

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 17 Выпуск 11/2022
Vol. 17 Issue 11/2022

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 17. Выпуск 11
2022**

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

Сквозной номер 168

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 17. Issue 11
2022**

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

«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. 23-93
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	25.11.2022.
Подписан в свет	28.11.2022.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 21,48. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 386

Знаком информационной продукции не маркируется.

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2022

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 Галишинкова, 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 Тевьеевич 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, проф., д-р инж. (технические науки, строительные материалы), Технический университет Эйндховена, Королевство Нидерландов (Голландия)

Йост Вальравен, проф., д-р инж. (технические науки, железобетонные конструкции), 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, Словакская Республика

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

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

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

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

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

Варшавский технологический университет, инженерно-строительный факультет, Республика Польша

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 техн. наук, проф., и.о. 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 техн. наук, проф., проф. каф. экономики и управления в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Левон Рафаэлович Маилин, 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-Мартиросян, д-р техн. наук, проректор, главный научный сотрудник научно-образовательного центра «Геотехника», НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Анна Александровна Дядичева

Редакторы: Татьяна Владимировна Бердникова,

Людмила Борисовна Корзухина

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Германовна Алейникова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

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

Председатель редакционного совета

Александр Романович Туснин, д-р техн. наук., доц., и.о. 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 Федеральное государственное бюджетное учреждение «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, ВРИО директора, 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 Абдулович 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 Соболь, 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, 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 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:	25.11.2022

Editor-in-Chief

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

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

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

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

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

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

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*

Editors: *Tat'yana V. Berdnikova, Lyudmila B. Korzukhina* **Layout:** *Alina G. Aleynikova*

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

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, Professor, Leading research scientist, 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

Viktar 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

Е.Ю. Зайкова, С.С. Феофанова

Зеленая инфраструктура как инструмент управления ливневыми водами 1429

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

Г.С. Нечипорук, С.С. Правдолюбова, М.О. Векилян

Влияние формообразования на поведение сетчатой оболочки в форме однополостного гиперболоида 1453

Т.А. Мацеевич, И.Ф. Андреев

**Конечно-элементная модель диффузии хлорида в предварительно напряженной
корродированной арматуре железобетонных конструкций 1462**

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А. Слейман, Д.В. Козлов

**Настройка пользовательского интерфейса для оценки стока
в бассейне реки Эль-Аси с использованием искусственного интеллекта 1471**

Н.А. Анискин, С.А. Сергеев

Численные решения задач неустановившейся фильтрации в гидротехнике 1478

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Л. Торопов

**Использование электрических котлов с иерархическим управлением нагрузкой
для поквартирного теплоснабжения 1488**

Ю.А. Рыльцева

Особенности проектных решений внутренних систем водоснабжения высотных зданий 1499

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Д.С. Мошканёв

Практические инструменты комплексной системы управления стоимостью строительства 1513

Л.И. Зигангирова, И.Х. Галиев, Р.А. Ибрагимов, Ф.Р. Шакирзянов

**Оптимизация технологических решений при устройстве
подземного пространства существующих зданий 1528**

М.В. Петроченко, П.Н. Недвига, А.А. Кукина, В.В. Шерстюк

**Классификация строительной информации в BIM с использованием
алгоритмов искусственного интеллекта 1537**

С.В. Федосов, М.О. Баканов

Совершенствование технологии получения пеностекла на основе методов сетевого моделирования 1551

В.В. Сокольников

**Проблема определений и классификации теоретических моделей организаций,
проектной подготовки и технологии строительства 1564**

Н.Н. Щепкина

Оценка рисков информационной безопасности строительных предприятий 1574

Е.Ю. Васильева

**Значение и перспективы применения инновационных материалов и технологий
в жилищном строительстве 1586**

Требования к оформлению научной статьи 1594

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

- Elena Yu. Zaykova, Sofia S. Feofanova*
Green infrastructure as a stormwater management tool 1429

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

- Gennady S. Nechiporuk, Svetlana S. Pravdolyubova, Mikhail O. Vekilyan*
The influence of shaping on the behavior of a mesh shell shaped as a one-sheeted hyperboloid 1453

- Tatyana A. Matseevich, Ilya F. Andreev*
The finite element model of chloride diffusion in pre-stressed corroded reinforcement bars of reinforced concrete structures 1462

