. параметрам / Uncontrolled parameters indicator		1-γ _j	-	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1						
198	Коэф-т пропорции для показ-ля риска / Promotion coefficient for risk indicator		α _j	мес./ЕД ₁ month/(E ₁)	-0,015056	-1,468993	1,4082649	-0,19659	0,0019874	-6,852024	-37,28087	-1,005893	1,4526228	-0,399042	-0,111625	-9,341329						
199																						
200	Таблица 4. Агрегированные исходные данные и расчетные характеристики / Table 4. Aggregated source data and calculated characteristics																					
201	№ п.п. / No	Наименование элемента структуры исходных данных или расчетной характеристики / Name of source data element or calculated characteristics							Обозн. / Designation	Ед. изм. / Meas. unit	Значение / Value											
202	1	Исходные данные / Source data																				
203	1.1	Максимальное значение показателя риска / Maximal value of the risk indicator							ε ^{max}	мес. month	57,676711											
204	1.2	Максимальное среднее значение срока задержки (по объектам) / Maximal average value of the risk indicator (for construction objects)							γ ^{max}	-	5											
205	1.3	Минимальное значение доли своевременно сдаваемых объектов / Minimal value of the share of construction objects timely put into operation							μ ^{min}	мес. month	0,7											
206	2	Расчетные характеристики / Calculated characteristics																				
207	2.1	Количество управляемых параметров риска / Number of controlled risk parameters							n*	ед. unit	3											
208	2.2	Условно-постоянная компонента прогноза значения показателя риска / Conditionally constant component of the predicted value of the risk indicator							α ₀	мес. month	44,971369											
209	2.3	Коэф-т детерминации прогнозной модели оценки показателя риска / Determination ratio for predictive model of risk indicator's assessment							R ²	-	0,8366611											
210	2.4	Фактическое среднее (по объектам) значение срока задержки / The actual average (for construction objects) value of the delay period							γ̄	-	1,7635671											
211	2.5	Фактическое значение доли своевременно сдаваемых объектов / The actual value of the share of construction projects timely put into operation							p	мес. month	0,7619063											
212	2.6	Фактическое значение риска / Actual risk value							Ω	мес. month	0,4214815											
213	2.7	Суммарные затраты на реализацию изменений параметров риска / Total costs for implementation of the changes in risk parameters							C ^Σ	CU	21,32											

	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CZ	DA	DB	DC	DD	DE	DF	DG	DH	DI	DJ	DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL	EM	EN	EO	EP	EQ	ER	ES	ET	EU	EV	EW	EX	EY	EZ	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FL	FM	FN	FO	FP	FQ	FR	FS	FT	FU	FV	FW	FX	FY	FZ	GA	GB	GC	GD	GE	GF	GG	GH	GI	GJ	GK	GL	GM	GN	GO	GP	GQ	GR	GS	GT	GU	GV	GW	GX	GY	GZ	HA	HB	HC	HD	HE	HF	HG	HH	HI	HJ	HK	HL	HM	HN	HO	HP	HQ	HR	HS	HT	HU	HV	HW	HX	HY	HZ	IA	IB	IC	ID	IE	IF	IG	IH	II	IJ	IK	IL	IM	IN	IO	IP	IQ	IR	IS	IT	IU	IV	IW	IX	IY	IZ	JA	JB	JC	JD	JE	JF	JG	JH	JI	IJ	JK	KL	KM	KN	KO	KP	KQ	KR	KS	KT	KU	KV	KW	KX	KY	KZ	LA	LB	LC	LD	LE	LF	LG	LH	LI	LJ	LK	LM	LN	LO	LP	LQ	LR	LS	LT	LU	LV	LW	LX	LY	LZ	MA	MB	MC	MD	ME	MF	MG	MH	MI	MJ	MK	ML	MM	MN	MO	MP	MQ	MR	MS	MT	MU	MV	MW	MX	MY	MZ	NA	NB	NC	ND	NE	NF	NG	NH	NI	NJ	NK	NL	NM	NN	NO	NP	NQ	NR	NS	NT	NU	NV	NW	NX	NY	NZ	OA	OB	OC	OD	OE	OF	OG	OH	OI	OJ	OK	OL	OM	ON	OO	OP	OQ	OR	OS	OT	OU	OV	OW	OX	OY	OZ	PA	PB	PC	PD	PE	PF	PG	PH	PI	PJ	PK	PL	PM	PN	PO	PP	PQ	PR	PS	PT	PU	PV	PW	PX	PY	PZ	QA	QB	QC	QD	QE	QF	QG	QH	QI	QJ	QK	QL	QM	QN	QO	QP	QQ	QR	QS	QT	QU	QV	QW	QX	QY	QZ	RA	RB	RC	RD	RE	RF	RG	RH	RI	RJ	RK	RL	RM	RN	RO	RP	RQ	RR	RS	RT	RU	RV	RW	RX	RY	RZ	SA	SB	SC	SD	SE	SF	SG	SH	SI	SJ	SK	SL	SM	SN	SO	SP	SQ	SR	SS	ST	SU	SV	SW	SX	SY	SZ	TA	TB	TC	TD	TE	TF	TG	TH	TI	TJ	TK	TL	TM	TN	TO	TP	TQ	TR	TS	TT	TU	TV	TW	TX	TY	TZ	UA	UB	UC	UD	UE	UF	UG	UH	UI	UJ	UK	UL	UM	UN	UO	UP	UQ	UR	US	UT	UU	UV	UW	UX	UY	UZ	VA	VB	VC	VD	VE	VF	VG	VH	VI	VJ	VK	VL	VM	VN	VO	VP	VQ	VR	VS	VT	VU	VV	VW	VX	VY	VZ	WA	WB	WC	WD	WE	WF	WG	WH	WI	WJ	WK	WL	WM	WN	WO	WP	WQ	WR	WS	WT	WU	WV	WW	WX	WY	WZ	XA	XB	XC	XD	XE	XF	YG	YH	YI	YJ	YK	YL	YM	YN	YO	YP	YQ	YR	YS	YT	YU	YV	YW	YX	YY	YZ	ZA	ZB	ZC	ZD	ZE	ZF	ZG	ZH	ZI	ZJ	ZK	ZL	ZM	ZN	ZO	ZP	ZQ	ZR	ZS	ZT	ZU	ZV	ZW	ZX	ZY	ZZ	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CZ	DA	DB	DC	DD	DE	DF	DG	DH	DI	DJ	DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL	EM	EN	EO	EP	EQ	ER	ES	ET	EU	EV	EW	EX	EY	EZ	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FL	FM	FN	FO	FP	FQ	FR	FS	FT	FU	FV	FW	FX	FY	FZ	GA	GB	GC	GD	GE	GF	GG	GH	GI	GJ	GK	GL	GM	GN	GO	GP	GQ	GR	GS	GT	GU	GV	GW	GX	GY	GZ	HA	HB	HC	HD	HE	HF	HG	HH	HI	HJ	HK	HL	HM	HN	HO	HP	HQ	HR	HS	HT	HU	HV	HW	HX	HY	HZ	IA	IB	IC	ID	IE	IF	IG	IH	II	IJ	IK	IL	IM	IN	IO	IP	IQ	IR	IS	IT	IU	IV	IW	IX	IY	IZ	JA	JB	JC	JD	JE	JF	JG	JH	JI	IJ	JK	KL	KM	KN	KO	KP	KQ	KR	KS	KT	KU	KV	KW	KX	KY	KZ	LA	LB	LC	LD	LE	LF	LG	LH	LI	LJ	LK	LM	LN	LO	LP	LQ	LR	LS	LT	LU	LV	LW	LX	LY	LZ	MA	MB	MC	MD	ME	MF	MG	MH	MI	MJ	MK	ML	MM	MN	MO	MP	MQ	MR	MS	MT	MU	MV	MW	MX	MY	MZ	NA	NB	NC	ND	NE	NF	NG	NH	NI	NJ	NK	NL	NM	NN	NO	NP	NQ	NR	NS	NT	NU	NV	NW	NX	NY	NZ	OA	OB	OC	OD	OE	OF	OG	OH	OI	OJ	OK	OL	OM	ON	OO	OP	OQ	OR	OS	OT	OU	OV	OW	OX	OY	OZ	PA	PB	PC	PD	PE	PF	PG	PH	PI	PJ	PK	PL	PM	PN	PO	PP	PQ	PR	PS	PT	PU	PV	PW	PX	PY	PZ	QA	QB	QC	QD	QE	QF	QG	QH	QI	QJ	QK	QL	QM	QN	QO	QP	QQ	QR	QS	QT	QU	QV	QW	QX	QY	QZ	RA	RB	RC	RD	RE	RF	RG	RH	RI	RJ	RK	RL	RM	RN	RO	RP	RQ	RR	RS	RT	RU	RV	RW	RX	RY	RZ	SA	SB	SC	SD	SE	SF	SG	SH	SI	SJ	SK	SL	SM	SN	SO	SP	SQ	SR	SS	ST	SU	SV	SW	SX	SY	SZ	TA	TB	TC	TD	TE	TF	TG	TH	TI	TJ	TK	TL	TM	TN	TO	TP	TQ	TR	TS	TT	TU	TV	TW	TX	TY	TZ	UA	UB	UC	UD	UE	UF	UG	UH	UI	UJ	UK	UL	UM	UN	UO	UP	UQ	UR	US	UT	UU	UV	UW	UX	UY	UZ	VA	VB	VC	VD	VE	VF	VG	VH	VI	VJ	VK	VL	VM	VN	VO	VP	VQ	VR	VS	VT	VU	VV	VW	VX	VY	VZ	WA	WB	WC	WD	WE	WF	WG	WH	WI	WJ	WK	WL	WM	WN	WO	WP	WQ	WR	WS	WT	WU	WV	WW	WX	WY	WZ	XA	XB	XC	XD	XE	XF	YG	YH	YI	YJ	YK	YL	YM	YN	YO	YP	YQ	YR	YS	YT	YU	YV	YW	YX	YY	YZ	ZA	ZB	ZC	ZD	ZE	ZF	ZG	ZH	ZI	ZJ	ZK	ZL	ZM	ZN	ZO	ZP	ZQ	ZR	ZS	ZT	ZU	ZV	ZW	ZX	ZY	ZZ	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CZ	DA	DB	DC	DD	DE	DF	DG	DH	DI	DJ	DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL	EM	EN	EO	EP	EQ	ER	ES	ET	EU	EV	EW	EX	EY	EZ	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FL	FM	FN	FO	FP	FQ	FR	FS	FT	FU	FV	FW	FX	FY	FZ	GA	GB	GC	GD	GE	GF	GG	GH	GI	GJ	GK	GL	GM	GN	GO	GP	GQ	GR	GS	GT	GU	GV	GW	GX	GY	GZ	HA	HB	HC	HD	HE	HF	HG	HH	HI	HJ	HK	HL	HM	HN	HO	HP	HQ	HR	HS	HT	HU	HV	HW	HX	HY	HZ	IA	IB	IC	ID	IE	IF	IG	IH	II	IJ	IK	IL	IM	IN	IO	IP	IQ	IR	IS	IT	IU	IV	IW	IX	IY	IZ	JA	JB	JC	JD	JE	JF	JG	JH	JI	IJ	JK	KL	KM	KN	KO	KP	KQ	KR	KS	KT	KU	KV	KW	KX	KY	KZ	LA	LB	LC	LD	LE	LF	LG	LH	LI	LJ	LK	LM	LN	LO	LP	LQ	LR	LS	LT	LU	LV	LW	LX	LY	LZ	MA	MB	MC	MD	ME	MF	MG	MH	MI	MJ	MK	ML	MM	MN	MO	MP	MQ	MR	MS	MT	MU	MV	MW	MX	MY	MZ	NA	NB	NC	ND	NE	NF	NG	NH	NI	NJ	NK	NL	NM	NN	NO	NP	NQ	NR	NS	NT	NU	NV	NW	NX	NY	NZ	OA	OB	OC	OD	OE	OF	OG	OH	OI	OJ	OK	OL	OM	ON	OO	OP	OQ	OR	OS	OT	OU	OV	OW	OX	OY	OZ	PA	PB	PC	PD	PE	PF	PG	PH	PI	PJ	PK	PL	PM	PN	PO	PP	PQ	PR	PS	PT	PU	PV	PW	PX	PY	PZ	QA	QB	QC	QD	QE	QF	QG	QH	QI	QJ	QK	QL	QM	QN	QO	QP	QQ	QR	QS	QT	QU	QV	QW	QX	QY	QZ	RA	RB	RC	RD	RE	RF	RG	RH	RI	RJ	RK	RL	RM	RN	RO	RP	RQ	RR	RS	RT	RU	RV	RW	RX	RY	RZ	SA	SB	SC	SD	SE	SF	SG	SH	SI	SJ	SK	SL	SM	SN	SO	SP	SQ	SR	SS	ST	SU	SV	SW	SX	SY	SZ	TA	TB	TC	TD	TE	TF	TG	TH	TI	TJ	TK	TL	TM	TN	TO	TP	TQ	TR	TS	TT	TU	TV	TW	TX	TY	TZ	UA	UB	UC	UD	UE	UF	UG	UH	UI	UJ	UK	UL	UM	UN	UO	UP	UQ	UR	US	UT	UU	UV	UW	UX	UY	UZ	VA	VB	VC	VD	VE	VF	VG	VH	VI	VJ	VK	VL	VM	VN	VO	VP	VQ	VR	VS	VT	VU	VV	VW	VX	VY	VZ	WA	WB	WC	WD	WE	WF	WG	WH	WI	WJ	WK	WL	WM	WN	WO	WP	WQ	WR	WS	WT	WU	WV	WW	WX	WY	WZ	XA	XB	XC	XD	XE	XF	YG	YH	YI	YJ	YK	YL	YM	YN	YO	YP	YQ	YR	YS	YT	YU	YV	YW	YX	YY	YZ	ZA	ZB	ZC	ZD	ZE	ZF	ZG	ZH	ZI	ZJ	ZK	ZL	ZM	ZN	ZO	ZP	ZQ	ZR	ZS	ZT	ZU	ZV	ZW	ZX	ZY	ZZ	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI	CJ	CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CZ	DA	DB	DC	DD	DE	DF	DG	DH	DI	DJ	DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL	EM	EN	EO	EP	EQ	ER	ES	ET	EU	EV	EW	EX	EY	EZ	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FL	FM	FN	FO	FP	FQ	FR	FS	FT	FU	FV	FW	FX	FY	FZ
--	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Табл. 6. Принципы заполнения рабочего листа книги Microsoft Excel в рамках реализации методики на практическом примере

Table 6. Principles of filling of the book Microsoft Excel file's worksheet during the implementation of the procedure on a practical example

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾ Worksheet cell addresses ⁽¹⁾	Содержимое/формула Content/formula	Элемент математического описания Element of mathematical description
<i>Табл. 1 / Table 1</i>		
К3	Значения элемента исходных данных; =ЧСТРОК(A14:A25) Values of source data element; =ROWS(A14:A25)	Табл. 1, п. 1.1.1 Table 1, item 1.1.1
К4	Значения элемента исходных данных; =ЧСТРОК(A35:A193) Values of source data element; =ROWS(A35:A193)	Табл. 1, п. 1.1.2 Table 1, item 1.1.2
<i>Табл. 2 / Table 2</i>		
A14:A25	Значения элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.2.1 Table 1, item 1.2.1
B14:J25	Значения элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.3.1 Table 1, item 1.3.1
K14:K25	Значения элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1 примечания Table 1, note paragraph 1
L14:L25	Значения элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.3.2 Table 1, item 1.3.2
M14:M25	=СЧЁТЕСЛИ(L\$14:L14;1) =SUMIF(L\$14:L14,1)	—
<i>Табл. 3.1 / Table 3.1</i>		
G32:R32	Значения элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.2.1 Table 1, item 1.2.1
A35:A193	Значения элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.2.2 Table 1, item 1.2.2
B35:E193	Значения элемента исходных данных [21] Values of source data element [21]	Табл. 1, п. 1.5.1 Table 1, item 1.5.1
F35:F193	Значения элемента исходных данных [21] Values of source data element [21]	Табл. 1, п. 1.5.2 Table 1, item 1.5.2
G35:R193	Значения элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.6.1 Table 1, item 1.6.1
S35:S193	Значения элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.5.3 Table 1, item 1.5.3
T35:(T193)	= \$K\$213+СУММПРОИЗВ(G35:R35;\$G\$198:\$R\$198) = \$K\$213+SUMPRODUCT(G35:R35,\$G\$198:\$R\$198)	Табл. 2, п. 2.1.1 Table 2, item 2.1.1
G194:(R194)	=МИН(G35:G193) =MIN(G35:G193)	Табл. 3, п. 2.1 Table 3, item 2.1
G195:(R195)	=МАКС(G35:G193) =MAX(G35:G193)	Табл. 3, п. 2.2 Table 3, item 2.2
G196:(R196)	=СРЗНАЧ(G35:G193) =AVERAGE(G35:G193)	Табл. 3, п. 2.3 Table 3, item 2.3
G197:(R197)	=1-СМЕЩ(\$L\$14;G32-1;;;) =1-OFFSET(\$L\$14,G32-1,,)	—
G198:(R198)	=ИНДЕКС(ЛИНЕЙН(СМЕЩ(\$S\$35;;; \$K\$4);СМЕЩ(\$G\$35;;; \$K\$4; \$K\$3));\$K\$3+1-G32) =INDEX(LINEST(OFFSET(\$S\$35,,, \$K\$4),OFFSET(\$G\$35,,, \$K\$4, \$K\$3)), \$K\$3+1-G32)	Табл. 2, п. 1.1.1, 1.1.2, 1.2.1–1.2.3 Table 2, item 1.1.1, 1.1.2, 1.2.1–1.2.3
<i>Табл. 3.2 / Table 3.2</i>		
AB32:(AM32)	=ЕСЛИОШИБКА(СМЕЩ(\$A\$14;ПОИСКПОЗ(СТОЛБЕЦ()-СТОЛБЕ Ц(\$AA:\$AA);СМЕЩ(\$M\$14;;; \$K\$3);0)-1;0);»-») =IFERROR(OFFSET(\$A\$14,MATCH(COLUMN()- COLUMN(\$AA:\$AA),OFFSET(\$M\$14,,, \$K\$3),0)-1,0),»-»)	Табл. 1, п. 1.2.3 Table 1, item 1.2.3
AN32:(AY32)	=AB32	—

Продолжение табл. 6 / Continuation of the Table 6

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾ Worksheet cell addresses ⁽¹⁾	Содержимое/формула Content/formula	Элемент математического описания Element of mathematical description
AZ32:(BK32)	=AB32	–
BL32:(BW32)	=AB32	–
V35:(V193)	=A35	–
W35:(Z193)	=B35	–
AA35:(AA193)	=F35	–
AB35:AD193	Значения неизвестных переменных Values of unknown variables	Табл. 1, п. 2.2.2 Table 1, item 2.2.2
AN35:AP193	Значения неизвестных переменных Values of unknown variables	Табл. 1, п. 2.2.1 Table 1, item 2.2.1
AZ32:(BK193)	=ЕСЛИ(ЕЧИСЛО(AZ\$32);AB\$198*AB35;»-«) =IF(ISNUMBER(AZ\$32),AB\$198*AB35,»-«)	Табл. 3, п. 4.1 Table 3, item 4.1
BL32:(BW193)	=ЕСЛИ(ЕЧИСЛО(BL\$32);СМЕЩ(\$G35;BL\$32-1;) +AB\$195*(AB\$196-AN35);»-«) =IF(ISNUMBER(BL\$32),OFFSET(\$G35,BL\$32-1,) +AB\$195*(AB\$196-AN35),»-«)	Табл. 3, п. 4.2 Table 3, item 4.2
BX32:BX193	Значения неизвестных переменных Values of unknown variables	Табл. 1, п. 2.3.1 Table 1, item 2.3.1
BY32:(BY193)	=\$K\$213+СУММПРОИЗВ(\$G\$197:\$R\$197;\$G\$198:\$R\$198;G35 :R35)+ СУММПРОИЗВ(СМЕЩ(BL35;;; \$K\$212);СМЕЩ(AB\$201;;; \$K\$212)) =\$K\$213+SUMPRODUCT(\$G\$197:\$R\$197,\$G\$198:\$R\$198,G35 :R35)+ SUMPRODUCT(OFFSET(BL35,,, \$K\$212),OFFSET(AB\$201,,, \$K\$212))	Табл. 3, п. 5.1 Table 3, item 5.1
BZ32:(BZ193)	=\$K\$208*BX35	Табл. 3, п. 5.2 Table 3, item 5.2
CA32:(CA193)	=\$K\$208*(1-BX35)	Табл. 3, п. 5.3 Table 3, item 5.3
AB194:AD194	Значения элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 3, п. 1.4.1 Table 3, item 1.4.1
AB195:(AM195)	=ЕСЛИ(ЕЧИСЛО(AN32);(-1)*ЗНАК(СМЕЩ(\$G\$198;;AN32-1;));»-«) =IF(ISNUMBER(AN32),(-1)*SIGN(OFFSET(\$G\$198,,AN32-1,)),»-«)	Табл. 3, п. 2.4 Table 3, item 2.4
AB196:AD196	Значения неизвестных переменных Values of unknown variables	Табл. 1, п. 2.1.1 Table 1, item 2.1.1
AB197:AD197	Значения элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.4.2 Table 1, item 1.4.2
AB198:AD198	Значения элемента исходных данных; =ЕСЛИ(AB195=1;AB194-СМЕЩ(\$G\$194;;AN\$32-1;); СМЕЩ(\$G\$195;;AN\$32-1;)-AB194) Values of source data element =IF(AB195=1,AB194-OFFSET(\$G\$194,,AN\$32-1,), OFFSET(\$G\$195,,AN\$32-1,)-AB194)	Табл. 1, п. 1.4.3, п. 6 примечания Table 1, item 1.4.3, note paragraph 6
AB199:AD199	Значения элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.4.4 Table 1, item 1.4.4
AB200:AD200	Значения элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.4.5 Table 1, item 1.4.5
AB201:(AM201)	=ЕСЛИ(ЕЧИСЛО(AN32);СМЕЩ(\$G\$198;;AN32-1;);»-«) =IF(ISNUMBER(AN32),OFFSET(\$G\$198,,AN32-1,),»-«)	Табл. 2, п. 1.2.3 Table 2, item 1.2.3
AB202:(AM202)	=ЕСЛИ(ЕЧИСЛО(AN32);AB195*СУММ(СМЕЩ(BL35;;; \$K\$4;))/ \$K\$4;»-«) =IF(ISNUMBER(AN32),AB195*SUM(OFFSET(BL35,,, \$K\$4,))/ \$K\$4,»-«)	Табл. 3, п. 3.1 Table 3, item 3.1
AB203:(AM203)	=ЕСЛИ(ЕЧИСЛО(AN32);AB195*AB200;»-«) =IF(ISNUMBER(AN32),AB195*AB200,»-«)	Табл. 3, п. 3.2 Table 3, item 3.2

Адреса ячеек рабочего листа ⁽¹⁾ Worksheet cell addresses ⁽¹⁾	Содержимое/формула Content/formula	Элемент математического описания Element of mathematical description
Табл. 3.3 / Table 3.3		
CI32:(CT32)	=AB32	—
CU32:(DF32)	=AB32	—
DG32:(DR32)	=AB32	—
CC35:(CC193)	=A35	—
CD35:(CG193)	=B35	—
CH35:(CH193)	=F35	—
CI35:(CT193)	=ЕСЛИ(ЕЧИСЛО(CI\$32);AB\$195*(AB\$196-AN35);»-«) =IF(ISNUMBER(CI\$32),AB\$195*(AB\$196-AN35),»-«)	Табл. 3, п. 4.3 Table 3, item 4.3
CU35:(DF193)	=ЕСЛИ(ЕЧИСЛО(CU\$32);(AB\$194-СМЕЩ(\$G35;;CU\$32-1;)))*ЕСЛИ (AB\$195=1;AB35;1);»-«) =IF(ISNUMBER(CU\$32),(AB\$194-OFFSET(\$G35,,CU\$32-1,)))*IF (AB\$195=1,AB35,1);»-«)	Табл. 3, п. 4.4 Table 3, item 4.4
DG35:(DR193)	=ЕСЛИ(ЕЧИСЛО(DG\$32);(AB\$194-СМЕЩ(\$G35;;DG\$32-1;)))* ЕСЛИ(AB\$195=1;1;AB35);»-«) =IF(ISNUMBER(DG\$32),(AB\$194-OFFSET(\$G35,,DG\$32-1,)))* IF(AB\$195=1,1,AB35);»-«)	Табл. 3, п. 4.5 Table 3, item 4.5

Табл. 4 / Table 4

K203	Значение элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.7.1 Table 1, item 1.7.1
K204	Значение элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.7.2 Table 1, item 1.7.2
K205	Значение элемента исходных данных Values of source data element	Табл. 1, п. 1.7.3 Table 1, item 1.7.3
K207	=СУММ(L14:L25) =SUM(L14:L25)	—
K208	=ИНДЕКС(ЛИНЕЙН(\$S\$35:\$S\$193; \$G\$35:\$R\$193);ЧИСЛОЛБ(\$ G\$193:\$S\$193)) =INDEX(LINEST(\$S\$35:\$S\$193, \$G\$35:\$R\$193),COLUMNS(\$G\$193: \$S\$193))	Табл. 2, п. 1.2.3 Table 2, item 1.2.3
K209	=1-СУММКВРАЗН(\$T\$35:\$T\$193;\$S\$35:\$S\$193)/ (ДИСП.Г(\$S\$35:\$S\$ \$193)*ЧСТРОК(\$S\$35:\$S\$193)) =1-SUMXMY2(\$T\$35:\$T\$193,\$S\$35:\$S\$193)/ (VAR.P(\$S\$35:\$S\$193)* ROWS(\$S\$35:\$S\$193))	Табл. 2, п. 2.2.1 Table 2, item 2.2.1
K210	=СУММ(СМЕЩ(BY35;;;K4;))/K4 =SUM(OFFSET(BY35,,,K4,))/K4	Табл. 3, п. 6.1 Table 3, item 6.1
K211	=СУММ(СМЕЩ(BX35;;;K4;))/K4 =SUM(OFFSET(BX35,,,K4,))/K4	Табл. 3, п. 6.2 Table 3, item 6.2
K212	=K210*(1-K211)	Табл. 3, п. 6.3 Table 3, item 6.3
K213	=СУММПРОИЗВ(СМЕЩ(AB196;;;K207);СМЕЩ(AB199;;;K207)) =SUMPRODUCT(OFFSET(AB196,,,K207),OFFSET(AB199,,,K207))	Табл. 3, п. 6.4 Table 3, item 6.4

Примечание: ⁽¹⁾ — абстрактное обозначение A1:(B10) означает, что в ячейку A1 необходимо ввести формулу, указанную в соответствующем столбце таблицы, после чего полученный результат «растянуть» (скопировать) до ячейки B10.