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

- Alaa Slieman, Dmitry V. Kozlov*
Configuration of user interface for evaluation of runoff in Orontes basin using artificial intelligence. 1471
- Nikolai A. Aniskin, Stanislav A. Sergeev*
Numerical solutions to unsteady filtration problems in hydraulic engineering 1478

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

- Alexey L. Toropov*
Using electric boilers with hierarchical load control systems to supply heat to apartments 1488
- Yuliya A. Ryltseva*
Special aspects of design solutions for indoor water supply systems of high-rise buildings. 1499

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

- Dmitrii S. Moshkalev*
Practical tools of an integrated construction cost management system. 1513
- Leysan I. Zigangirova, Ilyas Kh. Galiev, Ruslan A. Ibragimov, Farid R. Shakirzyanov*
Optimization of engineering solutions used to develop the underground spaces of existing buildings 1528
- Marina V. Petrochenko, Pavel N. Nedviga, Anna A. Kukina, Valeriya V. Sherstyuk*
Classification of information models in BIM using artificial intelligence algorithms 1537
- Sergei V. Fedosov, Maksim O. Bakanov*
Using network modelling methods to improve the foam glass production technology 1551
- Vladimir V. Sokolnikov*
The problem of definitions and classification of theoretical models of construction planning, design preparation and building technology 1564
- Natalia N. Shchepkina*
Assessment of information security risks for construction enterprises. 1574
- Elena Yu. Vasilyeva*
Innovative materials and technologies in housing construction: importance and prospects 1586
- Requirements for research paper design** 1594

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);
- 2.1.7. 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);

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, plagiarisma 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 applies problems of construction and architecture are admitted to examination and publication in the main topic sections of the journal.

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

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

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

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

объявляет о возможности подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора наук на тему:
«Научно-методические основы совершенствования функционально-планировочной структуры
территории города с учетом эколого-микроклиматических особенностей».

Конкурсный отбор состоится на заседании Научно-технического совета НИУ МГСУ 20.12.2022 г. в 14.00.

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 711:556.13

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452

Зеленая инфраструктура как инструмент управления ливневыми водами

Елена Юрьевна Зайкова, София Сергеевна Феофанова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Глобальное потепление привело к значительному увеличению интенсивных медленно движущихся ливней. Поэтому во всем мире проводится политика смягчения последствий изменения климата через управление ливневыми водами на городских территориях. Рациональное управление ливневыми водами могло бы повлиять на снижение эффекта теплового острова и «остудить» города.

Материалы и методы. Проведен анализ функций зеленых насаждений в городе и на конкретном примере про-демонстрирована возможность внедрения элементов зеленой инфраструктуры, отмечены потенциальные выгоды моделирования процессов подобных решений в российских городах.

Результаты. Для широкого применения в населенных пунктах авторы рекомендуют три основные типа сооружений: биодренажная канава, биофильтрационный склон и дождевой сад, основанные на технологии биоремедиа-ции — метаболическом потенциале биологических объектов — высших растений и микроорганизмов. Целью такого «зеленого» подхода является поддержание естественного гидрологического баланса территории и деградация за-грязнений за счет использования свойств почвы и растений. Также при благоустройстве территории предлагается применять несколько вариантов ливневых систем, которые взаимодополняют друг друга и монтируются совместно из полимерных материалов, обеспечивающих лучшую пропускную способность ливневой воды. Исследования до-казывают, что при правильном анализе участка с градостроительной, инженерной и ландшафтной стороны, а также ответственном подборе растений местной флоры, биодренажные системы могут хорошо работать даже в регионах с холодным климатом, например в России.

Выводы. Действующие объекты транспортной и промышленной инфраструктуры, рассмотренные в авторском ви-дении применения гибридных моделей зеленой инфраструктуры с соответствующими расчетами по возможностям и количеству собираемой, транспортируемой и аккумулируемой дождевой и поверхностной воды, могут активно по-влиять на корректировку нормативных показателей, а самое главное — на создание узнаваемого благоустройства с включением природных биотопов разной структуры и гидрофильтрации в целях комфортной и устойчивой среды проживания в российских городах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: зеленая инфраструктура, серая инфраструктура, биофильтрационный склон, биодренажная канава, гибридный дождевой сад, проницаемые покрытия, управление ливневыми водами

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С. Зеленая инфраструктура как инструмент управления ливне-выми водами // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1429–1452. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452

Автор, ответственный за переписку: София Сергеевна Феофанова, sonyafeofanova@mail.ru.