Note: ⁽¹⁾ — the abstract designation A1:(B10) means that the formula specified in the corresponding column of the table must be entered in cell A1 with further “stretching” (copying) of the result to cell B10.

Реализация оптимизационной модели осуществлялась с использованием надстройки OpenSolver, соответствующие настройки представлены в табл. 7. Как видно из рис. 2, оптимальное решение предполагает следующие значения изменений управляемых параметров риска: $\Delta x_{j=1} = 4$ ед., $\Delta x_{j=4} = 7$ чел., $\Delta x_{j=9} = 10$ ед. Результаты анализа чувствительности

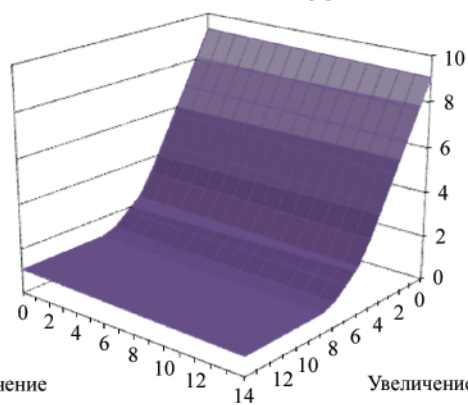
фактического значения риска и его компонент по отношению к значениям изменений управляемых параметров риска в графической форме представлены на рис. 3. На соответствующих трехмерных графиках отображены фактические значения риска и его компонент при изменении значений двух параметров риска в вышеописанном оптимальном решении.

Табл. 7. Значения настроек надстройки OpenSolver, используемые в рамках реализации методики на практическом примере

Table 7. The values of the settings for the OpenSolver add-in used during the implementation of the procedure on a practical example

Номер Number	Наименование параметра настройки Setting parameter name	Значение Value	Элемент математического описания Element of mathematical description
1.1	Ячейка целевой функции Objective function cell	K213	Выражение (16)
1.2	Тип задачи оптимизации Optimization problem type	Min	Expression (16)
2.1	Ячейки переменных Cells of unknown variables	AB196:AD196	Табл. 1, п. 2.1.1 Table 1, item 2.1.1
2.2		AN35:AP193	Табл. 1, п. 2.2.1 Table 1, item 2.2.1
2.3		AB35:AD193	Табл. 1, п. 2.2.2 Table 1, item 2.2.2
2.4		BX35:BX193	Табл. 1, п. 2.3.1 Table 1, item 2.3.1
3.1	Ограничения Constraints	AB196:AD196 >= AB197:AD197	Выражение (17)
3.2		AB196:AD196 <= AB198:AD198	Expression (17)
3.3		AN35:AP193 >= 0	Выражение (18) Expression (18)
3.4		AB196:AD196 = int	Выражение (19) Expression (19)
3.5		AN35:AP193 = int	Выражение (20) Expression (20)
3.6		AB35:AD193 = bin	Выражение (21) Expression (21)
3.7		BX35:BX193 = bin	Выражение (22) Expression (22)
3.8		AN35:AP193 <= AZ35:BB193	Выражение (23) Expression (23)
3.9		AB202:AD202 >= AB203:AD203	Выражение (24) Expression (24)
3.10		CI35:CK193 >= CU35:CW193	Выражение (25) Expression (25)
3.11		CI35:CK193 <= DG35:DI193	Выражение (26) Expression (26)
3.12		BY35:BY193 >= BZ35:BZ193	Выражение (27) Expression (27)
3.13		BY35:BY193 <= CA35:CA193	
3.14		K210 <= K204	Выражение (28) Expression (28)
3.15		K211 >= K205	Выражение (29) Expression (29)
4	Алгоритм Algorithm	COIN-OR CBC	—

Фактическое среднее (по объектам)
значение срока задержки \bar{T} , мес.
The actual average (for construction objects)
value of the delay period \bar{T} , month

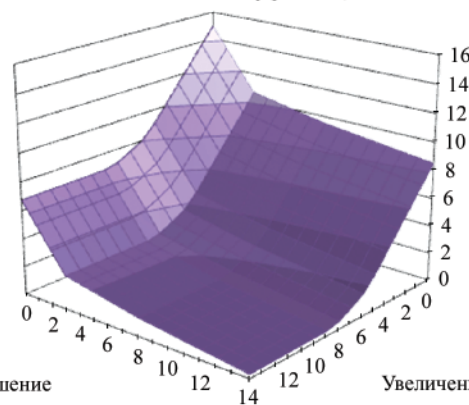


Увеличение параметра риска
«Количество договоров аренды»
 Δx_{j-1} , ед.
Increase of risk parameter
“Number of lease agreements”
 Δx_{j-1} , unit

Увеличение параметра риска
«Количество сотрудников, проверяющих документацию»
 Δx_{j-4} , ед.
Increase of risk parameter
“Number of employees checking the documentation”
 Δx_{j-4} , unit

a

Фактическое среднее (по объектам)
значение срока задержки \bar{T} , мес.
The actual average (for construction objects)
value of the delay period \bar{T} , month

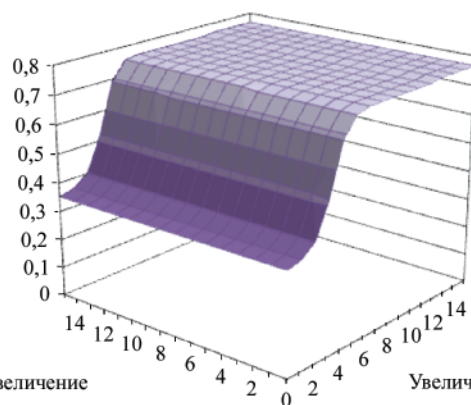


Уменьшение параметра риска
«Среднее количество документов, предоставляемых агентом»
 Δx_{j-9} , ед.
Decrease of risk parameter
“Average number of documents provided by the agent”
 Δx_{j-9} , unit

Увеличение параметра риска
«Количество сотрудников, проверяющих документацию»
 Δx_{j-4} , ед.
Increase of risk parameter
“Number of employees checking the documentation”
 Δx_{j-4} , unit

b

Фактическое значение доли
своевременно сдаваемых объектов P
The actual value of the share of construction
projects timely put into operation P

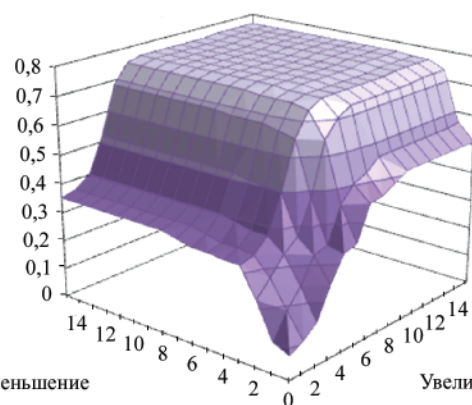


Увеличение параметра риска
«Количество договоров аренды»
 Δx_{j-1} , ед.
Increase of risk parameter
“Number of lease agreements”
 Δx_{j-1} , unit

Увеличение параметра риска
«Количество сотрудников, проверяющих документацию»
 Δx_{j-4} , ед.
Increase of risk parameter
“Number of employees checking the documentation”
 Δx_{j-4} , unit

c

Фактическое значение доли
своевременно сдаваемых объектов P
The actual value of the share of construction
projects timely put into operation P



Уменьшение параметра риска
«Среднее количество документов, предоставляемых агентом»
 Δx_{j-9} , ед.
Decrease of risk parameter
“Average number of documents provided by the agent”
 Δx_{j-9} , unit

Увеличение параметра риска
«Количество сотрудников, проверяющих документацию»
 Δx_{j-4} , ед.
Increase of risk parameter
“Number of employees checking the documentation”
 Δx_{j-4} , unit

d

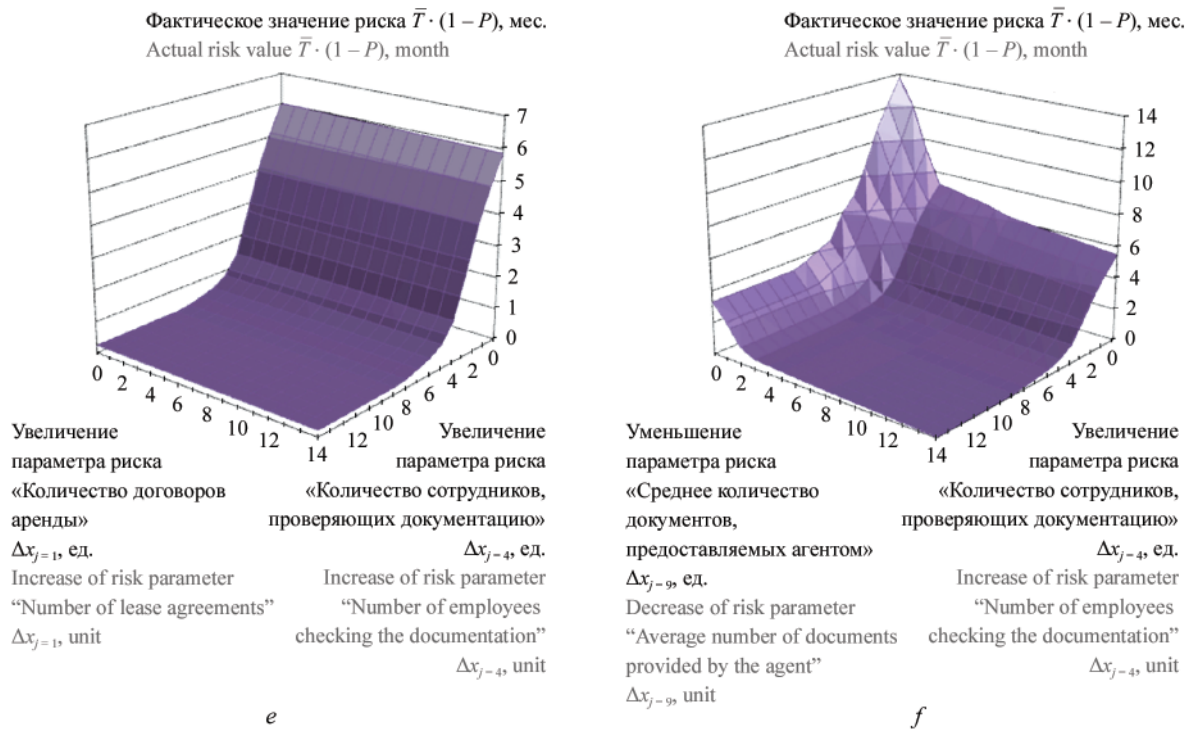


Рис. 3. (окончание) Результаты анализа чувствительности, выполненного в рамках реализации методики на практическом примере

Fig. 3. (ending) Results of the sensitivity analysis performed during the implementation of the procedure on a practical example

На основе вышеупомянутых результатов были сделаны следующие частные выводы:

1. Чувствительность фактического значения риска и его компонент по отношению к значению параметра $\Delta x_{j=1}$ существенно меньше в сравнении с параметрами $\Delta x_{j=4}$ и $\Delta x_{j=9}$. Данное обстоятельство объясняется наличием прямой взаимосвязи между количественными характеристиками чувствительности вышеупомянутых показателей и абсолютными значениями параметров $\{a_j\}$ аналитической модели для рассматриваемых параметров риска.

2. Наблюдается близкое к линейному снижению фактического среднего (по объектам) значения показателя риска — срока задержки \bar{T} — на всем диапазоне увеличения параметра $\Delta x_{j=1}$, а также при относительно небольшом увеличении остальных параметров ($\Delta x_{j=4} \leq 6$ чел.; $\Delta x_{j=9} \leq 3$ ед.). В противном случае вышеупомянутое снижение происходит нелинейно с асимптотическим приближением к минимальному значению $\bar{T} = 0,85$ мес. и $\bar{T} = 0,28$ мес. для графиков соответственно позиций *a* и *b* на рис. 3.

3. Зависимость фактического значения вероятностного показателя — доли своевременно сданных объектов P — от значений параметров $\Delta x_{j=4}$ и $\Delta x_{j=9}$ является нелинейной, монотонно возрастающей, асимптотически приближающейся к значению 1 (график позиции *d* на рис. 3), по форме напоминающей функцию нормального распределения, ха-

рактерного для значений параметров и показателя риска в рамках выборки строительных проектов, используемой в составе исходных данных для реализации методики. Фактические значения вероятностного показателя не изменяются при увеличении параметра $\Delta x_{j=1}$ (график позиции *c* на рис. 3).

4. Зависимость фактического значения риска $\bar{T} \cdot (1 - P)$ от значений параметров $\Delta x_{j=1}$, $\Delta x_{j=4}$ и $\Delta x_{j=9}$ во многом похожа на зависимость фактического среднего (по объектам) значения показателя риска \bar{T} от вышеперечисленных параметров, однако в данном случае участки линейного изменения значения риска при увеличении значений параметров $\Delta x_{j=4}$ и $\Delta x_{j=9}$ не наблюдаются (графики позиций *e* и *f* на рис. 3). Тем не менее существенное снижение значения риска наблюдается при относительно небольших значениях параметров $\Delta x_{j=4}$ и $\Delta x_{j=9}$ ($\Delta x_{j=4} \leq 4$; $\Delta x_{j=9} \leq 2$), что, в свою очередь, свидетельствует об отсутствии целесообразности выделения существенных объемов денежных средств для реализации ОТР, направленных на кардинальное снижение негативного влияния рассматриваемой категории риска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проведенного исследования были получены следующие основные результаты.

Выполнен обзор и анализ научных работ в области решения задач обоснования характеристик строительных процессов с учетом рисков внутренней и внешней среды. По результатам проведения процедуры сделан вывод о недостаточной степени проработанности вопросов обоснования характеристик ОТР для уменьшения негативного влияния рисков на результаты реализации проектов строительства.

Разработана методика обоснования характеристик ОТР, направленных на снижение влияния рисков на результаты реализации строительных проектов, с использованием средств аналитического и оптимизационного моделирования. Отличительной особенностью методики является применение методов целочисленной линейной оптимизации для решения задачи, предполагающей нелинейную зависимость вероятностного показателя риска (доли своевременно сдаваемых объектов строительства) от управляемых параметров риска.

Произведена реализация разработанной методики на практическом примере. Полученные результаты соответствуют реальным условиям реализации строительных проектов с учетом различных категорий рисков, что позволяет сделать вывод о высокой практической значимости разработанного инструментального средства.

На основе вышеизложенных результатов сделаны общие выводы по проведенному исследованию:

- взаимосвязь между временным показателем риска (сроком задержки сдачи объекта строительства в эксплуатацию) и отдельными параметрами функционирования инвестиционно-строительной

организации может быть определена посредством реализации процедуры многофакторной линейной регрессии по отношению к выборке проектов строительства;

- задача обоснования значений управляемых параметров риска на основе выборки строительных проектов может быть решена с использованием алгоритмов целочисленной линейной оптимизации при рассмотрении суммарных затрат на реализацию изменений в качестве критерия оптимальности решения, а основных компонент фактического значения риска — в качестве ограничений.

Тем не менее важно обратить внимание на следующие особенности разработанной методики, несколько уменьшающие область эффективного применения инструментального средства:

- зависимость адекватности результатов реализации методики от адекватности аналитической модели зависимости значения показателя риска от значений параметров риска;

- учет отрицательных прогнозных значений показателя риска (срока задержки сдачи объекта в эксплуатацию), определяющих досрочное завершение строительства в составе данных для оценки фактического среднего (по объектам строительства) значения показателя риска.

Для повышения объективности оценки значения риска на последующих этапах работы предполагается модификация оптимизационной модели обоснования характеристик ОТР, направленных на снижение влияния рисков на результаты реализации строительных проектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Amani N., Safarzadeh K. Project risk management in Iranian small construction firms // Journal of Engineering and Applied Science. 2022. Vol. 69. Issue 1. DOI: 10.1186/s44147-021-00050-8
2. Bigot J., Deledalle C. Low-rank matrix denoising for count data using unbiased Kullback-Leibler risk estimation // Computational Statistics & Data Analysis. 2022. Vol. 169. P. 107423. DOI: 10.1016/j.csda.2022.107423
3. Borkovskaya V.G. Complex models of active control systems at the modern developing enterprises // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 945–949. Pp. 3012–3015. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.945-949.3012
4. Cakmak S., Astudillo R., Frazier P., Zhou E. Bayesian optimization of risk measures // Advances in Neural Information Processing Systems. 2020.
5. Chen W., Deng J., Niu L. Identification of core risk factors and risk diffusion effect of urban underground engineering in China: A social network

- analysis // Safety Science. 2022. Vol. 147. P. 105591. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105591
6. Erol H., Dikmen I., Atasoy G., Birgonul M.T. An analytic network process model for risk quantification of mega construction projects // Expert Systems with Applications. 2022. Vol. 191. P. 116215. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.116215
7. Lin S.-S., Zhang N., Zhou A., Shen S.-L. Risk evaluation of excavation based on fuzzy decision-making model // Automation in Construction. 2022. Vol. 136. P. 104143. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104143
8. Velichkin V., Petrochenko M., Gorodishenina A., Bokovaya N. Risks and reliability assessment of construction processes // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. P. 06008. DOI: 10.1051/e3s-conf/202127406008
9. Абдуллаев Г.И., Величкин В.З., Солдатенко Т.Н. Повышение организационно-технологической надежности строительства линейно-протяженных сооружений методом прогнозирования

отказов // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 3 (38). С. 43–50. DOI: 10.5862/MCE.38.6

10. Баулин А.В., Перунов А.С. Риск-ориентированный подход в сфере деятельности государственного строительного надзора // Инженерный вестник Дона. 2021. № 5. С. 650–660.

11. Борисов В.А. Оптимизация технологических параметров тампонажных завес городских подземных сооружений на основе теории риска : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2007. 20 с.

12. Вильданов Р.А., Кузьмина Т.К. Актуальность разработки методов осуществления функций государственного строительного надзора в жилищном строительстве при риск-ориентированном подходе // Строительное производство. 2020. № 2. С. 144–149. DOI: 10.54950/26585340_2020_2_144

13. Занина Е.В., Сокольников В.В. Способы повышения организационно-технологической надежности строительства // Технология и организация строительства : мат. I Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых, посвящ. 80-летию основания кафедры «Строительное производство». 2020. С. 246–250.

14. Зацаринная А.С. Формирование системы риск-менеджмента строительных предприятий // Символ науки. 2019. № 5. С. 101–103.

15. Куликова Е.Ю. Финансовый риск при строительстве подземных сооружений с применением химукрепления грунтов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 7. С. 115–120.

16. Маликова Е.В., Абакумов Р.Г. Актуальные проблемы экспертизы проектно-сметной до-

кументации в рамках стратегии риск-менеджмента в строительной организации // Актуальные проблемы развития хозяйствующих субъектов, территорий и систем регионального и муниципального управления : мат. X Междунар. науч.-практ. конф. 2015. С. 237–239.

17. Недавний О.И., Базилевич С.В., Кузнецов С.М. Оценка организационно-технологической надежности строительства объектов // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2 (18). С. 137–141.

18. Рахова М.В., Савельев И.И. Управление качеством в строительной организации как элемент системы риск менеджмента // Экономика и управление: проблемы, решения. 2020. Т. 2. № 8. С. 70–75. DOI: 10.34684/ek.up.p.r.2020.08.02.009

19. Таганов Р.А., Гильман Д.В., Спиркина О.В., Балакин В.А. Вопросы структурной оптимизации процессов проекта по критериям минимизации рисков // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. № 7–3. С. 123–128.

20. Учаева Т.В. Анализ системы риск-менеджмента в строительных компаниях России // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2019. № 1 (8). С. 73–75.

21. Makeeva O.B. Modelling and regulation of delay in construction of pipeline facilities : выпускная квалификационная работа магистра. СПб., 2020. DOI: 10.18720/SPBPU/3/2020/vr/vr20-1036

22. Kiseleva A., Radaev A., Rajczyk M. Optimization model for determination of characteristics for the development of construction project involving labor forces // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Pp. 1–13. DOI: 10.1007/978-3-030-67654-4_1

Поступила в редакцию 7 декабря 2022 г.

Принята в доработанном виде 20 января 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2023 г.

Об авторах: Анастасия Андреевна Черенева — студентка, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 1138335, ORCID: 0000-0002-1808-9694; nastya.chereneva@mail.ru;

Анастасия Вячеславовна Мишакова — ассистент, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 885591, Scopus: 57192664941, ResearcherID: O-8191-2017, ORCID: 0000-0001-8685-0716; mishakova_av@spbstu.ru;

Антон Евгеньевич Радаев — кандидат технических наук, кандидат экономических наук, доцент, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 650856, Scopus: 57196054199, ResearcherID: R-6085-2016, ORCID: 0000-0002-0840-6828; tw-inc@yandex.ru.

Вклад авторов:

Черенева А.А. — реализация методики на практическом примере, анализ результатов.

Мишакова А.В. — формулирование целей и задач исследования, обзор литературы, формирование основных положений методики.

Радаев А.Е. — формирование математических моделей, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Amani N., Safarzadeh K. Project risk management in Iranian small construction firms. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2022; 69(1). DOI: 10.1186/s44147-021-00050-8
2. Bigot J., Deledalle C. Low-rank matrix denoising for count data using unbiased Kullback-Leibler risk estimation. *Computational Statistics & Data Analysis*. 2022; 169:107423. DOI: 10.1016/j.csda.2022.107423
3. Borkovskaya V.G. Complex models of active control systems at the modern developing enterprises. *Advanced Materials Research*. 2014; 945-949:3012-3015. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.945-949.3012
4. Cakmak S., Astudillo R., Frazier P., Zhou E. Bayesian optimization of risk measures. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020.
5. Chen W., Deng J., Niu L. Identification of core risk factors and risk diffusion effect of urban underground engineering in China: A social network analysis. *Safety Science*. 2022; 147:105591. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105591
6. Erol H., Dikmen I., Atasoy G., Birgonul M.T. An analytic network process model for risk quantification of mega construction projects. *Expert Systems with Applications*. 2022; 191:116215. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.116215
7. Lin S.-S., Zhang N., Zhou A., Shen S.-L. Risk evaluation of excavation based on fuzzy decision-making model. *Automation in Construction*. 2022; 136:104143. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104143
8. Velichkin V., Petrochenko M., Gorodishenina A., Bokovaya N. Risks and reliability assessment of construction processes. *E3S Web of Conferences*. 2021; 274:06008. DOI: 10.1051/e3sconf/202127406008
9. Abdullayev G.I., Velichkin V.Z., Soldatenko T.N. The organizational and technological reliability improvement in construction by using failure prediction method. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 3(38): 43-50. DOI: 10.5862/MCE.38.6 (rus.).
10. Baulin A.V., Perunov A.S. Risk-based approach in the field of state construction supervision. *Engineering Journal of Don*. 2021; 5:650-660. (rus.).
11. Borisov V.A. *Optimization of technological parameters of grout curtains of urban underground structures based on risk theory : abstract of the thesis. dis. ... cand. tech. sciences*. Ekaterinburg, 2007; 20. (rus.).
12. Vil'danov R.A., Kyz'mina T.K. The relevance of developing methods for the implementation of the functions of state construction supervision in housing with a risk-based approach. *Construction Operations*. 2020; 2:144-149. DOI: 10.54950/26585340_2020_2_144 (rus.).
13. Zanina E.V., Sokolnikov V.V. Ways to improve the organizational and technological reliability of construction. *Technology and organization of construction : Mat. I All-Russian interuniversity scientific-practical. conf. young scientists dedicated to the 80th anniversary of the founding of the department "Construction production"*. 2020; 246-250. (rus.).
14. Zatsarinnaya A.S. Formation of a risk management system for construction enterprises. *Symbol of Science*. 2019; 5:101-103. (rus.).
15. Kulikova E.Yu. Financial risk in the construction of underground structures with the use of chemical strengthening of soils. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2009; 7:115-120. (rus.).
16. Malikova E.V., Abakumov R.G. Actual problems of examination of design and estimate documentation as part of a risk management strategy in a construction organization. *Actual problems of development of economic entities, territories and systems of regional and municipal government : materials of the X international scientific-and-practical conference*. 2015; 237-239. (rus.).
17. Nedavny O.I., Bazilevich S.V., Kuznetsov S.M. Assessment of organizational and technological reliability of project construction. *Systems. Methods. Technologies*. 2013; 2(18):137-141. (rus.).
18. Rakhova M.V., Savel'ev I.I. Quality management in a construction company as an element of risk management system. *Economics and Management: Problems, Solutions*. 2020; 2(8):70-75. DOI: 10.34684/ek.up.p.r.2020.08.02.009 (rus.).
19. Taganov R.A., Gilman D.V., Spirkina O.V., Balakin V.A. Issues of structural optimization of project processes according to risk minimization criteria. *Modern Trends in the Development of Science and Technology*. 2015; 7-3:123-128. (rus.).
20. Uchayeva T.V. Analysis of the risk management system in construction companies in Russia. *PGUAS Bulletin: construction, science and education*. 2019; 1(8):73-75. (rus.).
21. Makeyeva O.V. *Modelling and regulation of delay in construction of pipeline facilities: graduate qualifying work of master*. St. Petersburg, 2020. DOI: 10.18720/SPBPU/3/2020/vr/vr20-1036 (rus.).
22. Kiseleva A., Radaev A., Rajczyk M. Optimization model for determination of characteristics for the development of construction project involving labor forces. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 1-13. DOI: 10.1007/978-3-030-67654-4_1

Received December 7, 2022.

Adopted in revised form on January 20, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

B I O N O T E S: **Anastasia A. Chereneva** — student, Graduate School of Industrial and Civil and Road Construction, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 1138335, ORCID: 0000-0002-1808-9694; nastya.chereneva@mail.ru;

Anastasia V. Mishakova — assistant, Graduate School of Industrial and Civil and Road Construction, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 885591, Scopus: 57192664941, ResearcherID: O-8191-2017, ORCID: 0000-0001-8685-0716; mishakova_av@spbstu.ru;

Anton E. Radaev — Candidate of Technical Sciences, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Graduate School of Industrial and Civil and Road Construction, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 650856, Scopus: 57196054199, ResearcherID: R-6085-2016, ORCID: 0000-0002-0840-6828; tw-inc@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Anastasia A. Chereneva — implementation of the procedure on a practical example, analysis of the results.

Anastasia V. Mishakova — formulation of the aim and tasks of the research, literature review, formation of the main provisions of the procedure.

Anton E. Radaev — creation of mathematical models, scientific editing of the text.

The authors declare no conflict of interest.

The role of a quality system in managing interface work

Azariy A. Lapidus, Ibrahim Ibrahim Fadhil Ibrahim, Mukhammet A. Fakhratov

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

Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This article shows the importance of quality control for construction projects during the implementation phase, as the use of an appropriate quality control plan for the project allows us to obtain the required quality of work for the first time without the need to rework or modify it and thus reduce the cost of the work. Addressing quality management as a necessary measure for achieving cost-effective construction processes, reducing waste, and minimizing losses resulting from its absence, its significance lies in the fact that adopting this approach in work will increase profits by controlling resources and costs. Additionally, considering the work methodology is essential.

Materials and methods. The studied case is a three-storey villa project in Iraq. A quality control plan was developed for the implementation of the exterior coating of the type of stone facades, and after the completion of the work, quality control tools were used to check the quality of the coating implemented based on the plan, where the experimental approach was used.

Results. The main aim of quality control is to ensure product quality and at the lowest possible cost. In practice, this can only be achieved by controlling the production processes, so we studied the stability of the implementation process through the usage of statistical quality control tools, and all the results indicated that the process is statistically disciplined and stable. Reducing the tasks and activities necessary to transform inputs (raw materials) into valuable products or services for customers is essential. Quality requires getting things right the first time, which means reducing defects or rework and, consequently, minimizing costs.

Conclusions. A quality policy will lead to the correct use of resources and improve the quality of performance. It also has a positive impact on the overall cost of implementation within this study.

KEYWORDS: quality management, construction projects, control maps, quality control plan, interface works, quality standard, implementation quality

FOR CITATION: Lapidus A.A., Ibrahim Ibrahim Fadhil Ibrahim, Fakhratov M.A. The role of a quality system in managing interface work. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):962-970. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.962-970 (rus.).

Corresponding author: Ibrahim Ibrahim Fadhil Ibrahim, eng.civil2004@gmail.com.

Роль системы качества в управлении интерфейсными работами

Азарий Абрамович Лапидус, Ибрагим Ибрагим Фадил Ибрагим,

Мухаммет Аллазович Фахратов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

(НИИ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Показана важность контроля качества для строительных объектов на этапе реализации, так как использование соответствующего плана контроля качества проекта позволяет получить требуемое качество без необходимости доработки и таким образом снизить стоимость работ. Обращение к управлению качеством как необходимой мере для достижения экономически эффективных строительных процессов, сокращения отходов и минимизации потерь, возникающих из-за их отсутствия, заключается в том, что принятие такого подхода приведет к увеличению прибыли путем контроля ресурсов и затрат. Кроме того, важно учесть методологию работы.

Материалы и методы. Рассматривается проект виллы в Ираке, состоящей из трех этажей. Разработан план контроля качества выполнения наружного покрытия по типу каменных фасадов. После завершения работ использовались инструменты контроля качества для проверки качества покрытия по плану с помощью экспериментального подхода.

Результаты. Основная цель контроля качества — обеспечение качества продукции при минимально возможных затратах. На практике этого можно добиться только за счет контроля производственных процессов, поэтому изучали стабильность процесса внедрения с применением инструментов статистического контроля качества, результаты свидетельствуют о том, что процесс является статистически стабильным. Сокращение задач и деятельности, необходимых для преобразования входных данных (сырья) в ценные продукты или услуги для клиентов, является необходимым. Качество означает снижение дефектов или повторных работ и, следовательно, минимизацию затрат.

Выводы. Политика качества приведет к правильному использованию ресурсов и улучшению качества выполнения работ. Она также оказывает положительное влияние на общую стоимость реализации в рамках данного исследования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: управление качеством, строительные проекты, контрольные карты, план контроля качества, интерфейсные работы, стандарт качества, качество реализации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лапидус А.А., Ибрагим Ибрагим Фадил Ибрагим, Фахратов М.А. The role of a quality system in managing interface work // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 962–970. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.962-970

Автор, ответственный за переписку: Ибрагим Ибрагим Фадил Ибрагим, eng.civil2004@gmail.com.

INTRODUCTION

There is great potential for quality improvement in the construction process. A study of the literature and of surveys conducted in the USA indicated that management's commitment to quality and to continuous quality improvement is very important. Construction industry professionals are well aware of the importance of quality training. Partnering agreements between the parties in the construction process constitute an important step in securing a high-quality product. A feedback loop could upgrade the original quality standards used in the industry, the clarity of project scope and requirements as well as of drawings and specifications is a prerequisite for high quality process [1].

One of the problems of introducing modern quality management systems in building organizations in the Russian Federation is that it turned out that there are two factors that affect the quality of construction products, especially at the stage of implementation of facilities, namely document management in construction enterprises and qualified personnel [2].

So, following a successful quality policy will lead to the correct use of resources and improve the quality of implementation [3].

In general, there are three basic elements that must be achieved in any construction project (lower cost, faster completion, and better quality). Where it is difficult to achieve these three elements at the same time, because low cost usually means the quality of work at a lower level and a relatively long completion time, and quality or high quality means high cost and long duration of completion, and rapid completion of the project usually means high cost and quality of work at a lower level [4].

Although quality management at every stage of project life cycle is important but the quality management at the execution (construction) stage contributes significantly on final quality outcome of construction projects [5].

MATERIALS AND METHODS

Project Description

The project is a villa with an area of (150) consisting of three floors, with a floor height of (3.2) meters. The supporting structure consists of circular columns with a diameter of 40 cm and rectangular dimensions

(20 × 50 cm), in addition to two load-bearing walls at the entrance to the staircase with a thickness of 20 cm. The horizontal elements were a ribbed plate. It was necessary to introduce the concept of quality as a very important concept and as a necessary measure to achieve all the objectives of the project and reduce waste and losses resulting from its absence, and this in turn will lead to increasing profits as a result of controlling resources and costs [6] as it was proven that the cause of many defects and damage is the use of non-accredited materials and non-observance of implementation technology [7]. Fig. 1 shows the villa and its supporting structures.



Fig. 1. Building construction

Organization and responsibilities of the quality control team

The quality control team includes, quality control specialist: ensure the implementation of the project works according to the required specifications and submit reports thereon to the project manager, and ensure the quality of the materials that are supplied to the project (veneer stone in terms of dimensions and its conformity with specifications) [8]. Fig. 2 presents the interfaces of the project under study in Iraq.

Implementation supervisor: acceptance or rejection of completed works and work on monitoring operations to ensure that standards are met for production



Fig. 2. Interfaces of the studied project in Iraq

operations, in addition to suggesting amendments regarding the production process [9].

Project manager:

Coordinating and communicating between all project parties and managing the resources and information flowing to and from the project, in addition to providing suggestions and recommendations for continuous development and improvement [10].

Site safety manager:

Adequate knowledge and work to apply the security and safety rules and legislations in force in the country.

This is the purpose of the plan for the quality control process to be a form of cooperation and integration between all parties to the project, and it is not the responsibility of the quality control team to work as a “special team” but to ensure the assistance of the staff (including contractors) to obtain the final product of quality required, and to be proactive in approach, to anticipate problems and take corrective actions before they occur [11]. The following are typical responsibilities for ensuring and controlling quality for all project parties, which shows that quality is everyone’s responsibility [12].

This quality control plan includes suggested ways and methods for how to implement quality control systems and procedures for stone cladding works for facades that are implemented at the work site. It also includes the required tests and works documents that are implemented and all the activities that are accompanied to control quality to obtain works conditions conforming to specifications and contract documents and that through searching, collecting and registering [13]. Information, analyze it, and then take the right action to ensure the quality of the outputs and inputs of the implemented process [14].

Making Deliverables

It is the contractor’s responsibility to deliver all of the following:

- 1) workshop plans;
- 2) articles and Modification Requests;
- 3) timetable showing the periods for completing the necessary activities to carry out the works and the quantity of materials to be supplied (construction program);
- 4) equipment brought in to be checked on time manner;
- 5) the Contractor shall submit the details of the materials to be brought, including:
 - the technical manufacturing specifications related to the products, and here is the marble stone used in the facades;
 - installation methods as recommended by the designer;
 - factory catalogs;
 - confirmation of conformity with international quality standards;
 - performance characteristics;
 - factory’s charts about the standard information related to the project and the use of the product for a specific job.

In case that there are deviations from the specifications, the contractor must submit a list of deviations that includes all points that do not conform to the specifications with justification to clarify the selection of these samples to be approved [15].

Quality Control Procedures

The quality management has to provide the environment within which related tools, techniques and procedures can be deployed effectively leading to operational success for a construction project [16].

The contractor must carry out the work according to an approved quality plan and the quality control plan, which is the daily tool for quality assurance. During the construction phase, the contractor submits the checklists to the supervisor for work inspection and the contractor must hand over materials inspection report before receiving them [17]. As for the stone facade works, the checklists for the installation work and the work carried out must be submitted according to the contract documents, workshop plans, and material specifications. The work sequence is carried out to achieve quality according to the Fig. 3.

Following this sequence will help the contractor to avoid refusal of works. Repeated refusal of works may delay the project, which affects the overall scheduling to finish the project and thus the implementation costs.

For Supplies

The contractor must be responsible for the supply of materials, equipment and systems that will be installed in the project, and these supplies must be in con-

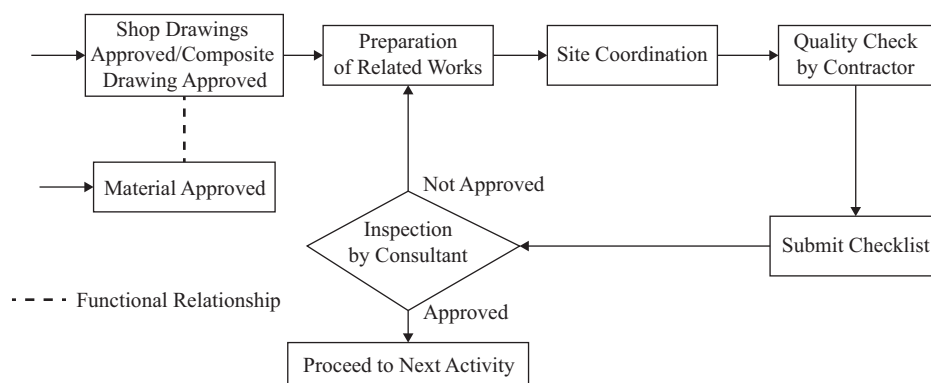


Fig. 3. The sequence of implementation of works to achieve quality

formity with the contractual obligations, specifications and legal obligations, and the necessary checks and tests must be carried out before any supply is brought to the work site and the results of the examination are given to the competent authorities in the project [18]. It is forbidden to enter any material before the supervision device approves it, and the contractor performs inspections during the implementation stages using the lists of inspection, control, guarantee and safety shown later. He must also keep records of supplies for all business items, and the record of supplies must be handed over to the supervisor every week for review and audit [19].

Each consignment is stored separately from the rest of the consignments. Appropriate conditions for storage must be met, and it must be stored in places close to use

in order to avoid some risks. Table 1 presents a list of safety measures when applying stone coatings.

Table 2 presents a checklist of stone coating works.

Table 3 shows a checklist for stone cladding work.

Now let's turn to the consideration of the warranty sheet for work on stone cladding, which is presented in Table 4.

RESULTS OF THE RESEARCH

If organizations wish to achieve continuous quality improvement they need to use appropriate selection of quality tools and techniques [20]. The primary purpose of quality control is to ensure the quality product at the lowest possible cost. In practice, this can only be achieved by controlling production processes and

Table 1. The safety list for stone coating works

Checklist Items	Item Text	Response
<i>Department of Engineers</i>		
1	Do safety inspectors visit the site?	
2	Is the computational design, stiffening, and high scaffolding and temporary structures done?	
<i>Department of foremen</i>		
3	Do you keep pressure away from the worker by not showing anger to him?	
4	Are you analyzing problems rather than focusing on changing workers?	
5	Do you incorporate safety instructions into work rules?	
6	Is a report prepared for every accident or incident in the workplace?	
<i>Department of workers</i>		
7	Do you know your rights and duties regarding occupational safety?	
8	Are your colleagues inclined to safety?	
9	Do you think taking risks is part of the job?	
10	Did you undergo a preliminary medical examination before starting work?	
11	Do you undergo periodic medical examinations?	
12	Are there treatment services available to work permanently (daily medical reviews – medicines – consultations)?	
13	Have you been provided with protective clothing, tools and personal protective equipment?	

Table 2. The inspection list for stone coating works

Checklist Items	Item Text	Response
1	Ensured that there are no visible water and moisture leaks	
2	Ensure that the quality of the stone used in all types of cladding works conforms to the stipulated specifications	
3	Was it confirmed that the falling paint spots were removed before they dried?	
4	Have all excess materials, debris and rubbish been removed?	
5	Take pictures or video clips to document the completion of the work	

Table 3. The control list for stone cladding works

Checklist Items	Item Text	Response
1	Prohibited places must be clearly defined	
2	Sound insulators must be in their designated places	
3	Moisture insulators must be identified and affixed continuously and correctly to avoid weak points	
4	Ensure proper bonding between the wall and the adhesive or mortar	
5	Ensure that the minimum width of joints in stone cladding is 2 cm	

Table 4. The warranty list for stone cladding works

Checklist Items	Item Text	Response
1	Ensure that masons and stone workers follow the instructions included in the Quality Assurance Checklist	
2	Allocate sufficient distance for window frames and walls to be installed safely	
3	Ensure that the doors, windows and other openings on the external walls have been designated with openings so that the edge of the opening is at least far enough away from the corners and other adjacent openings	
4	The wall must be roughened before installation begins	
5	Use the Air Rocket to create the openings, tempering, grooves or small grooves stream on the wall to facilitate proper bonding with the adhesive or mortar	

minimizing the occurrence of defective production outside the limits of specifications. There are four practical steps to control the quality of products: determine the required level of quality: this is done through market research, product designs and specifications.

Evaluation of conformity between the product and specifications: This is done by taking regular samples from the production line and then conducting measurements on its characteristics, and comparing the results with those specified in the specifications and determine the values of the differences between them.

Evaluating and analyzing the causes leading to these differences and taking corrective and preventive actions.

Planning continuous quality improvement by reviewing product specifications.

We measured the distance between the stone joints, as the technical requirements stipulated that these joints should not be less than 2 cm.

The stability of the implementation process will be studied through the use of statistical quality control tools, which are shown in Fig. 4 [10].

Table 5 below shows the measured distance between the stone spacers.

Table 5. The distance between stone spacers

Zone	The Measurements			
1	2.4	2.1	1.8	1.8
2	2.3	2.4	2.4	2.1
3	1.6	2.4	2	2.4
4	2.3	1.7	2.4	2.3
5	2.3	1.1	1.1	1.5
6	1.1	1.5	2.3	1.8
7	1.7	2.2	2.2	2.5
8	2.1	1.1	1.1	1.6
9	1.8	2.4	2.4	2.3
10	1.8	1.7	2.3	2.1

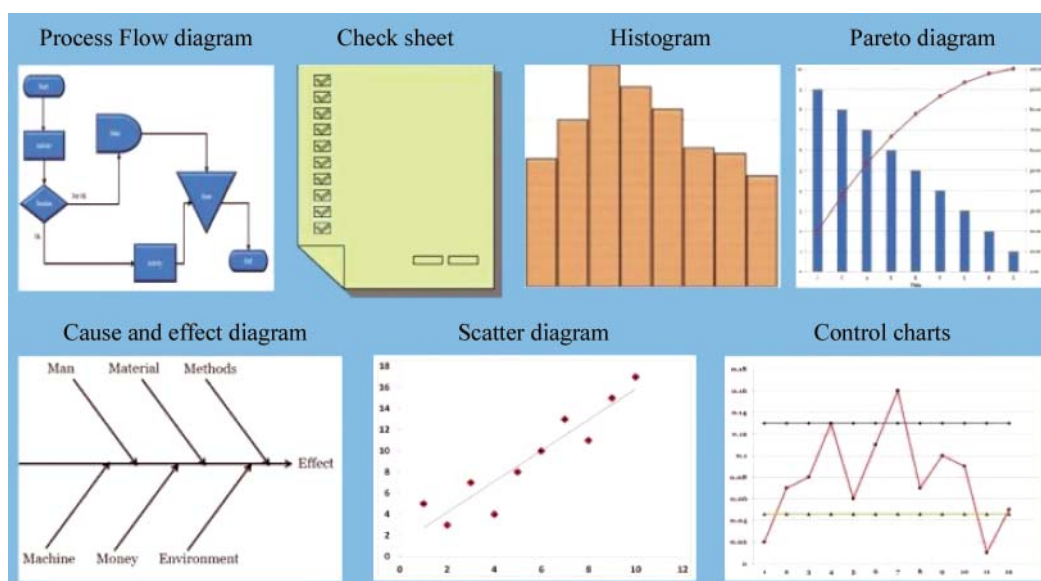


Fig. 4. Statistical quality control tools

Below are the results of the range map in Table 6.

The average results on the map are shown in Table 7 below.

Fig. 5 is shown below, which shows a diagram of the measurement range.

Fig. 6 shows an averaged measurement diagram.

We notice from the diagrams that the process is within the limits of control and there is no deviation from the limits of control, a periodic distribution of points, or upward or downward central tendencies, due to following the plan that was developed during the implementation stage, and from it we conclude the importance and made the quality control plan in reducing the amount of rework, saving in cost, and reducing changes at work.

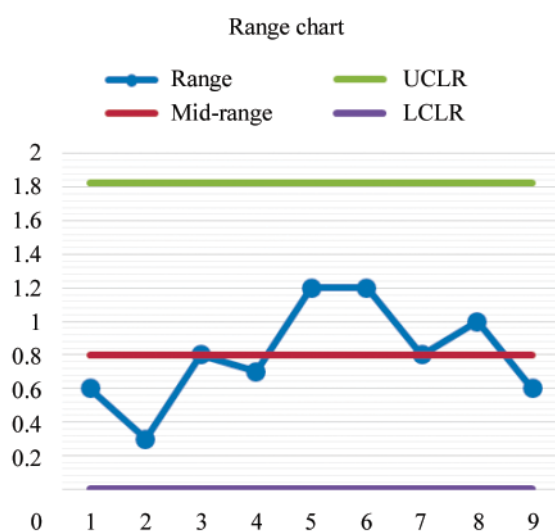


Fig. 5. Range diagram of the measurements

Table 6. Range map results

Zone	The Measurements				Range	Mid-range	UCLR	LCLR
1	1.8	1.8	2.1	2.4	0.6	0.8	1.8256	0
2	2.1	2.4	2.4	2.3	0.3	0.8	1.8256	0
3	2.4	2	2.4	1.6	0.8	0.8	1.8256	0
4	2.3	2.4	1.7	2.3	0.7	0.8	1.8256	0
5	1.5	1.1	1.1	2.3	1.2	0.8	1.8256	0
6	1.8	2.3	1.5	1.1	1.2	0.8	1.8256	0
7	2.5	2.2	2.2	1.7	0.8	0.8	1.8256	0
8	1.6	1.1	1.1	2.1	1	0.8	1.8256	0
9	2.3	2.4	2.4	1.8	0.6	0.8	1.8256	0

Table 7. Average map results

Average	Average-Average	UCLx	LCLx	d3	d4	a2
2.025	1.958333333	2.541533333	1.375133	0	2.282	0.729
2.3	1.958333333	2.541533333	1.375133	0	2.282	0.729
2.1	1.958333333	2.541533333	1.375133	0	2.282	0.729
2.175	1.958333333	2.541533333	1.375133	0	2.282	0.729
1.5	1.958333333	2.541533333	1.375133	0	2.282	0.729
1.675	1.958333333	2.541533333	1.375133	0	2.282	0.729
2.15	1.958333333	2.541533333	1.375133	0	2.282	0.729
1.475	1.958333333	2.541533333	1.375133	0	2.282	0.729
2.225	1.958333333	2.541533333	1.375133	0	2.282	0.729

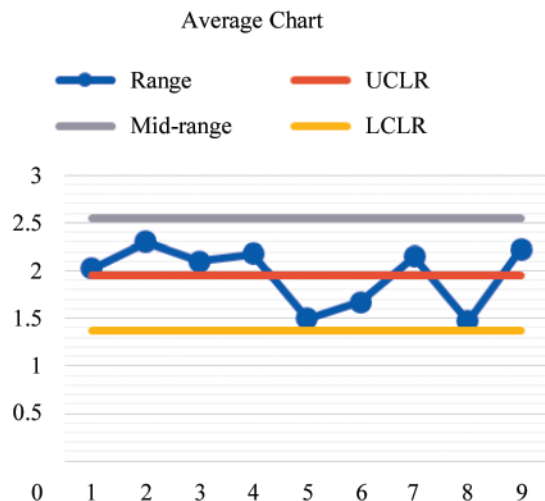


Fig. 6. Average diagram of the measurements

CONCLUSIONS AND DISCUSSION

The adoption of a quality control plan reduces waste and losses resulting from the absence of Total Quality Management. This is achieved by relying on a specialized quality team.