Green infrastructure as a stormwater management tool

Elena Yu. Zaykova, Sofia S. Feofanova

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

ABSTRACT

Introduction. Global warming has intensified slow moving rainfalls. Climate change mitigation and adaptation policies are implemented around the world through stormwater management in urban areas. Rational stormwater management could affect the reduction in the “heat island” effect and “cool” the cities.

Materials and methods. The authors analyzed the functions of green spaces in a city, demonstrated the feasibility of introducing elements of green infrastructure, and emphasized the potential benefits of simulating the processes that demonstrate such solutions in our cities.

Results. The authors recommend the following three principal types of structures that can be widely used in urban areas. They are a biological drainage ditch, a biological filtration slope and a rain garden, each employing the bioremediation technology, or the metabolic potential of biological objects, such as higher plants and microorganisms. The purpose of such a “green” approach is to maintain the natural hydrological balance in a territory and ensure the degradation of pollutions by taking advantage of soil and plant properties. Also, when the territory is landscaped, the authors propose to use several

options of storm water systems that complement each other and are mounted together from polymer materials to ensure a better stormwater throughput capacity.

Conclusions. The research, conducted by the authors, has proven that proper urban planning, engineering and landscape analysis of an area, coupled with a scrupulous selection of local plants, ensure the operation of biological drainage systems even in cold climates, similar to Russia.

KEYWORDS: green infrastructure, gray infrastructure, biological filtration slope, biological drainage ditch, hybrid rain garden, permeable coatings, stormwater management

FOR CITATION: Zaykova E.Yu., Feofanova S.S. Green infrastructure as a stormwater management tool. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1429-1452. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452 (rus.).

Corresponding author: Sofiya S. Feofanova, sonyafeofanova@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В отчете за 2018 г. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) сообщила об увеличении количества атмосферных осадков¹ более чем на 10 %. ВМО также прогнозирует их увеличение почти до 50 % на период 2020–2026 гг. Экстремальные погодные явления становятся новой нормой и несут на себе отпечаток антропогенного изменения климата, считает Генеральный секретарь ВМО Петтери Таалас².

Москва входит в топ-3 городов с максимальным повышением температуры. За последние 50 лет произошло увеличение на 1 °C³. Наибольшие повышения также отмечаются в Тегеране (+2,33 °C) и Калькутте (+2,6 °C). Разница в наблюдаемых тенденциях потепления между городами и их окрестностями частично объясняется урбанизацией: геометрия города снижает интенсивность природной вентиляции территорий, промышленность и другая антропогенная деятельность повышают общую температуру города. В то время как менее плотно застроенные территории с большим количеством зеленых насаждений и водными объектами не имеют эффекта городского теплового острова.

По оценкам ученых [1], при потеплении на один градус по Цельсию содержание влаги в атмосфере увеличивается на 7 %. Таким образом в природе консервируется избыточная тепловая энергия. Изменение климата привело к значительному увеличению интенсивных медленно движущихся ливней. Под руководством доктора Х. Фаулер из инженерной школы университета Ньюкасла исследователи проанализировали климатические модели ВМО [2]. Они обнаружили, что более медленное движение штормов приводит к возрастанию количества осадков, которые увеличивают риск наводнений сверх ожидаемого, на основе предыдущих исследований. Такие гидрометеорологи-

ческие явления признаются опасными⁴ из-за своей продолжительности и интенсивности, представляющие угрозу безопасности людей, а также наносящие значительный ущерб социальной, инженерной и транспортной инфраструктурам.

Представленные выводы ученых повлияли на политику смягчения последствий изменения климата и адаптации к ним во всем мире. Авторами проведен поиск патентов с помощью ключевых слов и словосочетаний: зеленая инфраструктура, управление ливневыми водами, экосистемные услуги, green infrastructure, urban stormwater management, ecosystem services.

По времени регистрации патентов получился небольшой разброс: все они зарегистрированы в течение последних восьми лет, начиная с 2014 г. и до настоящего времени. По результатам можно предположить, что данная тема поиска очень актуальна в Южной Корее, Китае, США и РФ (рис. 1). Непосредственно по теме исследования было обнаружено несколько патентов. Все остальные опосредованно связаны с управлением ливневыми водами в городском ландшафте. В основном найденные патенты решают технические задачи, такие как: быстрый отвод ливневых вод с городских территорий, очистка дождевой воды различными способами, определение типов и оценка зеленой инфраструктуры города.