The research concludes seven tools in statistical quality control, which constitute the knowledge base for Total Quality Management in project implementation.

Achieving quality: this is done by developing a construction method according to the dimensions of quality as desired by the customers. It is worth mentioning that neglecting quality leads to increased time for task performance and completion, increased surveillance activities, and consequently, increased complaints from service beneficiaries. Furthermore, research is directed towards implementing a Total Quality Management program.

The implementation of Total Quality Management in construction for the case study in the Republic of Iraq will result in creating an environment that supports and preserves continuous development. It will also foster a spirit of participation among all those involved in the development process, ultimately leading to the future monitoring and development of performance measurement tools.

Total Quality Management in the case study will lead to reducing the tasks and activities necessary to transform inputs (raw materials) into construction products or services.

REFERENCES

1. Arditi D., Gunaydin H.M. Total quality management in the construction process. *International Journal of Project Management*. 1997; 15(4):235-243. DOI: 10.1016/s0263-7863(96)00076-2
2. Ashokkumar D. Study of quality management in construction industry. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2020; 3(1):36-43.
3. Basovsky L.E., Protasiev V.B. et al. *Quality management : textbook*. Moscow, Infra-M Publ., 2017; 320. (rus.).
4. Chernikov B.V. *Software quality management : textbook*. Moscow, Forum Publ., 2017; 368. (rus.).
5. Chung A., Mutis I. Quality assurance and quality control of high-rise enclosure design using lean principles. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2020; 25(1). DOI: 10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000463
6. Elovkhov A.M. *Quality management : textbook*. Moscow, Infra-M Publ., 2018; 672. (rus.).
7. Freidina E.V. *Quality management : textbook*. Moscow, Omega-L Publ., 2017; 84. (rus.).
8. Gerasimov B.I., Gerasimova E.B., Sizi-kin A.Yu. *Quality management: design : textbook*. Moscow, Forum Publ., 2016; 96. (rus.).
9. Glukhov V.V. *Quality management : textbook*. St. Petersburg, Piter Publ., 2017; 592. (rus.).
10. Gorbashko E.A. *Quality management : textbook*. Lyubertsy, Yurayt Publ., 2016; 450. (rus.).
11. Khaled Z.S.M. Improving the quality of implementation of construction projects in government contracting companies. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*. 2020; 12(5).
12. Kim Y.B., Erokhin E.V. Features of the implementation and development of quality management systems in construction organizations in the Russian Federation. *Full lifecycle management systems for high-tech products in mechanical engineering: new sources of growth*. 2020.
13. Mane P., Patil J. Quality management system at construction project: A questionnaire survey. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2020; 5(3):126-130.
14. Mehdi H.A. Performance improvement of the implementation of concrete structures in the construction sector in Iraq using the modern management technique "Six Sigma". *Journal of Engineering*. 2021; 21(1):13-29.
15. Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V., Kamaliev M.I. Features of the quality control system of the installation of hinged ventilated facade systems. *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2018; 1(43):234-240. (rus.).
16. Pavletić D., Soković M., Paliska G. Practical application of quality tools. *Journal of Achievements*

in *Materials and Manufacturing Engineering*. 2018; 25(1):1-6. (rus.).

17. Soković M. et al. Basic quality tools in continuous improvement process. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019; 55(5):1-9. (rus.).

18. Shemyakina T.Yu., Selivokhin M.Yu. *Production management: quality management (in con-*

struction) : textbook. Moscow, Alfa-M Publ., 2017; 160. (rus.).

19. Yudenko M.N. *Quality management in construction : workshop*. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2018; 512. (rus.).

20. Zaitsev G.N. *Quality management in the production process : textbook*. Moscow, Rior Publ., 2015; 63. (rus.).

Received January 9, 2022.

Adopted in revised form on May 3, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

B I O N O T E S : **Azariy A. Lapidus** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016; ORCID: 0000-0001-7846-5770; Lapidus58@mail.ru;

Ibrahim Ibrahim Fadhil Ibrahim — postgraduate student of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9555-8314, Scopus: 57195225401; eng.civil2004@gmail.com;

Mukhammet A. Fakhratov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 459805, Scopus: 6602216264; fahratov@mail.ru.

Author contributions: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Arditi D., Gunaydin H.M. Total quality management in the construction process // *International Journal of Project Management*. 1997. Vol. 15. Issue 4. Pp. 235–243. DOI: 10.1016/s0263-7863(96)00076-2

2. Ashokkumar D. Study of quality management in construction industry // *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2020. Vol. 3. Issue 1. Pp. 36–43.

3. Басовский Л.Э., Протасиев В.Б. и др. Менеджмент качества : учебник. М. : Инфра-М, 2017. 320 с.

4. Черников Б.В. Управление качеством программного обеспечения : учебник. М. : Форум, 2017. 368 с.

5. Chung A., Mutis I. Quality assurance and quality control of high-rise enclosure design using lean principles // *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2020. Vol. 25. Issue 1. DOI: 10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000463

6. Елохов А.М. Менеджмент качества : учебник. М. : Инфра-М, 2018. 672 с.

7. Фрейдина Е.В. Менеджмент качества : учебник. М. : Омега-Л, 2017. 84 с.

8. Герасимов Б.И., Герасимова Е.Б., Сизикин А.Ю. Менеджмент качества: дизайн : учебник. М. : Форум, 2016. 96 с.

9. Глухов В.В. Управление качеством : учебник. СПб. : Питер, 2017. 592 с.

10. Горбашко Е.А. Менеджмент качества : учебник. Люберцы : Юрайт, 2016. 450 с.

11. Khaled Z.S.M. Improving the quality of implementation of construction projects in government contracting companies // *Tikrit Journal of Engineering Sciences*. 2020. Vol. 12. Issue 5.

12. Kim Y.B., Erokhin E.V. Features of the implementation and development of quality management systems in construction organizations in the Russian Federation // *Full lifecycle management systems for high-tech products in mechanical engineering: new sources of growth*. 2020.

13. Mane P., Patil J. Quality management system at construction project: A questionnaire survey // *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2020. Vol. 5. Issue 3. Pp. 126–130.

14. Mehdi H.A. Performance improvement of the implementation of concrete structures in the construction sector in Iraq using the modern management

technique “Six Sigma” // Journal of Engineering. 2021. Vol. 21. Issue 1. Pp. 13–29.

15. Мухаметрахимов Р.Х., Лукманова Л.В., Камалиев М.И. Особенности системы контроля качества при устройстве навесных вентилируемых фасадных систем // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 1 (43). С. 234–240.

16. Павлетич Д., Сокович М., Палиска Г. Практическое применение инструментов качества // Журнал достижений в области материалов и технологии производства. 2018. № 25 (1). С. 1–6.

17. Сокович М. и др. Основные инструменты качества в процессе постоянного улучшения // Журнал машиностроения. 2019. № 55 (5). С. 1–9.

18. Шемякина Т.Ю., Селивохин М.Ю. Управление производством: управление качеством (в строительстве) : учебник. М. : Альфа-М, 2017. 160 с.

19. Юденко М.Н. Управление качеством в строительстве : практикум. Ростов-н/Д : Феникс, 2018. 512 с.

20. Зайцев Г.Н. Управление качеством в производственном процессе : учебник. М. : Риор, 2015. 63 с.

Поступила в редакцию 9 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 3 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Азарий Абрамович Лapidus** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016; ORCID: 0000-0001-7846-5770; Lapidus58@mail.ru;

Ибрагим Ибрагим Фадил Ибрагим — аспирант кафедры технологии и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9555-8314, Scopus: 57195225401; eng.civil2004@gmail.com;

Мухаммет Аллазович Фахратов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 459805, Scopus: 6602216264; fahratov@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 004.9:[330.32:69]

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.971-987

Уровень цифровизации российских предприятий инвестиционно-строительной сферы

Татьяна Николаевна Кисель, Юлия Сергеевна Прохорова*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Ключевое значение в определении уровня цифровизации регионов Российской Федерации приобретают различные исследования и аналитические обзоры, позволяющие оценить динамику приращения уровня цифровизации в бизнес-процессы предприятий. Приведены результаты исследования, посвященного анализу уровня цифровизации российских предприятий и организаций инвестиционно-строительной сферы (ИСС). Строительство — одна из ключевых отраслей экономики. Доля отрасли в валовом внутреннем продукте (ВВП) оценивается на уровне 5–6 % (по данным Росстата в 2019 г. 5,6 %), а доля занятых в ней составляет порядка 9 %. Масштабы и значимость строительной сферы говорят о том, что повышение эффективности деятельности предприятий, в том числе на основе внедрения цифровых технологий как основного современного драйвера процессов повышения производительности труда и результативности, может оказать влияние на развитие отечественной экономики.

Материалы и методы. Основа исследования — выборочный заочный прямой опрос в формате онлайн-анкетирования. Применялись: системный подход, общетеоретические методы познания (анализ, синтез, аналогия, обобщение, сопоставление, сравнение и др.), графическое моделирование.

Результаты. Представлены результаты оценки респондентами уровня цифровизации российских предприятий ИСС, подтверждающие активацию отрасли в цифровой среде. Выявлены факторы успешности данных процессов, к которым относятся: наличие цифровой инфраструктуры и квалифицированных кадров, что в свою очередь определяется финансовыми возможностями предприятий, наличием цифровой культуры, способностью развивать и удерживать кадры.

Выводы. Проведенный анализ доказывает, что имеются все предпосылки для эффективного развития цифровых отношений внутри предприятий и отрасли в целом. Цифровизация позволит в конечном итоге повысить экономическую эффективность и управляемость организационными и производственными процессами предприятий и увеличить долю ВВП отрасли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровизация, технологии информационного моделирования (ТИМ), преимущества внедрения ТИМ, уровень цифровизации предприятий регионов, инвестиционно-строительная сфера

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кисель Т.Н., Прохорова Ю.С. Уровень цифровизации российских предприятий инвестиционно-строительной сферы // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 971–987. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.971-987

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Николаевна Кисель, doremi2@yandex.ru.

The level of digitalization of Russian enterprises in the investment and construction sector

Tatiana N. Kisel, Yulia S. Prokhorova*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The modern vector of development of the Russian Federation is associated with the transition to a digital model in a variety of aspects: — from the penetration of information technologies into the social sphere and private life of people to their impact on the pace of development of industries and national economies, the effectiveness of public administration, the development of international cooperation. The configuration of global spheres of human activity is undergoing significant changes under the influence of digitalization and radically new emerging human needs and the enterprise management process. Various studies and analytical reviews are of key importance in determining the level of digitalization of the regions of the Russian Federation, allowing to assess the dynamics of the incremental level of digitalization in the business process of enterprises. The results of a study devoted to the analysis of the level of digitalization of Russian enterprises and organizations in the investment and construction sector are presented (ICS). Construction is one of the key sectors of the economy. Thus, its share in the gross domestic product (GDP) is estimated at 5–6 % (according to Rosstat, 5.6 % in 2019), and the share of employed in it is about 9 %. The scale and importance of the construction sector suggest that improving the efficiency of enterprises, including through the introduction of digital technologies as the main modern driver of productivity and efficiency processes, can have an impact on the development of the domestic economy as a whole.

Materials and methods. The basis of the study is a selective correspondence direct survey in the format of an online questionnaire. The following methods were used: the system approach, general theoretical methods of cognition (analysis, synthesis, analogy, generalization, comparison, comparison and others), graphical modelling.

Results. The results of respondents' assessment of the level of digitalization of Russian enterprises in the investment and construction sector are presented, confirming the activation of the industry in the digital environment. The success factors of these processes are identified, which include: the availability of digital infrastructure and qualified personnel, which in turn is determined by the financial capabilities of enterprises, the presence of digital culture, as well as the ability to develop and retain personnel.

Conclusions. The analysis proves that there are all prerequisites for the effective development of digital relations within enterprises and the industry as a whole. The transition to "digital" will ultimately increase the economic efficiency and manageability of all internal and external organizational and production processes of enterprises and increase the share of the industry's GDP.

KEYWORDS: digitalization, building information modelling technologies (BIM), advantages of implementing BIM, the level of digitalization of regional enterprises, investment and construction sector

FOR CITATION: Kisel T.N., Prokhorova Yu.S. The level of digitalization of Russian enterprises in the investment and construction sector. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):971-987. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.971-987 (rus.).

Corresponding author: Tatiana N. Kisel, doremi2@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Россия начала путь к цифровой трансформации и формированию цифровой экономики в 2002 г., когда была разработана и принята федеральная целевая программа «Электронная Россия», в задачи которой входил переход на предоставление государственных услуг и исполнение государственных функций в электронном виде, а также развитие инфраструктуры электронного правительства и доступа к государственным и муниципальным услугам¹.

Как и другие базовые отрасли экономики, инвестиционно-строительная сфера (ИСС) активно внедряет цифровые технологии (ЦТ) в обеспечи-

вающие и вспомогательные процессы реализации проектов строительства для достижения «цифровой зрелости» в соответствии с национальной целью «Цифровая трансформация»². Уровень цифровой зрелости определяется способностью предприятия, как основного элемента строительной отрасли, достигнуть целей цифровой трансформации, которые, основываясь на ступенчатой иерархии, можно представить следующим образом (рис. 1)³.

В 2022 г. российская экономика столкнулась с беспрецедентным количеством санкций, а также

² О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года : Указ Президента Российской Федерации от 21.07.2020 № 474. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202007210012>

³ Цифровизация строительной отрасли. URL: [Цифровизация строительной отрасли \(ria.ru\)](http://ria.ru).

¹ Федеральная целевая программа «Электронная Россия (2002–2010 годы)». URL: <http://government.ru/docs/all/41067/>



Рис. 1. Уровни цифровой зрелости предприятия инвестиционно-строительной отрасли (составлено авторами)

Fig. 1. Levels of digital maturity of an enterprise in the investment and construction industry (compiled by the authors)

уходом с российского рынка целого ряда ведущих организаций в области цифровизации — разработчиков программного обеспечения (ПО) для технологий информационного моделирования Autodesk и Nemetschek. Предприятия и организации, обладающие правами пользования ПО их производства, смогли продолжить использовать комплексы в своей работе, однако данный фактор нашел отражение в скорости перехода и внедрении информационных технологий (ИТ) на все этапы жизненного цикла (ЖЦ) реализации объекта капитального строительства (ОКС) (обеспечение первого уровня цифровой зрелости (рис. 1)) из-за существующего количественного разрыва в использовании отечественного и зарубежного ПО. По разным экспертным оценкам, на переход к использованию отечественного софта потребуется от одного года до трех лет. Уже сейчас есть качественные отечественные разработки, способные составить конкуренцию зарубежным аналогам. К 2023–2024 гг. планируется улучшить функционал отечественного ПО для полной замены зарубежного, тем самым обеспечить реализацию первого уровня цифровой зрелости предприятий инвестиционно-строительной отрасли в полном объеме.

Обеспечение второго уровня цифровой зрелости (рис. 1) — цифровая трансформация процессов и услуг затрагивает деятельность предприятий и заинтересованных лиц в реализации ОКС на региональном и федеральном уровне. Минстрой России инициировал создание единого информационного пространства, которое позволяет обеспечить эффективное управление ОКС на всех этапах ЖЦ, аккумулировать всю информацию из градостроительной документации и сделать ее доступной и прозрачной. Речь идет о государственной информационной системе обеспечения градостроительной деятельности РФ (ГИСОГД РФ), призванной оптимизировать процессы управления и интеграцию более 20 государственных информационных систем.

Обеспечение третьего уровня цифровой зрелости (рис. 1) невозможно без 100%-ного перехода российских строительных предприятий и организаций в зону цифровых технологий и компетенций. Поэтому в настоящем исследовании авторы сосредоточились на том, чтобы рассмотреть процессы цифровизации «изнутри», глазами сотрудников предприятий и организаций, и определить возможность достижения «цифровой зрелости» в рамках реализации национальной цели «цифровой трансформации».

Представляем результаты исследования, посвященного анализу уровня цифровизации российских предприятий и организаций ИСС. Важно отметить,

что сбор данных был начат в январе и завершен в ноябре 2022 г. В течение года происходили события, которые могли оказать влияние на ответы респондентов. Это могло найти отражение в ходе сбора информации, но критического значения для результатов исследования не имеет.

В качестве главной цели исследования обозначено изучение основных тенденций и результатов цифровой трансформации на предприятиях/организациях ИСС. Исследование проведено на основе анализа мнений сотрудников данных предприятий/организаций, что даст возможность получить наиболее объективную картину о реально происходящих процессах цифровизации и цифровой трансформации.

Объектом исследования являются предприятия/организации ИСС различной направленности.

Предмет исследования — определение мнений сотрудников предприятий/организаций ИСС относительно процессов цифровизации и цифровой трансформации на микроуровне (непосредственно на предприятиях/организациях).

Вопросы цифровизации и цифровой трансформации в последнее время стали одними из популярных направлений исследования. Цифровизация позволяет производственным компаниям управлять сложными производственными процессами [1–3] и открывает новые возможности, например, в отношении эффективности, адаптивности и автоматизации, тем самым обеспечивая конкурентоспособность и рост [4–7].

Существует ряд российских^{4, 5, 6, 7} [8] и зарубежных⁸ [9, 10] работ, посвященных изучению уровня применения ЦТ, всемирно известные консалтинговые компании сформулировали рекомендации в области цифровизации и цифровой транс-

⁴ Индикаторы цифровой экономики: статистический сборник. URL: <https://www.hse.ru/data/2019/06/25/1490054019/ice2019.pdf>

⁵ Индекс «Цифровая Россия» // Сколково. URL: https://sk.skolkovo.ru/storage/file_storage/00436d13-c75c-46cf-9e78-89375a6b4918/SKOLKOVO_Digital_Russia_Report_Full_2019-04_ru.pdf

⁶ Национальный индекс развития цифровой экономики: пилотная реализация. М. : Госкорпорация «Росатом», 2018. 92 с. URL: <https://in.minenergo.gov.ru/upload/iblock/df0/df063a504b10a3af5a1ce7cbb07e35fd.pdf>

⁷ Цифровая трансформация в России — 2020. Аналитический отчет на базе опроса представителей российских компаний // ООО «Команда-А Менеджмент». URL: https://komanda-a.pro/projects/dtr_2020

⁸ The digitalisation of science, technology and innovation. Key Developments and Policies. Paris : OECD Publishing, 2020. 182 p. DOI: 10.1787/b9e4a2c0-en

формации^{9, 10}, развития и управления цифровыми технологиями и продуктами¹¹.

В настоящее время одним из ключевых направлений цифровизации и цифровой трансформации в строительстве является внедрение технологий информационного моделирования (ТИМ или BIM-технологий). Применение ТИМ дает возможность участникам инвестиционно-строительного проекта получать многочисленные преимущества, связанные с повышением точности планирования [11–13], обеспечением качества проектной документации [14, 15] и, как результат, высоким качеством строительства [16], улучшением организации и координации действий участников проекта за счет формирования и использования единого цифрового источника информации об объекте [17] и др. Российские¹² и зарубежные исследования [18–20] показали, что применение ТИМ позволяет значительно повысить экономические показатели инвестиционно-строительного проекта (количественные оценки при этом могут колебаться).

Можно сказать, что именно этому направлению цифровизации уделяется наибольшее внимание на самых разных уровнях — и практиками, и управленцами, и учеными. Это, безусловно, обоснованно. Однако в качестве гипотезы исследования предполагаем, что внедрение ЦТ происходит и по тем направлениям деятельности и бизнес-процессам, которые напрямую с ТИМ не связаны и являются по отношению к основной производственной деятельности вспомогательными — это процессы управления финансовыми и человеческими ресурсами, логистика, снабжение, маркетинг и продажи, взаимодействие с клиентами и сервис. По мнению авторов, комплексный подход к внедрению ЦТ (включая указанные процессы) позволит получить и комплексный эффект и, что важно, сформировать на предприятиях/организациях ИСС цифровую культуру и развивать цифровые компетенции.

⁹ Внедрение цифровой трансформации в промышленных компаниях // McKinsey & Company. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/implementing-a-digital-transformation-at-industrial-companies>

¹⁰ Digital transformation as a path to growth // Deloitte Global. 2023. URL: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/6287_path-to-growth/DI_path-to-growth.pdf

¹¹ Digital product management // Deloitte Global. 2023. URL: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/5224_Digital-transformation-7/DI_Digital%20transformation%207.pdf

¹² Результаты исследования эффективности применения BIM-технологий в инвестиционно-строительных проектах российских компаний // Concurator. 2005–2023. URL: <http://concurator.ru/information/bim-value/>

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование основано на проведении выборочного заочного прямого опроса в формате онлайн-анкетирования.

Целевая аудитория исследования — представители предприятий и организаций ИСС различных видов деятельности, включая органы власти, в сфере деятельности которых находятся вопросы, связанные со строительством. Предложение поучаствовать в исследовании рассылалось по электронной почте. Лица, желающие принять участие в опросе, самостоятельно заполняли электронную форму с вопросами и отправляли ее для последующей обработки и анализа. Онлайн-анкетирование позволяет респонденту выбрать удобное место и время для прохождения анкетирования, самостоятельно отметить нужные ответы, что повышает качество и точность полученных сведений и снижает вероятность их искажения. Кроме того, такой метод сбора данных дает возможность привлечь к участию в исследовании представителей различных, в том числе и удаленных, регионов, что в условиях большой территории нашей страны также актуально.

Инструментарием исследования стала анонимная (без указания личных данных и наименования организации) онлайн-анкета. Традиционно анкета включала блок «паспортчики», направленный на сбор информации о респонденте: регион, численность и возраст, вид деятельности организации/предприятия, в которой респондент работает, его позицию в организации.

Объем выборки составил 355 респондентов (табл. 1, 2). Сформировавшуюся выборку следует охарактеризовать как стихийную. В нее попали представители предприятий и организаций ИСС различной функциональной направленности (инвесторы, застройщики, девелоперы, технические заказчики, генподрядчики, подрядчики и субподрядчики, архитекторы, проектировщики, эксплуатирующие организации и др.) (табл. 1). В сформированной выборке присутствуют представители всех федеральных округов (табл. 2), хотя следует отметить перевес в сторону Центрального федерального округа (ЦФО), что в целом соответствует уровню его деловой активности, а также концентрации и масштабам действующих на его территории организаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цифровизация в строительстве — это больше, чем внедрение ТИМ

Более половины опрошенных (53 %) отмечают, что возможности цифровизации в строительстве шире ТИМ (ТИМ при этом включен в возможности цифровизации), 33 % приравнивают понятия цифровизации в строительстве к внедрению ТИМ,

Табл. 1. Распределение респондентов по основному виду деятельности организации (составлено авторами)**Table 1.** Distribution of respondents by the main type of activity of the organization (compiled by the authors)

Основной вид деятельности Main activity	Количество человек Number of people	Доля в выборке, % Share in the sample, %
Архитектор / Architect	11	3,1
Генподрядчик General Contractor	24	6,8
Государственное/муниципальное учреждение State/municipal institution	63	17,7
Девелопер / Developer	25	7,0
Застройщик Property developer	10	2,8
Образовательное учреждение (осуществляющее подготовку кадров для строительной отрасли) Educational institution (providing training for the construction industry)	10	2,8
Орган исполнительной власти Executive authority	66	18,6
Организация, осуществляющая строительный контроль Organization that carries out construction control	4	1,1
Подрядчик/субподрядчик Contractor/subcontractor	25	7,0
Проектировщик / Designer	58	16,3
Производитель/поставщик строительных материалов Manufacturer/supplier of building materials	4	1,1
Профессиональное объединение Professional association	5	1,4
Судебная экспертиза Forensic examination	2	0,6
Технический заказчик Technical customer	22	6,2
Экспертиза проектной документации Examination of project documentation	4	1,1
Эксплуатирующая организация Operating organization	9	2,5
Прочие / Other	13	3,7
Всего / Total	355	100

Табл. 2. Распределение респондентов по федеральным округам (составлено авторами)**Table 2.** Distribution of respondents by federal districts (compiled by the authors)

Федеральный округ (ФО) Federal District (FD)	Количество человек Number of people	Доля в выборке, % Share in the sample, %
Дальневосточный ФО / Far Eastern FD	17	4,8
Приволжский ФО / Volga FD	39	11,0
Северо-Западный ФО / Northwest FD	53	14,9
Северо-Кавказский ФО / North Caucasian FD	4	1,1
Сибирский ФО / Siberian FD	49	13,8
Уральский ФО / Ural FD	22	6,2
ЦФО / Central FD	136	38,3
Южный ФО / Southern FD	30	8,5
Прочие / Other	5	1,4
Всего / Total	355	100

12 % опрошенных считают, что цифровизация в строительстве может подразумевать автоматизацию различных процессов, не касаясь ТИМ (рис. 2).

Цифровая зрелость, как правило, выше у молодых и/или крупных предприятий/организаций

Достаточно высокую оценку уровню цифровизации их организации/предприятию поставил 21 % респондентов, из них 1 % считает свою организацию лидером цифровизации. 38 % респондентов оценивают уровень цифровой зрелости своей организации/предприятия на низком уровне, а 5 % оценили ее на нулевом уровне (рис. 3).

При соотношении возраста организации и ее уровня цифровой зрелости наблюдается закономерность: чем моложе организация, тем более высокую оценку цифровой зрелости она получила.

Соотношение масштабов организации и уровня цифровой зрелости показывает, что чем крупнее организация, тем оптимистичнее респонденты из числа сотрудников смотрят на уровень ее цифровой зрелости.

Одним из факторов успешности процесса цифровизации является наличие соответствующего планового документа — дорожной карты, стратегии, плана

О наличии в организации стратегии цифровизации, цифровой трансформации (или раздела по цифровизации в корпоративной стратегии) заявили 29 % опрошенных. 40 % сообщили, что такой документ находится в стадии разработки, а 31 % указал на отсутствие таких документов (рис. 4).

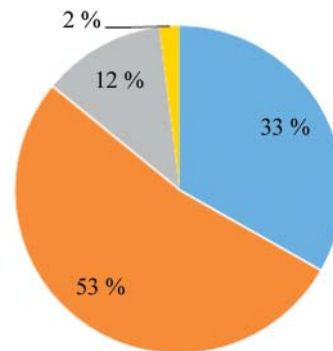
Большинство организаций/предприятий отрасли занимаются цифровизацией целенаправленно

Организации и предприятия отрасли занимаются процессами цифровизации в 62 % случаев (рис. 5).

Из них в 25 % случаев изменения касаются взаимодействия с органами власти через электронные сервисы и т.д. Внутри организации/предприятия изменений не происходит. В 25 % случаев организация/предприятие занимается цифровизацией отдельных процессов. Комплексная цифровизация осуществляется в 12 % организаций/предприятий.

Организациями/предприятиями инвестиционно-строительной сферы активно используются электронно-цифровая подпись (ЭЦП), электронный документооборот. Распространена практика заключения договоров в электронной форме

Об использовании ЭЦП сообщили 87 % опрошенных (рис. 6), электронный документооборот внедрен в 85 % организаций/предприятий респон-



- Цифровизацию в строительстве можно приравнять к внедрению технологий информационного моделирования (ТИМ)
- Digitalization in construction can be equated with the introduction of information-modelling technologies (BIM)
- Возможности цифровизации в строительстве включают внедрение ТИМ, но шире ТИМ
- The possibilities of digitalization in construction include the introduction of BIM, but more broadly BIM
- Автоматизация различных процессов. Может не касаться ТИМ
- Automation of various processes. Can be not about BIM
- Не понимаю содержание понятия «цифровизация»
- I do not understand the content of the concept of "digitalization"

Рис. 2. Распределение ответов респондентов на вопрос «Как лично вы понимаете цифровизацию в строительстве?» (составлено авторами)

Fig. 2. Distribution of respondents' answers to the question "How do you personally understand digitalization in construction?" (compiled by the authors)

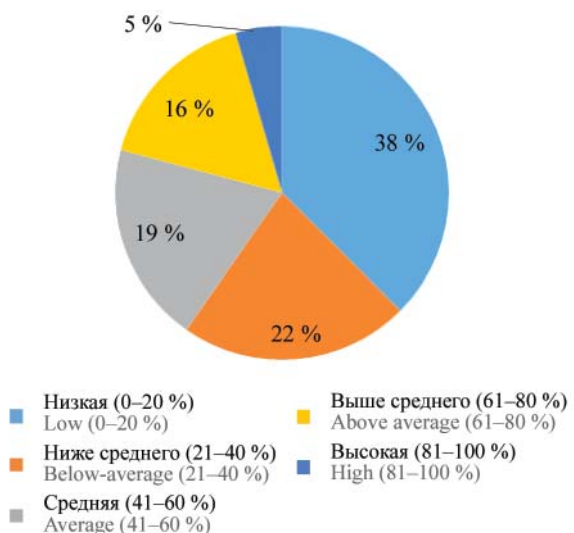


Рис. 3. Распределение ответов респондентов на вопрос: «Как вы можете оценить цифровую зрелость вашей организации/предприятия в процентах от 0 до 100 %?» (составлено авторами)

Fig. 3. Distribution of respondents' answers to the question: "How can you assess the digital maturity of your organization/enterprise as a percentage from 0 to 100 %?" (compiled by the authors)

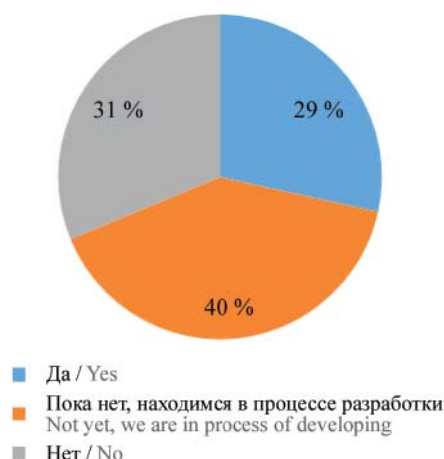


Рис. 4. Распределение ответов респондентов на вопрос о наличии в их организации/предприятии стратегии цифровизации, цифровой трансформации (или раздела по цифровизации в корпоративной стратегии) (составлено авторами)

Fig. 4. Distribution of respondents' answers to the question of whether their organization/enterprise has a digitalization strategy, digital transformation (or a section on digitalization in the corporate strategy) (compiled by the authors)

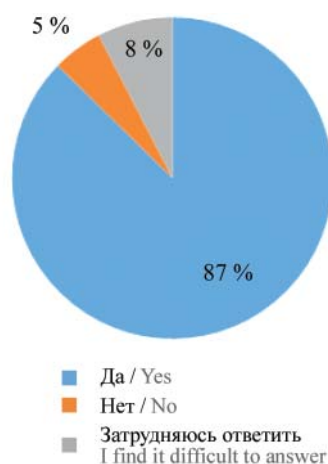


Рис. 6. Распределение ответов респондентов на вопрос «Используется ли в вашей организации электронная цифровая подпись (ЭЦП)?» (составлено авторами)

Fig. 6. Distribution of respondents' answers to the question "Is an electronic digital signature (EDS) used in your organization?" (compiled by the authors)



Рис. 5. Распределение ответов респондентов на вопрос «Как вы можете охарактеризовать процесс цифровой трансформации в вашей организации/предприятии?» (составлено авторами)

Fig. 5. Distribution of respondents' answers to the question "How can you characterize the process of digital transformation in your organization/enterprise?" (compiled by the authors)

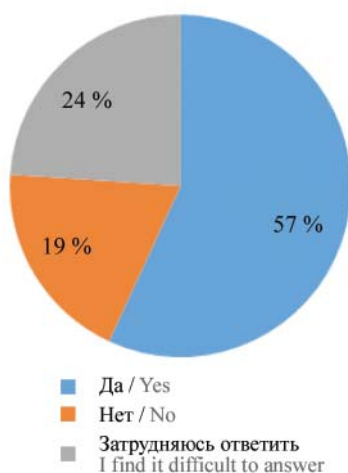


Рис. 7. Распределение ответов респондентов на вопрос «Есть ли в вашей организации практика заключения договоров в электронной форме?» (составлено авторами)

Fig. 7. Distribution of respondents' answers to the question "Does your organization have a practice of concluding contracts in electronic form?" (compiled by the authors)

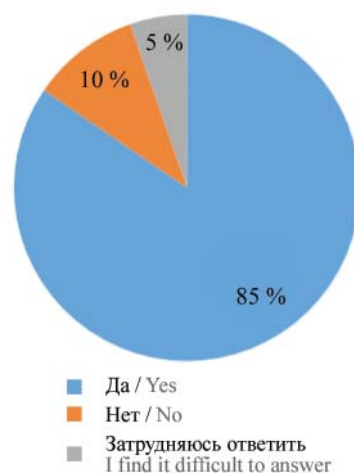


Рис. 8. Распределение ответов респондентов на вопрос «Используется ли электронный документооборот в вашей организации?» (составлено авторами)

Fig. 8. Distribution of respondents' answers to the question "Is electronic document management used in your organization?" (compiled by the authors)

дентов (рис. 7). Более половины опрошенных (57 %) отметили, что в их организации/предприятии имеется практика заключения договоров в электронной форме (рис. 8).

Внедрение и применение ТИМ — важнейшее направление цифровизации в строительстве. Доля организаций/предприятий, использующих ТИМ в своей работе, растет

Из числа опрошенных 7 % отметили, что их организация/предприятие в основном работает с применением ТИМ. Еще 24 % указали, что ТИМ применяются в ряде проектов, используются некоторые элементы ТИМ. 32 % сообщили, что не применяют ТИМ, однако планируют внедрение в течение трех лет. 28 % не применяют и не планируют в ближайшие годы внедрять ТИМ (рис. 9).

Таким образом, применение ТИМ (полноценное или частичное) подтвердили суммарно 31 % респондентов (110 человек). Относительно данного вопроса стоит дать дополнительные пояснения. ТИМ — это целый набор методов и инструментов работы. И зачастую можно встретить различное понимание того, что такое ТИМ — от простой 3D-визуализации до применения всего комплекса инструментов на всех этапах ЖЦ с доступом к работе с информационной моделью множества участников и т.д. Поэтому в данном случае нельзя делать вывод о полноценном и комплексном внедрении ТИМ в 31 % организаций. Правильно было бы сказать, что по результатам опроса около трети опрошенных используют методы и инструменты ТИМ в своей работе. Можно сделать вывод, что совместные усилия государства, профессиональных

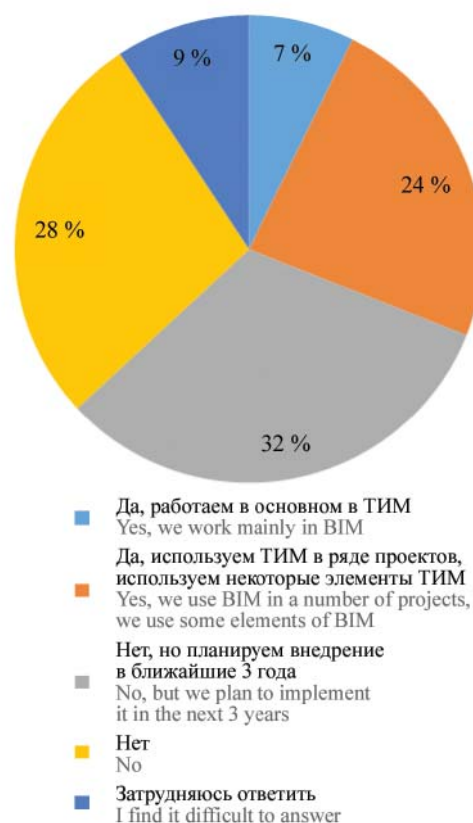


Рис. 9. Распределение ответов респондентов на вопрос «Использует ли ваша организация технологии информационного моделирования (ТИМ/BIM)?» (составлено авторами)

Fig. 9. Distribution of respondents' answers to the question "Does your organization use information modelling technologies (BIM)?" (compiled by the authors)

сообществ, производителей ПО, образовательных учреждений, отдельных лидеров в области ТИМ оказались не напрасны — имеет место положительная динамика. Этому способствовали многочисленные мероприятия, посвященные проблемам и преимуществам ТИМ, совместная работа профессиональных сообществ, государственных министерств и ведомств, значительно расширившиеся возможности обучения в сфере ТИМ. Безусловно, оказало влияние и решение сделать применение ТИМ обязательным при работе с проектами, финансируемыми из средств бюджетной системы.

Респондентам, утвердительно ответившим на вопрос о применении в их организации ТИМ, были заданы дополнительно два вопроса. Это во-

просы, касающиеся используемого ими ПО, а также наличия опыта получения положительного заключения государственной экспертизы информационной модели. Вопросы были заданы 110 респондентам (31 % опрошенных). Из них 26 респондентов (7,3 %) сообщили, что их организации работают в основном в ТИМ, и 84 (24,7 %) — используют элементы ТИМ.

Этой группе респондентов задан вопрос «Какое программное обеспечение используется в вашей компании для формирования BIM-модели и ее последующего использования?». Были предложены варианты ответов, а также возможность вписать свой вариант ответа. Распределение ответов продемонстрировано в табл. 3.

Табл. 3. Используемое респондентами программное обеспечение для работы с ТИМ (из числа респондентов, применяющих ТИМ) (составлено авторами)

Table 3. Software used by respondents to work with BIM (from among respondents using BIM) (compiled by the authors)

Программное обеспечение Software	Количество респондентов, чел. Number of respondents, people.	Доля респондентов, % Percentage of respondents, %
Autodesk Revit	84	76,4
AutoCAD	69	62,7
Navisworks	36	32,7
ARCHICAD	35	31,8
ЛИРА-САПР / LIRA-SAPR	30	27,3
Dynamo	15	13,6
SketchUp	14	12,7
Renga (Renga Architecture, Renga Structure, Renga MEP)	11	10,0
AVEVA E3D, AVEVA BOCAD	11	10,0
САПФИР-3D / SAPFIR-3D	9	8,2
Autodesk Plant 3D	7	6,4
Tekla Structures	7	6,4
Advance Steel	4	3,6
Nemetschek Allplan	4	3,6
Bentley AECOsim Building Designer	4	3,6
InfraWorks	4	3,6
Топоматик Robur / Topomatic Robur	4	3,6
MicroStation	3	2,7
Rhinoceros	3	2,7
Civil 3D	2	1,8
STARK ES	1	0,9
ZWSOFT	1	0,9
TAD (рабочий стол архитектора) / TAD (architect's desktop)	1	0,9
BricsCAD BIM	1	0,9
Продукты Кредо-Диалог / Credo-Dialog Products	1	0,9
RIB iTWO	1	0,9
FreeReason	1	0,9
ЕОСДО, ОИС МЦСР, ЕОС-Закупки / EOSDO, ICSR OIC EOS-Procurement	1	0,9
FEM models	1	0,9
Pilot-BIM	1	0,9
Datamine	1	0,9
Agisoft Metashape	1	0,9
Nanosoft	1	0,9

В данном списке имеются и российские производители ПО и их не так мало. Это и Renga и ПО компании «Кредо-Диалог», nanoCAD, Топоматик Robur, ЛИРА-САПР и САПФИР-3D, единые отраслевые системы ЕОСДО, ЕОС-Закупки и др. Необходимость разработки отечественного ПО в сфере ТИМ в последнее время подчеркивается на уровне государства, а также активно обсуждается на проводимых отраслевых мероприятиях.

В строительстве используется целый ряд цифровых технологий и решений как для основных производственных бизнес-процессов, так и для вспомогательных

Респонденты отмечают (распределение ответов представлено на рис. 10) использование программных решений для: автоматизации постановки про-

изводственных задач; автоматизации и/или облачных решений для мониторинга работ на площадке; онлайн-мониторинга исполнения плана организации строительства (ПОС); дистанционного контроля объемов выполненных работ с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Также используются программы для: оптимизации логистики, входящего контроля строительных материалов с применением информационных технологий, автоматизации процессов взаимодействия с клиентами, управления человеческими ресурсами и т.д.

Исходя из того, что в ходе опроса значительная доля респондентов затруднялась с ответом на данный вопрос, можно сделать вывод, что полученные сведения об использовании цифровых технологий и решений являются, вероятно, нижней планкой:

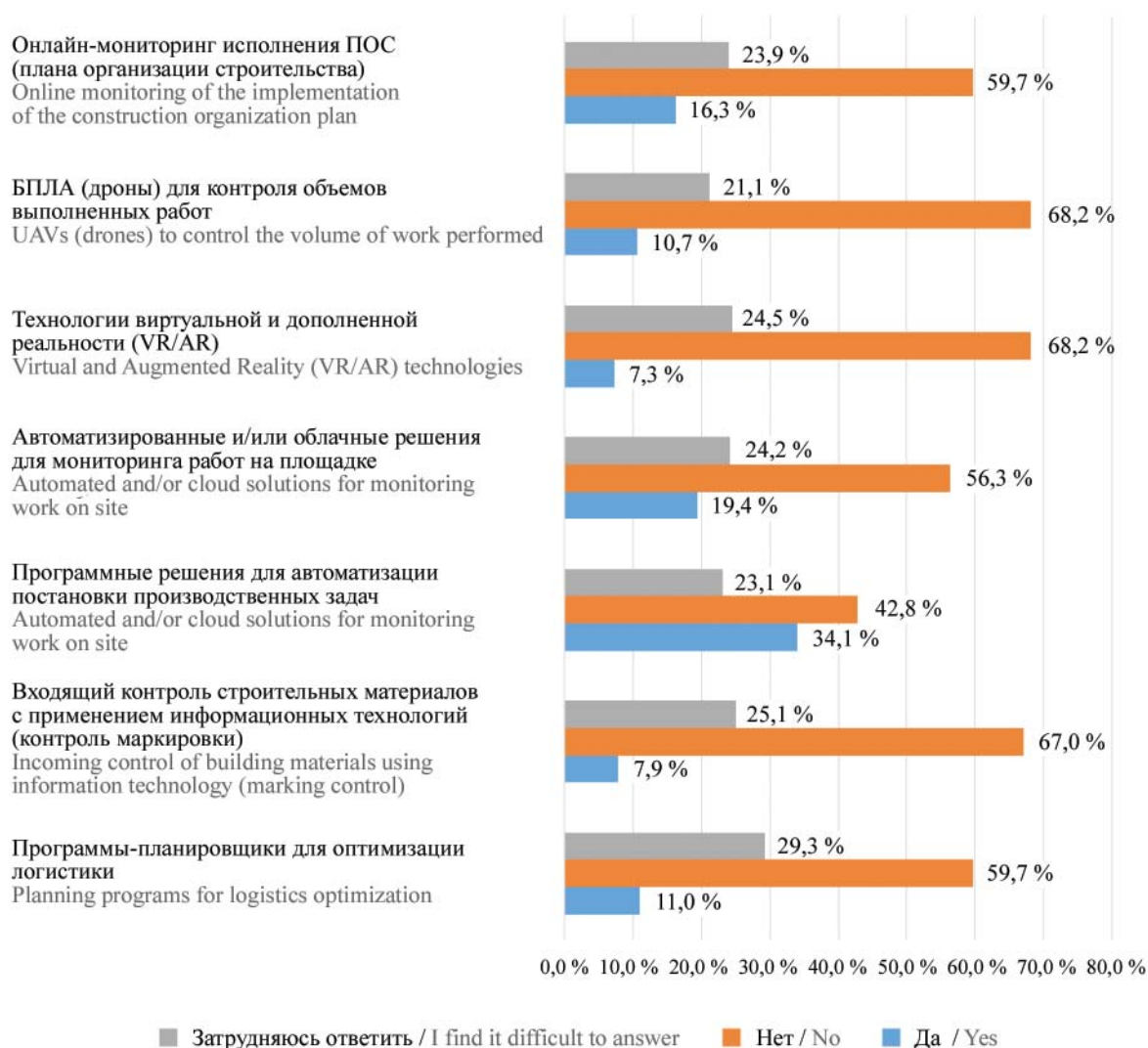


Рис. 10. Распределение ответов респондентов на вопрос «Какие из перечисленных цифровых технологий и решений используются в вашей организации?» (составлено авторами)

Fig. 10. Distribution of respondents' answers to the question "Which of the listed digital technologies and solutions are used in your organization?" (compiled by the authors)

высока вероятность того, что в ряде случаев в организациях таких респондентов указанные технологии используются, однако сам респондент не осведомлен об этом или не уверен в ответе.

В качестве индикатора уровня цифровизации можно рассматривать и применение организациями различного ПО, электронных сервисов для тех или иных бизнес-процессов. В результате опроса получена информация об использовании ПО, электронных сервисов и площадок для ряда бизнес-процессов (рис. 11):

- управление финансово-хозяйственной деятельностью — 40,3 %;
- закупки (снабжение), включая закупку и поставку стройматериалов, поиск строительной техники — 39,2 %;
- управление персоналом — 33,5 %;
- взаимодействие с клиентами — 29,9 %;
- управление и мониторинг строительства — 24,5 %;
- привлечение клиентов, продажи — 17,7 %;
- управление основными фондами (в том числе управление и эксплуатация объектов недвижимости) — 16,3 %.

Как и в предыдущем вопросе, значительная доля респондентов затруднялась с ответом. Соответственно, также можно сделать вывод, что полученный результат является нижней планкой использования ПО, электронных сервисов и площадок: вероятно, что в некоторых случаях в организациях/предприятиях таких респондентов эти возможности цифровизации используются, однако респондент не уверен в ответе или недостаточно осведомлен.

В настоящее время активно развивается сеть электронных сервисов, где можно получить услуги различного характера. Это касается и профессиональной среды, в том числе для предприятий/организаций ИСС. Среди наших респондентов более половины (51,5 %) пользуются электронными услугами в целях прохождения экспертизы проектной документации, более 30 % — получения разрешения на строительство и получения финансирования, более 20 % — получения услуг ввода и постановки объекта на учет, разрешения на ввод в эксплуатацию и оформления земельного участка. Такое распределение может быть объяснено не столько тем, что какие-то организации не используют электронные сервисы, потому что предпочитают традиционный вид получения услуг, а направлением деятельности



Рис. 11. Распределение ответов респондентов на вопрос «Использует ли ваша организация программное обеспечение, электронные сервисы, площадки и т.д. для следующих бизнес-процессов?» (составлено авторами)

Fig. 11. Distribution of respondents' answers to the question "Does your organization use software, electronic services, platforms, etc. for the following business processes?" (compiled by the authors)

организации и, соответственно, направлением услуг, которыми в рамках данной деятельности необходимо пользоваться.

Кроме того, 16,9 % респондентов отметили, что никакими электронными сервисами в их организации не пользуются (рис. 12).

Помимо предложенных вариантов ответов, респонденты отметили также использование электронных сервисов для выдачи заключений о соответствии построенного объекта, подачи информационных документов через региональный портал государственных услуг, инженерных изысканий, взаимодействия с фискальными органами, а также взаимодействия с государственными органами и российскими студенческими отрядами. Некоторые респонденты указали, что не пользуются электронными сервисами самостоятельно, так как их использует подрядчик.

Основным препятствием цифровизации является нехватка знаний и дефицит квалифицированных кадров

Нехватку знаний в области ЦТ у рядовых сотрудников и менеджмента организации/предприятия отметил 71 % опрошенных, а дефицит квалифицированных кадров на рынке труда составляет 64,5 %. О наличии дефицита финансирования на процессы цифровизации обратили внимание 62,3 % (рис. 13).

Более половины респондентов (51,3 %) заявили об отсутствии или низком уровне цифровой культуры в организациях, отрасли и обществе.

Потенциальные эффекты, которые может получить организация/предприятие ИСС в результате цифровизации оцениваются высоко. А эффекты и результаты цифровизации непосредственно в своей организации — низко

В отношении потенциальных эффектов для предприятий/организаций отрасли респонденты чаще всего называли ускорение производственных процессов, улучшение координации между подразделениями, а также улучшение качества управления и организации процессов (рис. 14).

В отношении собственного места работы оценки респондентов намного пессимистичнее. Более 30 % опрошенных считают, что в результате цифровизации и цифровой трансформации в их организации не будет/не было получено никаких эффектов.

Информационная инфраструктура, квалифицированные кадры и цифровая культура являются важнейшими факторами цифровизации

Лишь 5 % опрошенных указали, что существующая в их организации информационная инфраструктура полностью соответствует требованиям, необходимым для эффективного развития, 28 % склонны считать, что цифровая инфраструктура развита на достаточно высоком уровне.