Зеленым насаждениям всегда отводилась важная роль на улицах, но прежде их использовали только для создания эстетического окружения. Сейчас зеленая инфраструктура рассматривается как фактор обеспечения устойчивого развития города [3] со своими функциями (табл. 1).

Площади зеленых насаждений удерживают ливневую воду, принимают дополнительный сток с непроницаемых поверхностей и обменивают всю полученную воду на углекислый газ из воздуха. Такой обмен называется транспирацией.

¹ 2018 Annual Report WMO for the Twenty-first Century. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=6264

² Доклад Всемирной метеорологической организации о климатической ситуации в мире. 2021. URL: <https://public.wmo.int/ru/media/пресс-релизы/состояние-климата-в-2021-году>

³ Sixth assessment report Regional fact sheet — Urban Areas. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/factsheets/IPCC_AR6_WGI_Regional_Fact_Sheet_Urban_areas.pdf

⁴ О гидрометеорологической службе : Федеральный закон от 19.07.1998 № 113-ФЗ (последняя редакция). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901713128>

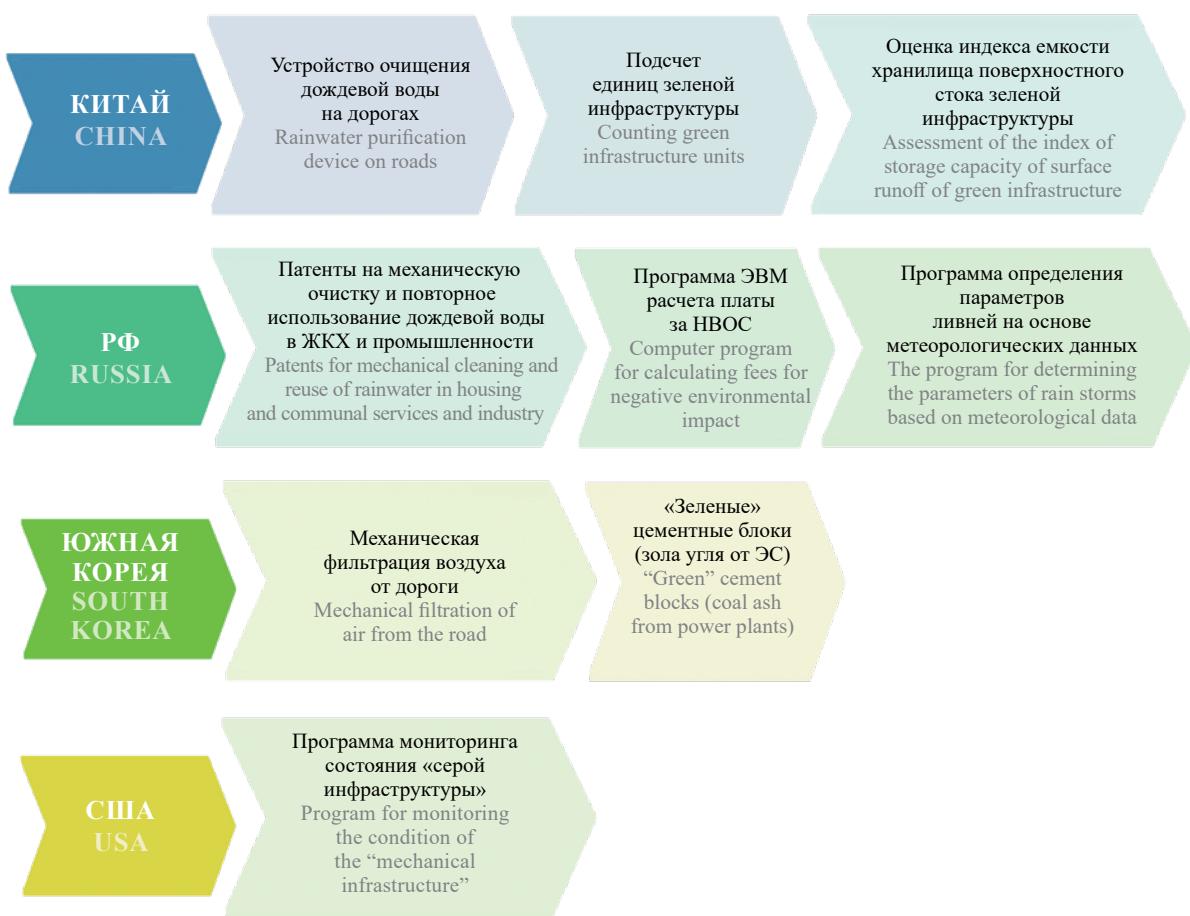


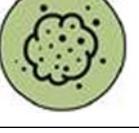
Рис. 1. Патентно-информационный анализ общемирового опыта в использовании зеленой инфраструктуры (рисунок авторов)