О дефиците квалифицированных кадров, обладающих компетенциями в области ЦТ, сообщили

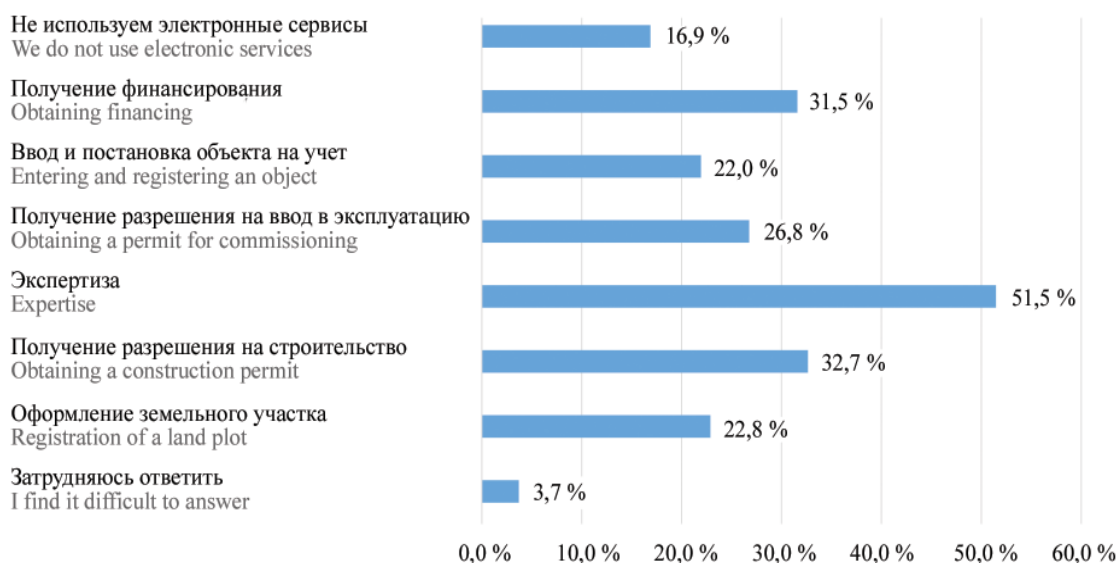


Рис. 12. Распределение ответов респондентов на вопрос «Какими электронными услугами пользуется ваша организация?» (составлено авторами)

Fig. 12. Distribution of respondents' answers to the question "What electronic services does your organization use?" (compiled by the authors)

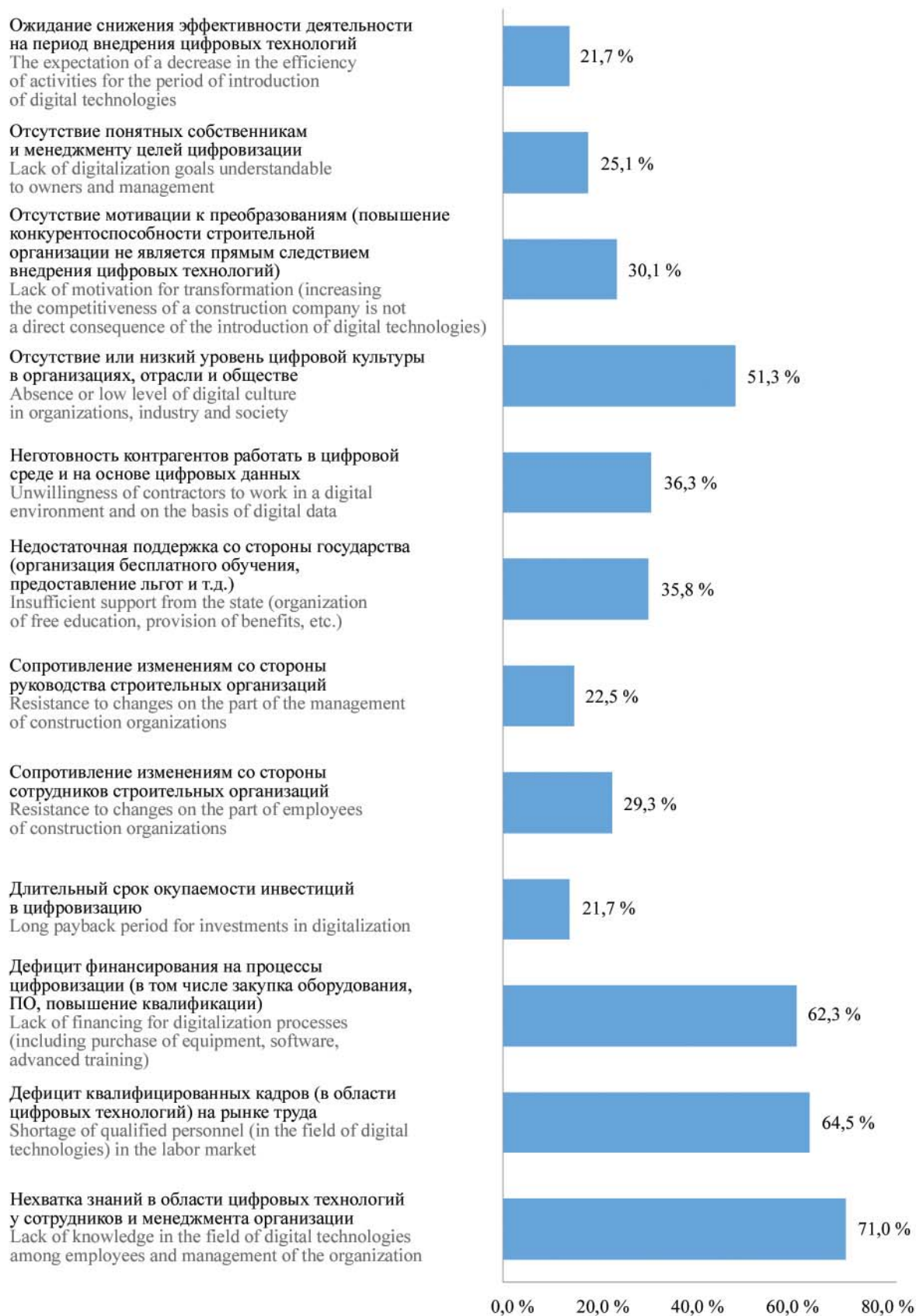


Рис. 13. Распределение ответов респондентов на вопрос «Что, по вашему мнению, является препятствием цифровизации и цифровой трансформации в строительной отрасли?» (составлено авторами)

Fig. 13. Distribution of respondents' answers to the question "What, in your opinion, are the obstacles to digitalization and digital transformation in the construction industry?" (compiled by the authors)



Рис. 14. Распределение ответов респондентов на вопрос «Какие эффекты, по вашему мнению, могут быть получены в строительных организациях и непосредственно в вашей организации в результате цифровизации и цифровой трансформации?» (составлено авторами)

Fig. 14. Distribution of respondents' answers to the question "What effects, in your opinion, can be obtained in construction organizations and directly in your organization as a result of digitalization and digital transformation?" (compiled by the authors)

75 % респондентов, и лишь 7 % ответили, что такой проблемы в их организациях на данный момент нет.

В 62 % организаций/предприятий разделяют ценности цифровой культуры полностью (16,1 %) или частично (46 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Цифровизация и цифровая трансформация, по мнению авторов, не являются неординарными процессами. Несмотря на то, что внедрение ЦТ позволяет достичь результатов в плане производительности, точности и качества, скорости действий, обмена и анализа информации, эти процессы слу-

жат логическим следствием современного уровня развития технологий. Достигнутый уровень технологического развития постепенно отражается во всех сферах жизнедеятельности, встраиваясь как в производственные процессы, так и в социальную жизнь. Поэтому цифровизация и цифровая трансформация экономики — процесс неизбежный, определяемый уровнем развития ЦТ.

Инвестиционно-строительная сфера, характеризующаяся технологической сложностью, информационной насыщенностью и высокой стоимостью производимой продукции, не может оставаться в стороне от процессов цифровизации. И несмотря на то, что по результатам исследований строитель-

ство на данный момент является скорее аутсайдером в вопросах внедрения ЦТ, у отрасли в этом направлении имеется колоссальный потенциал.

Результаты исследования подтверждают, что процессы цифровизации в строительстве в настоящий момент активизированы. Важными фактора-

ми успешности этих процессов являются наличие цифровой инфраструктуры и квалифицированных кадров, что в свою очередь определяется финансовыми возможностями организации, наличием цифровой культуры, а также способностью развивать и удерживать кадры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 // Securing the future of German manufacturing industry. 2013.
2. Kurilova A.A., Ivanov D., Savenkov D. Management of the Organization of Digital Production Companies // Proceedings of the International Scientific Conference “Far East Con” (ISCFEC 2020). 2020. DOI: 10.2991/aebmr.k.200312.162
3. Litvinenko V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29. Issue 3. Pp. 1521–1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4
4. De Carolis A., Macchi M., Negri E., Terzi S. A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies // Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing. 2017. Pp. 13–20. DOI: 10.1007/978-3-319-66923-6_2
5. Siedler C., Dupont S., Zavareh M.T., Zeihsel F., Ehemann T., Sinnwell C. et al. Maturity model for determining digitalization levels within different product life-cycle phases // Production Engineering. 2021. Vol. 15. Issue 3–4. Pp. 431–450. DOI: 10.1007/s11740-021-01044-4
6. Plotnikov A.V., Kursat D., Hiroko K., Mikhailova S.D. The impact of digital transformation on the economy // Moscow Economic Journal. 2020. Issue 7. P. 15. DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10518
7. Rusch M., Schöggel J.P., Baumgartner R.J. Application of digital technologies for sustainable product management in a circular economy — a review. 2021. DOI: 10.31235/osf.io/twgks
8. Абдрахманова Г.И., Вишневецкий К.О., Гохберг Л.М., Дранев Ю.Я., Зинина Т.С., Ковалева Г.Г. и др. Что такое цифровая экономика? Тренды, компетенции, измерение : докл. к XX Апрельской международной научной конф. по проблемам развития экономики и общества. М. : Высшая школа экономики, 2019. 82 с.
9. Verhoef P.C., Broekhuizen T., Bart Y., Bhat-tacharya A., Dong J.Q., Fabian N. et al. Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda // Journal of Business Research. 2021. Vol. 122. Pp. 889–901. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.09.022
10. Kraus S., Jones P., Kailer N., Weinmann A., Chaparro-Banegas N., Roig-Tierno N. Digital Transformation: An Overview of the Current State of the Art of Research // SAGE Open. 2021. Vol. 11. Issue 3. DOI: 10.1177/21582440211047576
11. Козлов И.М. Оценка экономической эффективности внедрения информационного моделирования зданий // Architecture and Modern Information Technologies. 2010. № 1 (10). С. 6.
12. Абакумов Р.Г., Наумов А.Е., Зобова А.Г. Преимущества, инструменты и эффективность внедрения технологий информационного моделирования в строительстве // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 171–181. DOI: 10.12737/article_590878fb8be5f0.72456616
13. Musonda I. The strategic application of building information modelling (bim) to the role of construction project management // Proceedings of the Creative Construction Conference 2019. 2019. DOI: 10.3311/cc2019-065
14. Firdaus Razali M., Azam Haron N., Hassim S., Hizami Alias A., Nahar Harun A., Salihu Abubakar A. A review: Application of Building Information Modelling (BIM) over building life cycles // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 357. Issue 1. P. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012028
15. Шеина С.Г., Воронцова О.В., Швец Ю.С. Цели и задачи внедрения BIM-моделирования // Перспективные научные исследования и инновационно-технологические разработки : сб. науч. тр. по мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 45–47.
16. Хохлов А.С., Абрамян С.Г. Повышение качества строительства зданий и сооружений при помощи BIM-технологии // Universum: технические науки. 2021. № 4–1 (85). С. 91–94. DOI: 10.32743/UniTech.2021.85.4-1.91-94 EDN HDOXKN.
17. Талапов В. BIM: что под этим обычно понимают. Второе издание. 2014. URL: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17298
18. Lu W., Fung A., Peng Yi., Liang C., Rowlinson S. Cost-benefit analysis of Building Information Modeling implementation in building projects through

demystification of time-effort distribution curves // Building and Environment. 2014. Vol. 82. Pp. 317–327. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.08.030

19. Sholeh M., Fauziyah S., Khasani R. Effect of Building Information Modeling (BIM) on reduced construction time-costs: a case study // E3S Web of

Conferences. 2020. Vol. 202. P. 02012. DOI: 10.1051/e3sconf/202020202012

20. Shin M., Lee H., Kim H. Benefit–cost analysis of Building Information Modeling (BIM) in a railway site // Sustainability. 2018. Vol. 10. Issue 11. P. 4303. DOI: 10.3390/su10114303

Поступила в редакцию 8 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 7 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Татьяна Николаевна Кисель — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655408, Scopus: 56184206400, ResearcherID: R-1538-2017, ORCID: 0000-0002-6898-4822; doremi2@yandex.ru;

Юлия Сергеевна Прохорова — кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента и инноваций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 818105, Scopus: 57191269642, ResearcherID: ABI-2855-2020, ORCID: 0000-0001-5542-1716; eshly.06@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. *Securing the future of German manufacturing industry*. 2013.

2. Kurilova A.A., Ivanov D., Savenkov D. Management of the organization of digital production companies. *Proceedings of the International Scientific Conference “Far East Con” (ISCFEC 2020)*. 2020. DOI: 10.2991/aebmr.k.200312.162

3. Litvinenko V.S. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020; 29(3):1521–1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4

4. De Carolis A., Macchi M., Negri E., Terzi S. A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies. *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*. 2017; 13–20. DOI: 10.1007/978-3-319-66923-6_2

5. Siedler C., Dupont S., Zavareh M.T., Zeihsel F., Ehemann T., Sinnwell C. et al. Maturity model for determining digitalization levels within different product lifecycle phases. *Production Engineering*. 2021; 15(3–4):431–450. DOI: 10.1007/s11740-021-01044-4

6. Plotnikov A.V., Kursat D., Hiroko K., Mikhaïlova S.D. The impact of digital transformation on the economy. *Moscow Economic Journal*. 2020; 7:15. DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10518

7. Rusch M., Schöggel J.P., Baumgartner R.J. *Application of digital technologies for sustainable product*

management in a circular economy — a review. 2021. DOI: 10.31235/osf.io/twgks

8. Abdrakhmanova G.I., Vishnevsky K.O., Gokhberg L.M., Dranev Yu.Ya., Zinina T.S., Kovaleva G.G. et al. *What is the digital economy? Trends, competencies, measurement : report for the XX April international scientific conference on the problems of economic and social development*. Moscow, Higher School of Economics, 2019; 82. (rus.).

9. Verhoef P.C., Broekhuizen T., Bart Y., Bhattacharya A., Dong J.Q., Fabian N. et al. Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda. *Journal of Business Research*. 2021; 122:889–901. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.09.022

10. Kraus S., Jones P., Kailer N., Weinmann A., Chaparro-Banegas N., Roig-Tierno N. Digital transformation: An overview of the current state of the art of research. *SAGE Open*. 2021; 11(3). DOI: 10.1177/21582440211047576

11. Kozlov I. Estimation of economic efficiency of the building information modeling introduction. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2010; 1(10):6. (rus.).

12. Abakumov R.G., Naumov A.E., Zobova A.G. Benefits, tools and efficiency of information modeling technologies implementation in construction. *Bulletin OF BSTU named after V.G. SHUKHOV*. 2017; 5:171–181. DOI: 10.12737/article_590878fb8be5f0.72456616 (rus.).

13. Musonda I. The strategic application of Building Information Modelling (BIM) to the role of

construction project management. *Proceedings of the Creative Construction Conference 2019*. 2019. DOI: 10.3311/cc2019-065

14. Firdaus Razali M., Azam Haron N., Hassim S., Hizami Alias A., Nahar Harun A., Salihu Abubakar A. A review: Application of Building Information Modelling (BIM) over building life cycles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 357(1):012028. DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012028

15. Sheina S.G., Vorontsova O.V., Shvets Yu.S. Goals and objectives of implementing BIM modeling. *Promising scientific research and innovative technological developments : collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference*. 2020; 45-47. (rus.).

16. Khokhlov A., Abramyan S. Improving the quality of construction of buildings and structures using BIM technology. *Universum: Technical Sciences*. 2021; 4-1(85):91-94. DOI: 10.32743/Uni-Tech.2021.85.4-1.91-94 EDN HDOXKN. (rus.).

17. Talapov V. *BIM: what is usually understood by this. Second Edition*. 2014. URL: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17298 (rus.).

18. Lu W., Fung A., Peng Yi., Liang C., Rowlinson S. Cost-benefit analysis of Building Information Modeling implementation in building projects through demystification of time-effort distribution curves. *Building and Environment*. 2014; 82:317-327. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.08.030

19. Sholeh M., Fauziyah S., Khasani R. Effect of Building Information Modeling (BIM) on reduced construction time-costs: a case study. *E3S Web of Conferences*. 2020; 202:02012. DOI: 10.1051/e3s-conf/2020202012

20. Shin M., Lee H., Kim H. Benefit–cost analysis of Building Information Modeling (BIM) in a railway site. *Sustainability*. 2018; 10(11):4303. DOI: 10.3390/su10114303

Received February 8, 2023.

Adopted in revised form on April 7, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

B I O N O T E S: **Tatiana N. Kisel** — Candidate of Economics Sciences, Associate Professor, Associate Professor 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 RISC: 655408, Scopus: 56184206400, ResearcherID: R-1538-2017, ORCID: 0000-0002-6898-4822; doremi2@yandex.ru;

Yulia S. Prokhorova — Candidate of Economics Sciences, Associate Professor 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 RISC: 818105, Scopus: 57191269642, ResearcherID: ABI-2855-2020, ORCID: 0000-0001-5542-1716; eshly.06@mail.ru.

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

Необоснованные заимствования в метаязыке государственного управления в строительстве

Мери Георгиевна Даниелян¹, Елена Юрьевна Васильева¹,
Исламбек Халикович Давлетов²

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

² Ташкентский архитектурно-строительный университет (ТАСИ); г. Ташкент, Республика Узбекистан

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — проанализировать частотность использования иноязычных терминов (в частности — англицизмов) в современном официально-деловом стиле речи, оценить понятность терминов при использовании студентами, обучающимися по специальности «Государственное и муниципальное управление», при профессиональном общении в сфере строительной деятельности.

Материалы и методы. Материалами исследования послужили работы авторов, посвященные причинам и тенденциям заимствований иностранных слов в русском языке, официальные документы, опубликованные на русском языке в 2000–2023 гг., выступления представителей органов государственного и муниципального управления, а также результаты опроса, проведенного авторами среди студентов-бакалавров, обучающихся в НИУ МГСУ по направлению 38.03.04 «Государственное и муниципальное управление». Применены методы: наблюдение, описание, опрос, количественно-статистический анализ, сравнительно-сопоставительный анализ, структурный анализ, семанто-стилистический анализ, метод дистрибутивной семантики, частотный анализ и др.

Результаты. Изучены причины заимствований и виды заимствований в русском языке. Выявлены наиболее распространенные в сфере государственного и муниципального управления иностранные слова различной степени ассимиляции. Проанализированы некоторые широко распространенные термины-заимствования с точки зрения их понятности, уместности, степени ассимиляции, а также наличия удачного русского эквивалента и целесообразности употребления англицизма. Анализ результатов анкетирования студентов-бакалавров, обучающихся по направлению «Государственное и муниципальное управление», подтвердил предположение о том, что часто иноязычная терминология понята не в полной мере, и, как следствие, иноязычные слова употребляются в речи неверно.

Выводы. Результаты исследования показали, что полный отказ от иностранных слов невозможен и не нужен, но необходимо остановить их чрезмерное употребление, использовать заимствования осмысленно и оправданно. Это позволит избежать неверных или двусмысленных интерпретаций официальных текстов, не будет вызывать негативных эффектов и, в конечном счете, будет способствовать повышению не только качества официального языка, но и государственного и муниципального управления в целом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: заимствования, иностранные слова, русский язык, культура речи, использование заимствований в языке государственного и муниципального управления

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Даниелян М.Г., Васильева Е.Ю., Давлетов И.Х. Необоснованные заимствования в метаязыке государственного управления в строительстве // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 988–1001. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.988-1001

Автор, ответственный за переписку: Елена Юрьевна Васильева, Elena.chibisova_metr@mail.ru.

Unreasonable borrowings in the metalanguage of public administration of the construction industry

Mary G. Danielyan¹, Elena Yu. Vasilyeva¹, Islambek H. Davletov²

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

² Tashkent University of Architecture and Construction; Tashkent, Republic of Uzbekistan

ABSTRACT

Introduction. The purpose of this research is to analyze the frequency of use of foreign-language terms (in particular, anglicisms) in the modern official style, to evaluate the comprehensibility of terms, used by students majoring in public and municipal administration in their professional communication in the field of construction, and to prove the inexpediency of use of some loanwords in the speech of public and municipal government officers. The authors also investigated the availability of Russian equivalents, capable of replacing anglicisms, as well as the influence of loanwords on the quality and purity of the native language. The issue of loanwords has always been debatable in the Russian language, and it gained particular relevance after amendments to the Federal law "On the State Language of the Russian Federation" had been adopted.

Materials and methods. Works addressing the reasons for and trends in (1) loanword borrowing by the Russian language, (2) official documents, published in Russian in 2000–2023, and (3) speeches delivered by representatives of public and municipal authorities, as well as (4) results of the survey, carried out by the authors among the bachelor students of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)” in the field of studies number 38.03.04 “Public and municipal administration” served as the materials for the research. The authors used such methods as observation, description, survey, quantitative and statistical analysis, comparative analysis, structural analysis, semantic and stylistic analysis, method of distributive semantics, frequency analysis, etc. to draft the article.

Results. The authors studied the reasons for and types of borrowings in the Russian language. Foreign words of various extents of assimilation, most widely spread in the field of public and municipal administration, are identified. Some widely spread borrowings are analyzed in terms of their comprehensiveness, relevance, extent of assimilation, existence of adequate Russian equivalents and expediency of their use. The analysis of the results of the survey, launched among the bachelor students, majoring in Public and Municipal Administration, confirmed the assumption about the frequent failure to fully understand the foreign-language terminology, as a result of which loanwords are used incorrectly in the formal speech.

Conclusions. The results of the research let the authors make a conclusion that the decline of foreign words is impossible and unnecessary. However, there is a need to stop overusing loanwords, and to use them consciously and reasonably. That will allow avoiding incorrect or ambiguous interpretations of official texts, prevent any negative effects, and, in the end, facilitate improvement in the quality of the official language, as well as public and municipal administration in general.

KEYWORDS: loanwords, foreign loanwords, Russian language, standard of speech, use of loanwords in the language of public and municipal administration

FOR CITATION: Daniyelyan M.G., Vasilyeva E.Yu., Davletov I.H. Unreasonable borrowings in the metalanguage of public administration of the construction industry. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):988-1001. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.988-1001 (rus.).

Corresponding author: Elena Yu. Vasilyeva, Elena.chibisova_metr@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Лексическому заимствованию подвержены многие языки. Проникновение иноязычных слов в любой национальный язык происходит, как правило, благодаря экономическим, политическим, культурным и общественным взаимодействиям. Заимствованию подвергаются названия предметов или понятий, отсутствующих в данный временной период в лексическом составе языка.

Относительная открытость языковой системы русского языка не препятствует проникновению иноязычной лексики, в связи с чем возрастает количество заимствований, употребляемых в профессиональных сообществах. Следует отметить, что на всем протяжении развития русского литературного языка наблюдается непрерывный процесс пополнения его лексического запаса за счет иноязычных слов.

Традиционно считается, что заимствование в основном вызвано историческими контактами между народами [1, 2]. В последние десятилетия иноязычные слова переходят из языка в язык в первую очередь посредством письменной речи. Виды речевой деятельности, создающие эффективный путь для заимствования, — это чтение, перевод и комментирование иностранной прессы, научной и публицистической литературы, участие в международных конференциях, общение в процессе разработки совместных технических и научных проектов, подготовка международных нормативно-правовых документов, деклараций, дипломатическая переписка и т.п. [3, 4].

Что касается причин заимствований, то первая из них — необходимость наименования новых предметов и явлений, так, например, в русский

язык вошли слова компьютер, овердрафт. Вторая причина заимствований — потребность разграничить близкие по содержанию, но все же не тождественные понятия, например обслуживание — сервис, вклад — депозит. Третья — необходимость специализации понятий, например, таких как вывоз — экспорт, оптовый продавец — дистрибьютор. Четвертая причина — стремление к экономии языковых средств, что стимулирует тенденцию замены громоздких словосочетаний однословными наименованиями. Так, слово брокер удачно заменяет в русском языке описательный перевод «посредник между продавцом и покупателем на фондовой, товарной или валютной биржах».

Но существуют также и социально-психологические причины заимствований:

1) престижность иноязычного слова по сравнению с родным или ранее заимствованным и полностью assimилировавшимся в русском языке словом. Носитель русского языка, используя иноязычные формы, такие как презентация, консалтинг, показывает свою ученость, начитанность (зачастую мнимые) и свое социальное положение;

2) коммуникативная актуальность понятия и соответствующего ему слова служит стимулом для распространения иноязычной лексики [5–7]. Конечно, актуальность меняется со временем: например, такие слова, как материализм, империализм, потеряли свою актуальность, широко распространенными терминами сегодня стали девелопмент, краудфандинг и др.

Иноязычная лексика, входящая в русский язык, разделяется на освоенные и неосвоенные заимствования [8, 9]. В отечественной лингвистике существует несколько классификаций заимствованных

слов: полностью усвоенные, сохраняющие черты языка-донора [9], интернационализмы, экзотизмы. И.Б. Голуб рассматривает заимствования, учитывая ограниченность и неограниченность их употребления в речи [10].

Иностранная лексика проникала в русский язык двумя способами: устным и письменным; до конца XVIII в. иноязычные слова заимствовались русским языком посредством устной речи, в XIX в. — благодаря письменным источникам, а в XX в. — через медийные средства. Так, в эпоху Петра I в русский язык проникло около трех тысяч иноязычных слов, из них англицизмов было лишь 5 %; в современном русском языке англицизмы не превышают 10 % от общего лексического словаря [11].

В конце XX в. наблюдалось активное развитие информационных технологий, экономических и финансовых отношений. Очевидно, что именно в этот исторический период в русский язык вошло большое количество англицизмов, таких как дисплей, браузер, сайт, кредит, маркетинг, брокер.

В отечественной лингвистической литературе мнения относительно заимствований и употребления иноязычных слов сильно разнятся. Так, В.Г. Белинский, разделявший точку зрения западников, считал, что заимствования обогащают лексический запас русского языка, а В.И. Даль, относящийся к русофилам, отмечал негативное влияние иностранных слов на национальную самобытность языка.

Спор западников и славянофилов о сохранении чистоты русского языка берет свое начало с XVIII в. Лингвисты-славянофилы не принимали языковых реформ, проводимых Н.М. Карамзиным. А.С. Шишков, возглавлявший общество «Беседа любителей русского слова», президент Российской академии наук, министр народного просвещения, отмечал, что чрезмерное заимствование пагубно влияет на родной язык: «Иностранец научит меня своему языку, своим нравам, своим обычаям, своим обрядам; воспалит во мне любовь к ним; а мне надобно любить свои... Он возбудит во мне желание читать его писателей, пристрастит меня к их слогу, выражениям, словам — а чрез то отвратит меня от чтения собственных моих книг, познания красот языка моего... Таким образом, даже нехотя, вложит в меня все свое, истребит во мне все мое и, сблизив меня со своими обычаями и нравами, удалит от моих» (Язык наш — поводирь наш в рай или в ад. Издание Международного фонда Славянской письменности и культуры [12]).

Вопрос о допустимости и целесообразности заимствований и о сохранении чистоты русского языка остается дискуссионным и по сей день.

Само по себе заимствование иностранных слов — нормальный процесс, бесспорно, обогащающий принимающий язык [13]. Напомним, что и в иностранных языках прижилось немало заим-

ствований из русского языка [14]. Проблема в том, что за последние десятилетия произошло резкое, даже чрезмерное увеличение числа иностранных слов, используемых в русском языке, в основном пришедших из английского языка (что было связано со статусом английского языка как языка международного общения, а также с тесными связями России с англоязычными странами), и из других языков, например французского.

Согласно Федеральному закону от 01.06.2005 № 53-ФЗ «О государственном языке Российской Федерации» (ч. 6 ст. 1) слова иноязычного происхождения не должны превалировать при наличии эквивалентных и синонимичных слов в русском языке. Однако такого ограничения оказалось, по мнению законодателя, недостаточно, и в феврале 2023 г. Государственная Дума РФ приняла законопроект № 221977-8 «О внесении изменений в Федеральный закон “О государственном языке Российской Федерации” (в части совершенствования механизмов обеспечения статуса русского языка как государственного языка Российской Федерации и осуществления контроля за соблюдением норм современного русского литературного языка)». Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон “О государственном языке Российской Федерации”» был принят 28.02.2023.

В текущей редакции Закон «О государственном языке Российской Федерации» обязывает использовать исконно русские слова и минимизировать иностранные слова в следующих сферах: деятельность государственных (муниципальных) органов, организаций (в том числе делопроизводство), наименования органов власти, судопроизводство, тексты нормативных актов, продукция СМИ и реклама, наименования географических объектов и надписи на дорожных знаках и т.д. (ч. 1 ст. 3 закона о государственном языке)¹. К сферам, в которых использование русского языка стало обязательным и не допускающим иностранные заимствования, были отнесены деятельность государственных (муниципальных) органов, официальная переписка организаций всех форм собственности с гражданами-россиянами, наименования географических объектов и надписи на дорожных знаках и т.д., указание адресов в телеграммах, на письмах и посылках; содержание государственных и муниципальных информационных систем; а также информация о товарах, предназначенная для потребителей.

По мнению авторов, в свете изменений, произошедших в плоскости нормативно-правового регулирования официального языка, актуальность проблемы заимствований повышается. Авторами статьи

¹ О внесении изменений в Федеральный закон «О государственном языке Российской Федерации»: Федеральный закон от 01.06.2005 № 53-ФЗ в редакции Закона № 52-ФЗ от 28.02.2023. URL: <http://actual.pravo.gov.ru/text.html#pnum=0001202302280028>

были проанализированы некоторые заимствования, распространенные в сфере государственного и муниципального управления, изучен вопрос о том, насколько оправдано использование заимствований (и в частности — англицизмов) в современной речи государственного и муниципального управления, есть ли в русском языке эквиваленты, способные заменить англицизмы, и как заимствования влияют на качество и чистоту языка (в том числе — официального).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретическую базу исследования составили работы авторов, посвященные причинам и тенденциям заимствований иностранных слов в русском языке, таких как: С.В. Анохина [15], Н.Н. Безденежных, С.В. Дюдякова, С.С. Зайцева [16], М.А. Брейтер [17], В.Г. Демьянов [13], Л.П. Крысин [5, 6], В.И. Новиков [18], М.Ю. Семёнова [19], Л.В. Щерба [20], И.Б. Голуб [10]. Практическими материалами для настоящего исследования послужили официальные документы, опубликованные на русском языке в 2000–2023 гг., и выступления представителей органов государственного и муниципального управления, а также результаты опроса, проведенного авторами среди студентов-бакалавров направления 38.03.04 «Государственное и муниципальное управление» (2–4 курсы).

При подготовке статьи использованы такие методы, как наблюдение, описание, опрос, количественно-статистический анализ, сравнительно-сопоставительный анализ, структурный анализ, семантико-стилистический анализ, метод дистрибутивной семантики, частотный анализ и др.

Опрос среди студентов проведен для выявления степени понимания заимствованных слов, относящихся к профессионализмам в сфере государственного и муниципального управления. Метод анкетирования для выполнения эксперимента выбран по следующим причинам: 1) анкетирование считается одним из оперативных методов сбора информации; 2) полученные результаты хорошо поддаются математической обработке; 3) данный метод позволяет охватить большое количество студентов (сформировать достаточно репрезентативную статистическую выборку, позволяющую сделать обоснованные выводы).

Цель анкетирования — определить, в какой мере студенты, обучающиеся на факультете менеджмента, владеют заимствованной терминологией и насколько правильно ее интерпретируют.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Заимствованные слова по степени освоения русским языком различаются на полностью ассимилированные, частично ассимилированные, неас-

симилированные. К абсолютно ассимилированным словам относятся те, которые воспринимаются как исконные и соответствуют фонетическим, грамматическим нормам языка. К частично ассимилированной лексике относятся слова, имеющие облик языка-источника по своему написанию и произношению. Неассимилированными считаются лексические единицы, которые не полностью освоены языком-реципиентом [21].

В паспорте, рабочих программах и содержании курсов по направлению «Государственное и муниципальное управление» присутствуют слова и словосочетания в разной степени ассимилированные, имеющие и не имеющие аналогов, которые достаточно точно передавали бы их значение на русском языке. К числу таких слов можно отнести: *e-governance*; *брендинг* (*брендинг территории*); *кейс*; *ERP* (*система Enterprise Resource Planning*); *бизнес-ассоциации*; *клиентела*; *IT-технологии*; *бюджетирование*; *клиентелизм*; *трансферты*; *бюрократия*; *коллаборация*; *public management* (*new public management*); *администрирование*; *венчурные*; *коммуникативность*, *социальность*; *актор*; *даунсайзинг*; *консалтинг*; *антикризисный*; *деонтология*; *концепция VBM* (*Value-Based Management*); *арбитраж*; *диджитализация* (*дигитализация*); *коррупция*; *аутсорсинг*; *инсайдерский*; *коучинг*; *аутстаффинг*; *стейкхолдер*; *этика*; *спонсоринг*; (*межкультурная*) *сензитивность*; *хедхантинг*; *престиж* и *имидж*; *процессный*; *спонсор*, *спонсорство*; *лимитированность* (*роста и т.д.*); *лимитированный*; *качественное управление* (*good governance*); *механизмы co-production и public participation* и др.

Авторами статьи изучен вопрос, насколько оправданно использование заимствований (и в частности — англицизмов) в современной речи государственного и муниципального управления, есть ли в русском языке эквиваленты, способные заменить англицизмы, и как заимствования влияют на качество и чистоту языка (в том числе — официального).

Д.Э. Розенталь отмечает: «Внедрение иноязычных слов определяется и необходимостью давать названия новым предметам и понятиям. Такие слова могут быть результатом новаторства той или иной нации в какой-либо области науки и техники. Они также могут возникнуть как следствие снобизма, моды» [22].

Популяризация в последние тридцать лет английского языка привела к увеличению числа англицизмов и американизмов в русской речи. Было время, когда речь без иноязычных вкраплений считалась скудной и пресной. Многие заимствования считаются оправданными, так как служат обозначением новых явлений, предметов, сферы деятельности, у которых нет синонимичного названия в языке-реципиенте. Неоправданные заимствования — это те слова, которые не называют ни новые слова, ни новые понятия, как правило, они относят-

ся к жаргонизмам и варваризмам [20]. Неоправданное использование в устной речи американизмов не является показателем знания английского языка говорящим, скорее всего это дань моде. Человек, владеющий на высоком уровне двумя и более языками, редко вставляет иноязычные слова, стараясь применять один языковой код. Наиболее часто в устной речи используют неоправданные американизмы люди, которые владеют английским языком на самом низком уровне, считая при этом, что иноязычные слова придадут вес их высказыванию. Бесконтрольное применение англицизмов в устной и письменной речи порождает полное или частичное непонимание услышанного или прочитанного, речь становится непонятной и отягощенной. Так, у популярных слов *дедлайн*, *ту мач*, *краш*, *трэш*, относящихся к варваризмам, имеются синонимы в русском языке, и они не называют новые реалии.

В профессиональной среде нередко происходит параллельное заимствование, при котором заимствованное слово в языке-реципиенте имеет тот же корень, что и в языке-источнике [23, 24].

Профессиональными сообществами используется большое количество англицизмов и американизмов на -инг, представляющих собой грамматическую форму — герундий, эквивалентом которому являются отглагольные существительные процессуального характера. Примерами таких заимствований могут служить американизмы: *нейминг*, *брендинг*, *трейдинг*, *спонсоринг*, *аутсорсинг*, *аутстаффинг*, *хедхантинг* и др.

Американизмы *нейминг* (*naming*) и *брендинг* (*branding*) адаптировались к языку-реципиенту, приняв формальные формы: фонетическую, грамматическую и семантическую (т.е. лексическое значение новообразованного слова), и прочно вошли в профессиональную речь.

Профессиональное слово *брендинг* означает создание и продвижение на рынке торговой марки. Еще в 70-х годах XX в. слово *бренд* практически не употреблялось в русской речи, однако существовали слова *фирма*, *марка* от английского *brand*. В этот исторический период словами *фирма*, *марка* характеризовалось какое-либо изделие, например от бытовой техники до предметов первой необходимости, которое гарантированно имело наилучшее качество. Однако лексическое значение слов *фирма*, *марка* не может покрыть весь спектр значения американизма *брендинг*, так как это процесс «*проведения мероприятий по продвижению торговой марки с созданием последующего положительного образа*». Использование данного американизма обоснованно, поскольку в русском языке нет эквивалента, а для раскрытия внутреннего содержания лексемы потребуется небольшая словарная статья.

Американизм *нейминг* (*naming*) обозначает процесс разработки наименования бренда для компании, товара или услуги и является основной ча-

стью маркетинговой стратегии для популяризации бренда. На русский язык данный профессионализм можно перевести как имяобразование, но этим словом нельзя раскрыть полное значение *нейминга* — процесса, связанного с созданием звучных, запоминающихся и точных названий для предприятий, проектов, товаров. Очевидно, что внутреннее содержание терминов-американизмов *нейминг* и *брендинг* более широкое по сравнению с русским термином. Русские определения громоздки, в них наблюдается нанизывание падежей, что приводит к более редкому употреблению при устном общении. Американизмы лаконичны, они способны адаптироваться к грамматической и словообразовательной моделям русского языка, могут являться производящими основами (*нейминговая*, *брендинговый*).

Семантическая прозрачность, краткость и емкость американизмов служат основным показателем их популярности и частотности употребления. Заимствование можно считать оправданным в том случае, если новое слово занимает свое место в определенной лексико-тематической группе либо входит в узкопрофессиональную сферу. Более того, слова *брендинг* и *нейминг* стали центром словообразовательного гнезда: *бренд* – *брендинг* – *брендовый*; *нейм* – *нейминг* – *нейминовый*. Благодаря своей способности к словообразованию иноязычное слово постепенно приближается к языковой системе принимающего языка и становится понятнее говорящим и слушающим.

Иноязычное слово *аутсорсинг* происходит от словосочетания языка *outer-resource-using* — бук. *другой источник использования*. В русском языке используется сокращенный вариант американизма *outsourcing*, обозначающий передачу организацией своих дополнительных, неосновных, вспомогательных функций некой сторонней компании. При сравнении написания этого слова в языке-доноре и языке-реципиенте становится очевидным, что оно подверглось графической и фонетической адаптации.

Термин *аутсорсинг* вошел в русский язык путем транскрипции, т.е. копирования звукового состава слова из языка-источника. Несмотря на то, что оно адаптировалось фонетически и графически, тем не менее оно не вошло в разряд общеупотребительной лексики. Фонетический облик слова *аутсорсинг* труден для произнесения и непривычен для русскоговорящих, а содержательная часть полностью понятна только специалистам. Использование этого слова, являющегося термином, в широкой аудитории приведет либо к частичному, либо полному непониманию высказывания.

Американизм *аутстаффинг* (*outstaffing*) образован от слов *out* (*вне, снаружи*) и *staff* (*персонал*) и означает *внештатный персонал некой организации*. Под *аутстаффингом* понимается *агентство*,

в котором оформлены специалисты, которые работают в иных компаниях-заказчиках.

Слова *аутсорсинг* и *аутстаффинг*, используемые специалистами в области менеджмента, нередко можно услышать из уст чиновников при интервьюировании. Людям, не знакомым с терминами управленческой сферы, не всегда понятна суть сказанного по причине незнания значения слов первоисточника. Американизм *аутсорсинг*, обозначающий передачу части функций компании сторонней организации, можно заменить словом *субподряд* либо словосочетанием *привлечение сторонних организаций*, а *аутстаффинг* — *субподрядной компанией*, передающей на время своих сотрудников в штат компании-заказчика.

Заимствованное слово *хедхантинг* (*headhunting*) — термин в управленческой сфере, означает поиск и переманивание высококвалифицированных специалистов. В английском языке сленговое слово *headhunting* (бук. *охота за головами*) изначально применялось в узкопрофессиональной среде, а позднее получило широкое распространение благодаря журналистам, описывающим процесс переманивания топ-менеджеров крупных компаний. Синонимичным выражением *хедхантинга* является *executive search* (*эксклюзивный поиск*).

Одним из популярных сейчас считается термин *e-government*. В настоящее время префикс *e-* — это частотный словообразовательный аффикс и используется при обозначении понятий, связанных с «электронной» составляющей, например, *e-mail*, *e-commerce*. Следовательно, под *e-government* подразумевается *электронное правительство*, однако, словари дают разное определение этого понятия. Так, это слово применимо и к понятию *электронное правительство*, часть *электронного государства* вместе с *электронным парламентом* и *электронным правосудием*. Нередко *e-government* имеет два значения — *электронное государство* и *электронное правительство*. В английском языке под *e-government* подразумевается *электронное правительство*, т.е. общность «*электронного государства, парламента и правосудия*», и «*электронное государство и правительство*». В отечественной литературе термин *e-government* трактуется свободно: *электронное государство*, *электронное государственное управление*, *цифровое государство* и пр.

Следуя определению К. Layne и J. Lee [25], под *e-government* понимается использование правительством компьютерных технологий, например веб-приложений, для доступа к правительственной информации, предоставление различных госуслуг как рядовым гражданам страны, так и государственным учреждениям и структурам. Аналогичной позиции придерживаются такие авторы, как S.K.M. Ewurah [26], T. Almarabeh [27, 28] и др.

E-government трактуется и как применение информационных технологий (ИТ), информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) и других сетевых телекоммуникационных технологий с целью повышения эффективности и результативности предоставления услуг в государственном секторе.

Словарь Macmillan [26] дает очень свободное в своих рамках, оттого слишком неопределенное, определение *e-government*: «*использование интернета правительством, например, для предоставления информации общественности, или для того, чтобы люди могли голосовать со своего компьютера*». Думается, что при таком разнообразном объяснении легко ошибиться в правильности интерпретации. Термины, особенно употребляющиеся в правовой и управленческой деятельности, не должны иметь несколько определений. Термин отличается от общепотребительной лексики тем, что не имеет многозначности и не может пониматься по-разному в зависимости от контекста. Многозначное интерпретирование иноязычной терминологии может привести к серьезным проблемам хотя бы потому, что вариативность значения не дает единого понимания.

Для выявления степени понимания некоторых распространенных заимствованных слов, относящихся к профессионализмам в сфере государственного и муниципального управления, был проведен опрос среди студентов НИУ МГСУ 1–4 курса.

Цель анкетирования — определить, в какой мере студенты, обучающиеся на факультете менеджмента, владеют заимствованной терминологией и насколько правильно ее интерпретируют.

Студентам было предложено заполнить две анкеты: открытую и закрытую. В закрытой анкете предлагалось задание в виде теста, в котором необходимо из данных вариантов ответов выбрать правильное толкование иноязычных терминов.

В анкете открытого типа студенты должны написать свое понимание американизмов, используя лексику русского языка и интернационализмы.

Предложенные анкеты состояли из следующих частей:

1. Вводная, содержащая просьбу к респонденту ответить на вопросы, гарантию конфиденциальности, благодарность за участие в анкетировании.
2. «Паспортная» часть, в которой респондентами указывался возраст и курс. Данные «паспортной» части необходимы для статистического анализа целевой аудитории, а ответы основной части — для подтверждения или опровержения выдвинутой авторами гипотезы.
3. Основная часть, где размещены вопросы (см. табл. 1, 2).

Табл. 1. Открытый вариант анкеты, предложенный студентам

Table 1. Open version of the questionnaire offered to the students

Опишите, как вы понимаете следующие слова. Найдите русские слова или словосочетания, которые раскрывают эти понятия Describe the way you understand the following words. Find the Russian words or phrases, that explain the following terms	
Аутсорсинг Outsourcing	
Аутстаффинг Outstaffing	
Спонсоринг Sponsoring	
Консалтинг Consulting	
Коучинг Coaching	

Табл. 2. Закрытый вариант анкеты, предложенный студентам

Table 2. The multiple-choice version of the questionnaire offered to the students

Выберите правильный ответ / Choose the correct answer	
Аутсорсинг Outsourcing	a) Кадровое агентство / Recruitment agency b) Финансовая компания / Finance company c) Инвестиционная компания / Investment company
Аутстаффинг Outstaffing	a) Кадровое агентство / Recruitment agency b) Рекрутинговая компания / Recruiting company c) Финансовая компания / Finance company
Спонсоринг Sponsoring	a) Проведение рекламной кампании / Launching an advertising campaign b) Финансовая поддержка / Financial support c) Благотворительный фонд / Charity foundation
Консалтинг Consulting	a) Аналитик / Analyst b) Консультант / Consultant c) Финансист / Financier
Коучинг Coaching	a) Наставник / Mentor b) Психолог-консультант / Consulting psychologist c) Тренер / Coach

В анкетировании приняло участие 85 студентов в возрасте от 18 до 22 лет, являющихся носителями русского языка, в том числе: 36 студентов 2-го курса, 34 студента 3-го курса и 15 студентов 4-го курса. Студенты 1-го курса в анкетировании не участвовали, поскольку на первом этапе обучения они знакомятся в основном с общенаучными терминами, не погружаются глубоко в специальную терминологию и могут не знать значения ряда терминов по объективным причинам, независимо от их этимологии. По мнению авторов, сформированная статистическая выборка репрезентативна, достаточно достоверно отражает свойства генеральной совокупности (студентов, обучающихся в НИУ МГСУ по направлению «Государственное и муниципальное управление») и позволяет делать обоснованные выводы.

В ходе анализа результатов анкетирования замечено, что, отвечая на вопросы открытого варианта анкеты, студенты придерживались одной из следующих стратегий:

- предлагали русский термин-эквивалент;
- затруднялись подобрать односложный термин-эквивалент, но смогли предложить достаточно четко сформулированный описательный перевод или подобие определения иноязычного термина;
- пытались догадаться о значении термина и пояснить его «своими словами», при этом не смогли сформулировать пояснение четко;
- затруднялись подобрать русские слова и предложили объяснение одного заимствованного термина с помощью другого заимствования;
- не дали ответа или дали ответ «не знаю».

На рис. 1 представлено распределение стратегий среди студентов 2–4 курсов.

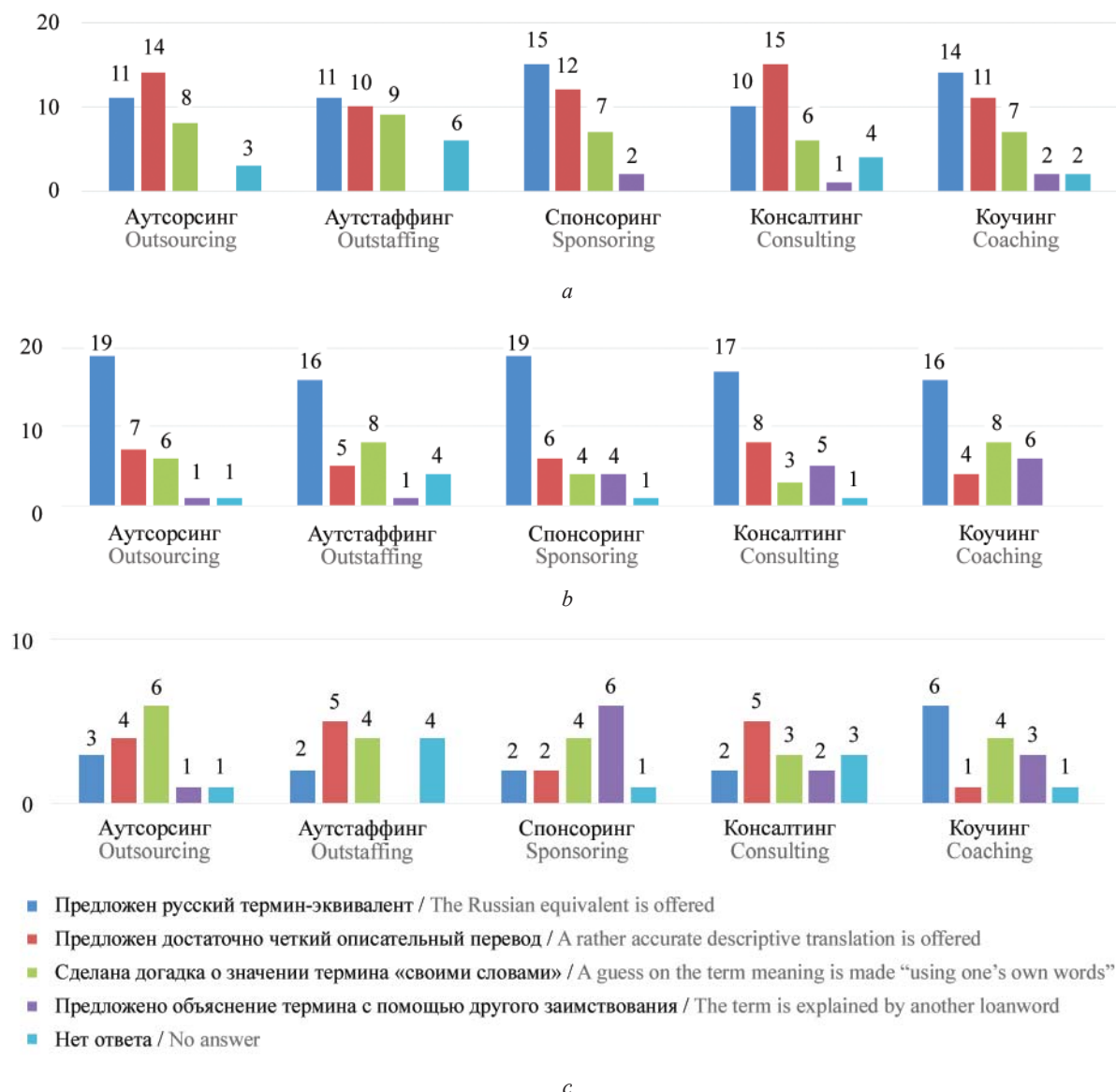


Рис. 1. Количество студентов, выбравших различные стратегии при ответах на вопросы открытой анкеты: а — 2-го курса; б — 3-го курса; в — 4-го курса

Fig. 1. The number of students, who have chosen various strategies when answering open-ended questions of the questionnaire: а — 2nd year; б — 3rd year; в — 4th year

То есть студентам на всех этапах обучения свойственно думать, что они знают значение иноязычного термина (его русский эквивалент) или могут дать его определение. Однако анализ содержательной части их ответов заставляет сделать менее оптимистичные выводы.

Лишь небольшая часть опрошенных знает точное значение терминов или может дать им верное определение. Другая часть опрошенных имеет приблизительное, хотя и неточное представление о значении терминов. Большая часть опрошенных либо дает неверное толкование термина, содержащее существенные неточности, либо не имеет представления о значении термина — дает ответ «не знаю», либо не дает никакого ответа (рис. 2).

При этом некоторые предложенные интерпретации не просто отличаются неточностью, а абсолютно далеки от истинного значения термина или даже не относятся к управленческой деятельности, например: «аутсорсинг — это когда мяч выходит за пределы игрового поля», «консалтинг — это продавец-консультант». Доля подобных ответов составила 3 %.

Также интересно отметить, что наименее понятными, искаженными оказались слова, широко распространенные в речи и кажущиеся современному студенту привычными (спонсоринг, консалтинг, коучинг), а не узкие термины (аутсорсинг, аутстаффинг), которые отвечающие либо не пытались толковать, либо толковали относительно логично,

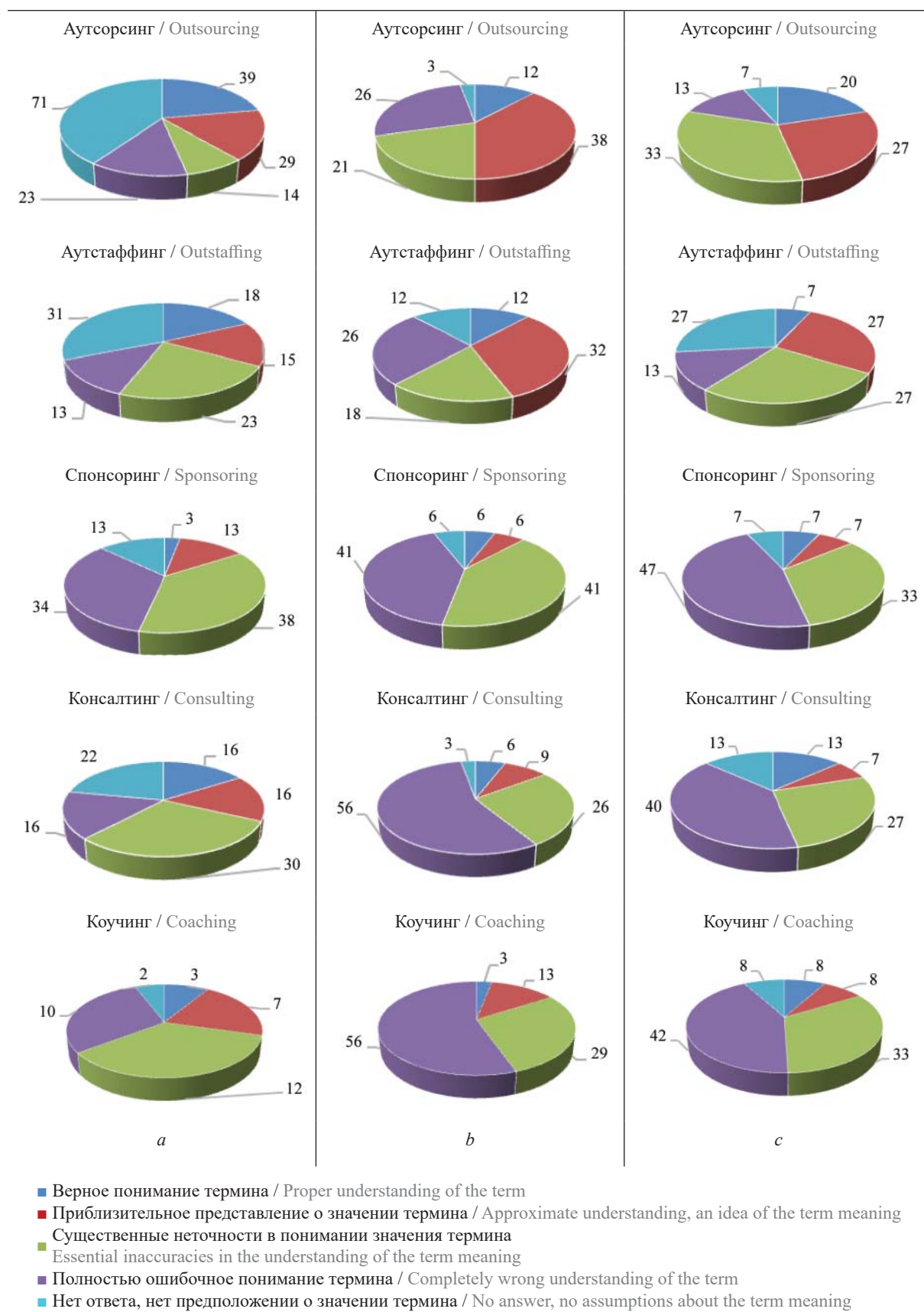


Рис. 2. Распределение ответов опрошенных студентов с точки зрения понимания значения терминов, %:
a — 2-го курса; b — 3-го курса; c — 4-го курса

Fig. 2. Breakdown of answers given by the students in terms of their understanding of the terms meanings, in %:
a — 2nd year; b — 3rd year; c — 4th year

основываясь на имеющихся знаниях профессиональных дисциплин. Это подтверждает ранее сделанное наблюдение, что заимствования часто употребляются как дань моде, без понимания смысла и используются неверно людьми, которые не отягощены ни знаниями родного и иностранного языков, ни знаниями профессиональными.

В среднем среди студентов со 2 по 4 курс термин *аутсорсинг* абсолютно не понимают или неверно понимают 49 % опрошенных, термин *аутстаффинг* — 62 %, *спонсоринг* — 86 %, *консалтинг* — 77 %, *коучинг* — 79 % (рассчитано по данным опроса как среднеарифметическая взвешенная величина).

Интересно, что результаты анкетирования мало отличались для студентов разных возрастов, обучающихся на 2–4 курсах. То есть чуть больший жизненный опыт, кругозор или этап профессиональной подготовки не помогли пониманию иноязычных терминов.

Таким образом, проведенное анкетирование подтвердило предположение авторов, что студенты владеют иноязычной терминологией не в полной мере, затрудняются объяснить значение того или иного определения и, как следствие, употребляют в речи иноязычные слова, значения которых не усвоены.

Анализируя результаты анкетирования, можно утверждать следующее:

1. Использование американизмов в управленческой деятельности избыточно, большая часть из них остается непонятными, что затрудняет понимание высказываний.
2. Во избежание непонимания и неправильной трактовки терминов следует употреблять более понятные термины — интернационализмы либо исконно русские слова, являющиеся лексическими эквивалентными заимствованиям.
3. Новые термины-американизмы, используемые в управленческой деятельности, не должны иметь различную интерпретацию, т.е. необходимо закрепить за каждым термином определенное значение на русском языке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заимствования, появившиеся за последние двадцать лет, активно используются в управленческой сфере деятельности. Пополнение профессиональной лексики заимствованиями объясняется тем, что в русском языке нет аналогичных понятий, полностью раскрывающих их значений. Процесс ассимиляции таких слов, как *аутсорсинг*, *аутстаффинг*, *диджитализация* и других, займет немало времени. Однако стоит отметить, что некоторые заимствования со временем обретают и негативную коннотацию. Это объясняется тем, что нечистые на руку «дельцы», прикрываясь новыми, непонятными словами (например, *коучинг*, *спич*), организу-

ют различные незаконные мероприятия как с точки зрения закона, так и с позиций общечеловеческой морали.

Безусловно, иноязычная лексика, прошедшая адаптационный период и нашедшая в языке свое место, используется как в общелитературном языке, так и в профессиональном [29]. Но нельзя не упомянуть и тот факт, что иноязычная лексика создает проблемы когнитивного порядка. Так, желая придать наукообразность своей речи, говорящими используется такое множество иностранных слов, что порой невозможно понять тему разговора. Применение узкопрофессиональных терминов в широкой аудитории приводит к путанице по той причине, что не все слушающие владеют английским языком, вследствие чего происходит отторжение информации, ее непринятие. Слушающий, не зная значения слов, считает, что говорящий, используя «красивые» слова, только придает «солидности» своему выступлению. Использование заимствованных профессионализмов можно считать оправданным только в том случае, если говорящий и слушающие правильно трактуют значение не только отдельных слов, но и объемных высказываний.

Необходимость в чрезмерном заимствовании в терминологии — вопрос дискуссионный. Одни полагают, что иноязычные слова пополняют лексику русского языка, другие считают, что заимствования засоряют русский язык, так как значения «новых» слов остаются не до конца ясными.

Следует признать, что зачастую в русском языке действительно нет слов-дублетов (абсолютных синонимов), общеупотребительных аналогов для иностранного термина [12]. В таких случаях заимствование целесообразно и достаточно легко ассимилируется в русском языке, соответственно, нет смысла избавляться от него в языке государственного и муниципального управления, что было учтено в поправках к Закону «О государственном языке РФ».

Однако анализ ряда популярных заимствований и результаты проведенного авторами опроса показали, что частотность американизмов, используемых в государственном и муниципальном управлении, высока, но при этом терминология остается непонятой. Использование лексических ресурсов родного языка позволит лучше раскрыть суть термина, что приведет к более уместному его применению.

Чрезмерные заимствования приводят к целому ряду негативных эффектов:

- происходит частичная потеря значения заимствованных слов, расхождение понятийного содержания в межкультурном контексте;
- частое применение иностранных слов в различных областях приводит, как правило, к их десемантизации, а употребление того или иного термина без должного понимания его специфики в отрыве от первоначального значения или просто как дань

модному увлечению таит в себе опасность скорой его дискредитации и даже незаслуженного забвения;

- чрезмерное и неправильное употребление подобных слов вне всякой логики и смысла, игнорирование литературных норм приводит к неверным интерпретациям заимствованных терминов в речи, непониманию реалий, казусам. При этом допускаются фонетические, лексико-грамматические неточности или даже ошибки;

- в ряде случаев иностранные слова используются заведомо с целью завуалировать истинный смысл высказывания, являются своеобразным способом ухода от ответа и т.п., что идет в разрез с принципами надлежащего государственного и муниципального управления;

- чрезмерное использование иноязычных профессионализмов оказывает негативное влияние на адресата, так как непонимание снижает концентрацию и внимание.

Анализ результатов анкетирования, проведенного среди студентов — будущих представителей сферы государственного и муниципального управления, подтвердил, что:

- большая часть терминов-заимствований в управленческой деятельности остается непонятыми, что затрудняет интерпретацию высказываний;

- во многих случаях следовало бы употреблять более понятный термин — интернационализмы либо исконно русские слова, являющиеся лексическими эквивалентами заимствованиям;

- термины-заимствования, использующиеся в управленческой деятельности, не должны иметь

различную интерпретацию, т.е. следует закрепить за каждым термином определенное значение на русском языке.

Принятый 01.06.2005 Федеральный закон «О государственном языке Российской Федерации» опосредованно разрешает использование иноязычной лексики, не имеющей общепотребительных аналогов в русском языке, в официальных и правовых документах, хотя редакция Закона от 28.02.2023 и сужает его возможности.

Рассматривая применение заимствований в речи государственного и муниципального управления критически, с точки зрения их целесообразности и последствий для культуры родного языка, культуры официального общения, авторы пришли к выводу, что необходимо не культивировать чрезмерное употребление «лишних» иностранных слов, а внедрять систематическое осмысление их этимологии, семантики, стилистики, специфики употребления в различных ситуациях, что приведет к осознанному и оправданному употреблению только тех заимствований, которые, придавая официальному русскому языку точность и красоту, не будут засорять его. В остальных случаях должны употребляться русскоязычные эквиваленты. Как результат, язык официальных документов и официального общения избежит неверных или двусмысленных интерпретаций, не будет вызывать негативной реакции в обществе, сможет способствовать повышению качества и эффективности государственного и муниципального управления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аристова В.М. К истории англо-русских литературных связей и заимствований // Семантические единицы в категории русского языка в диахронии. Калининград, 1997. С. 12–19.

2. Мельникова А.И. Изучение англицизмов в курсе «Современный русский язык» // Русский язык в школе. 1991. № 2. С. 95–101.

3. Strenge G. Mediated metadiscourse: print media on anglicisms in post-Soviet Russian: thesis. 2012.

4. Šukalić Đ., Rizvic-Eminovic E., Bujak A. A corpus-based study of anglicisms across different text types of online news // Deveti naučno-stručni skup Nauka i savremenost. 2022. Issue 3. Pp. 261–271.

5. Крысин Л.П. Иноязычные слова в современном русском языке. М. : Наука, 1968. 208 с.

6. Крысин Л.П. Иноязычное слово в контексте современной общественной жизни // Русский язык конца XX столетия (1985–1995). 1996. С. 142–161. EDN SIOENH.

7. Крысин Л.П. Словообразование или заимствование? // Русский язык в школе. 1997. № 6. С. 84–88. EDN OKBYGE.

8. Арефьева С.А., Десяева Н.Д. Стилистика современного русского языка. М. : Издательский центр «Академия», 2008. 272 с. EDN RRPAMD.

9. Лингвистический энциклопедический словарь / глав. ред. В.Н. Ярцева. М. : Советская энциклопедия, 1990. С. 158–159.

10. Голуб И.Б. Стилистика русского языка : учебник для вузов, 6-е изд., испр. и доп. М. : Юрайт, 2023. 484 с.

11. Лапишина В.А., Петросян С.Г. Английские заимствования в лексике кинематографа // Материалы и методы инновационных исследований и разработок : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 177–180. EDN YGNASD.

12. Адмирал А.С. Шишков — патриарх русской словесности // Язык наш — поводырь наш в рай или в ад. Издание Международного фонда

Славянской письменности и культуры. СПб. : Издательство Л.С. Яковлевой, 2001. URL: <http://slovník.narod.ru/rus/yazyk/index.html>

13. Демьянов В.Г. Иноязычная лексика в истории русского языка XI–XVII веков: проблемы морфологической адаптации. М. : Наука, 2001. 408 с.

14. Чибисова Е.Ю. Анализ русских заимствований в английском языке // Альманах современной науки и образования. 2010. № 3–2. С. 172–180. EDN OPNKBV.

15. Анохина С.В. Активные процессы современного словопроизводства. Белгород, 1999. С. 7–10.

16. Безденежных Н.Н., Зайцева С.С., Дюдякова С.В. Иноязычное общение как основа культуротворческого моделирования речевых ситуаций // Азимут научных исследований: педагогика и психология. 2016. Т. 5. № 3 (16). С. 19–22. EDN WXBVKT.

17. Брейтер М.А. Англицизмы в русском языке: история и перспективы : пособие для иностранных студентов-русистов. Владивосток : Диалог-МГУ, 1997. 156 с.

18. Новиков В.И. Словарь модных слов: языковая картина современности. М. : АСТ-Пресс, 2016. 352 с.

19. Семёнова М.Ю. Словарь англицизмов. Ростов н/Д. : Папирус, 2003. 278 с. EDN QQRLCH.

20. Щерба Л.В. Опыт общей теории лексикографии // Избранные труды по языкознанию и фонетике. 1974. 187 с.

21. Coats S. Lexicon geupdated: New German Anglicisms in a social media corpus // European Journal of

Applied Linguistics. 2019. Vol. 7. Issue 2. Pp. 255–280. DOI: 10.1515/eujal-2019-0001

22. Розенталь Д.Э. Практическая стилистика русского языка : учеб. для вузов. 5-е изд., исправл. и доп. М. : Высшая школа, 1987. 399 с.

23. Zhao Y. The word-formation potential of Anglicisms in political vocabulary // Neophilology. 2022. Issue 2. Pp. 254–260. DOI: 10.20310/2587-6953-2022-8-2-254-260

24. Сидакова Н.В. Употребление иностранных слов в русском языке: логика речи или дань моде? // Балтийский гуманитарный журнал. 2016. Т. 5. № 4 (17). С. 111–114. EDN XUVFOV.

25. Layne K., Lee J. Developing fully functional E-government: A four stage model // Government Information Quarterly. 2001. Vol. 18. Issue 2. Pp. 122–136. DOI: 10.1016/S0740-624X(01)00066-1

26. Ewurah S.K.M. The Concept of eGovernment: ICT Policy Guidelines for the Policy Makers of Ghana // Journal of Information Security. 2017. Vol. 08. Issue 02. Pp. 106–124. DOI: 10.4236/jis.2017.82008

27. Almarabeh T., Majdalawi Y., Mohammad H. Cloud computing of E-government // Communications and Network. 2016. Vol. 08. Issue 01. Pp. 1–8. DOI: 10.4236/cn.2016.81001

28. Macmillan dictionary and thesaurus: Free english dictionary online. URL: <http://www.macmillandictionary.com/>

29. Ibrahimov Ye.A. The formation of language policy from the historical point of view and its basic principles // Eurasian Journal of Philology: Science and Education. 2021. Vol. 181. Issue 1. DOI: 10.26577/EJPh.2021.v181.i1.ph11

Поступила в редакцию 19 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 8 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 8 июня 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Мери Георгиевна Даниелян** — кандидат филологических наук, доцент, заведующая кафедрой русского языка как иностранного; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 308030; DanielyanMG@mgsu.ru;

Елена Юрьевна Васильева — кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 702671, Scopus: 57192662530, ResearcherID: AAD-1693-2019, ORCID: 0000-0001-7797-1954; elena.chibisova_metr@mail.ru;

Исламбек Халикович Давлетов — кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой менеджмента; **Ташкентский архитектурно-строительный университет (ТАСИ)**; 100011, г. Ташкент, ул. Навои, д. 13, Республика Узбекистан; i.davletov68@gmail.com.

Вклад авторов:

Даниелян М.Г. — идея, сбор материала, написание статьи, научное редактирование статьи.

Васильева Е.Ю. — сбор материала, написание статьи, научное редактирование и оформление статьи.

Давлетов И.Х. — сбор материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Aristova V.M. To the history of the English-Russian literary communications and loans. *Semantic units in category of Russian in a diachrony*. Kaliningrad, 1997; 12-19. (rus.).
2. Melnikova A.I. Studying of anglicisms within "Modern Russian" course. *Russian at School*. 1991; 2:95-101. (rus.).
3. Strengé G. *Mediated metadiscourse: print media on anglicisms in post-Soviet Russian: thesis*. 2012.
4. Šukalić Đ., Rizvic-Eminovic E., Bujak A. A corpus-based study of anglicisms across different text types of online news. *Deveti naučno-stručni skup Nauka i savremenost*. 2022; 3:261-271.
5. Krysin L.P. *Foreign-language words in modern Russian*. Moscow, Nauka Publ., 1968; 208. (rus.).
6. Krysin L.P. A foreign-language word in the context of modern public life. *Russian language in the end of the XX century (1985-1995)*. 1996; 142-161. EDN SIOENH. (rus.).
7. Krysin L.P. Word formation or loan? *Russian at School*. 1997; 6:84-88. EDN OKBYGE. (rus.).
8. Arefyeva S.A., Desyaeva N.D. *Stylistics of modern Russian*. Moscow, Publishing center "Akademiy", 2008; 272. EDN RRPAMD. (rus.).
9. *Linguistic encyclopedic dictionary* / Editor-in-chief V.N. Yartseva. Moscow, Soviet Encyclopedia, 1990; 158-159. (rus.).
10. Golub I.B. *Stylistics of Russian : textbook for higher education institutions the 6th edition*. Moscow, Yurayt Publishing House, 2023; 484. (rus.).
11. Lapshina V.A., Petrosyan S.G. English loans in lexicon of cinema. *Materials and methods of innovative research and development : collection of articles of the international scientific-practical conference*. 2017; 177-180. EDN YGNASD. (rus.).
12. Admiral A.S. Shishkov is the patriarch of the Russian literature. *Our language is our guide to paradise or to hell*. Edition of the International fund of Slavic writing and culture. St. Petersburg : L.S. Yakovleva's publishing house, 2001. URL: <http://slovník.narod.ru/rus/yazyk/index.html>.
13. Demyanov V.G. *Foreign-language lexicon in the history of Russian of the 11-17th centuries: problems of morphological adaptation*. Moscow, Nauka Publ., 2001; 408. (rus.).
14. Chibisova E.Yu. Analysis of the Russian loans in English. *Almanac of Modern Science and Education*. 2010; 3-2:172-180. EDN OPNKBV. (rus.).
15. Anokhina S.V. *Active processes of a modern word-production*. Belgorod, 1999; 7-10. (rus.).
16. Bezdenzhnykh N.N., Zaitseva S.S., Dudyakova S.V. Foreign language communication as a basis for cultural modeling speech situations. *Azimuth of Scientific Research: Pedagogy and Psychology*. 2016; 5(3):19-22. EDN WXBKJT. (rus.).
17. Breyter M.A. *Anglicisms in Russian: history and prospects : textbook for foreign students specialists in Russian philology*. Vladivostok, Dialog-MGU Publ., 1997; 156. (rus.).
18. Novikov V.I. *Dictionary of fashionable words: language picture of the present*. Moscow, AST-Press, 2016; 352. (rus.).
19. Semyonova M.Yu. *Dictionary of anglicisms*. Rostov-on-Don, Papirus Publ., 2003; 278. EDN QQRLCH. (rus.).
20. Shcherba L.V. Experience of the general theory of a lexicography. *The Chosen Works on Linguistics and Phonetics*. 1974; 187. (rus.).
21. Coats S. Lexicon geupdated: New German anglicisms in a social media corpus. *European Journal of Applied Linguistics*. 2019; 7(2):255-280. DOI: 10.1515/eujal-2019-0001
22. Rosenthal D.E. *Practical stylistics of Russian : textbook for universities. The edition 5th corrected and added*. Moscow, Higher School Publ., 1987; 399. (rus.).
23. Zhao Y. The word-formation potential of anglicisms in political vocabulary. *Neophilology*. 2022; 2:254-260. DOI: 10.20310/2587-6953-2022-8-2-254-260
24. Sidakova N.V. The use of foreign words in the Russian language: the logic of speech or a tribute to fashion? *Baltic Humanitarian Journal*. 2016; 5(4): 111-114. EDN XUVFOV (rus.).
25. Layne K., Lee J. Developing fully functional E-government: A four stage model. *Government Information Quarterly*. 2001; 18(2):122-136. DOI: 10.1016/S0740-624X(01)00066-1
26. Ewurah S.K.M. The concept of eGovernment: ICT Policy Guidelines for the Policy Makers of Ghana. *Journal of Information Security*. 2017; 08(02):106-124. DOI: 10.4236/jis.2017.82008
27. Almarabeh T., Majdalawi Y., Mohammad H. Cloud computing of E-government. *Communications and Network*. 2016; 08(01):1-8. DOI: 10.4236/cn.2016.81001
28. *Macmillan Dictionary and Thesaurus: Free English Dictionary Online*. URL: <http://www.macmillandictionary.com/>
29. Ibrahimov Ye.A. The formation of language policy from the historical point of view and its basic principles. *Eurasian Journal of Philology: Science and Education*. 2021; 181(1). DOI: 10.26577/EJPh.2021.v181.i1.ph11

Received May 19, 2023.

Adopted in revised form on June 8, 2023.

Approved for publication on June 8, 2023.

B I O N O T E S: **Mary G. Danielyan** — Candidate of Philology, Associate Professor, Head of the Department of Russian as the Foreign Language; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 308030; DanielyanMG@mgsu.ru;

Elena Yu. Vasilyeva — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor 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: 702671, Scopus: 57192662530, ResearcherID: AAD-1693-2019, ORCID: 0000-0001-7797-1954; elena.chibisova_metr@mail.ru;

Islambek H. Davletov — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Management; **Tashkent University of Architecture and Construction**; 13 Navoi st., Tashkent, 100011, Republic of Uzbekistan; i.davletov68@gmail.com.

Contribution of the authors:

Mary G. Danielyan — idea, material collecting, writing of the article, scientific editing of the article.

Elena Yu. Vasilyeva — material collecting, writing of the article, scientific editing and formatting of the article.

Islambek H. Davletov — material collecting.

The authors declare no conflict of interests.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовка, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников 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 инициал*

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.

Подрисункочные 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 (a , 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.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже

известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс *Citethisforme.com*.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип Статьи

Тип статьи - научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т. п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи – на английском языке

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы 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, указы-

вают, 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 теплопереноса 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.

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.

Bionotes: **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.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

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