Fig. 1. Patent and information analysis of global experience in the use of green infrastructure (authors' scheme)

Табл. 1. Функции зеленых насаждений в городе

Table 1. Functions of green spaces in a city

Функция Function	Описание Description	Обозначение Symbol
Социальная Social	Защита от перегрева солнечными лучами и регулирование температуры в городе [4] Protection from overheating from sunlight and temperature regulation in the city [4]	
	Обеспечение безопасности движения пешеходов, создание защитной буферной зоны от транспортного потока [5] Ensuring pedestrian traffic safety, creating a protective buffer zone from car traffic [5]	
	Защита от чрезмерного шума [6] Protection against excessive noise [6]	

Функция Function	Описание Description	Обозначение Symbol	
Социальная Social	Психологическая Psychological	Придание современной застройке понятного человеческого масштаба и повышение идентичности места [7, 8] Giving a modern housing an understandable human scale and raising the identity of the place [7, 8]	
	Визуальная Visual	Помощь при ориентировании в городе и указание направлений движения пешеходов [4] Help with orientation in the city and indication of pedestrian directions [4]	
Экономическая Economic	Стимулирующая Promotional	Совершенствование туристической и рекреационной инфраструктуры [9, 10] Improvement of tourist and recreational infrastructure [9, 10]	
	Ценообразующая Pricing	Увеличение ценности земли [4] Increasing the cost of land [4]	
Экологическая Environmental	Санитарно-гигиеническая Sanitary and hygienic	Долгосрочность использования зеленых насаждений снижает затраты на посадку новых растений [11, 12] The long-term use of green spaces reduces the cost of planting new plants [11, 12]	
		Сокращение поступления пыли, газов, CO ₂ , улучшение микроклимата [13, 14] Reducing the ingress of dust, gases, CO ₂ , improving the microclimate [13, 14]	
	Биодренажная Biological drainage	Улучшение качества воды [15] Improving water quality [15]	
		Отведение ливневых вод и повторное использование в естественной среде, фильтрация осадков через почву [16, 17] Drainage of stormwater and reuse in the natural environment, filtration of precipitation through the soil [16, 17]	
		Уменьшение риска наводнений [18, 19] Flood risk reduction [18, 19]	

Данные по дневному расходу воды на транспирацию целым древесным растением дают возможность рекомендовать деревья и кустарники, отличающиеся по количеству дневного расходования воды на транспирацию, для рациональной посадки на участках с различной водообеспеченностью, что благополучно скажется на качестве среды жизнедеятельности человека.

Международный опыт развитых стран показывает, что градостроительная сфера аккумулирует географические, технологические, социальные и политические процессы, позволяя тем самым обеспечивать синергетический эффект от их взаимодействия, что наиболее благоприятно влияет на устойчивое развитие городской среды и рациональное природопользование. Однако устойчивое развитие городских территорий под угрозой из-за последствий изменения климата.

Несмотря на большое количество исследований в этой области, в России не происходит значительных изменений в адаптации городской среды к ливням и жаре. Существующие природные и озелененные территории в условиях города имеют меньшую площадь по сравнению с застроенной территорией⁵, а при проведении благоустройства в городах России элементы зеленой инфраструктуры и открытого дренажа не применяются, так как это не предусмотрено в нормативных документах любого уровня. Аномальная жара за последние годы негативно повлияла на степень тяжести течения заболевания коронавирусом, его последствий и привела к обострению в первую очередь заболеваний сердечно-сосудистой системы. Поэтому тема устойчивой природы в городе вне зависимости от климатических рисков с новым социокультурным сценарием в шаговой доступности от жилья остается актуальной как никогда. А управление урбанизацией достигается на современном этапе развития мировой градостроительной науки и практики за счет использования новых возможностей в инженерной подготовке городской территории. К ней, в том числе, относятся системы открытого дренажа для поддержания разных типов зеленых насаждений [20].

Сегодня «зеленые» технологии методом минимального воздействия на окружающую среду [21] внедряются во всю цепочку жизнедеятельности города для решения задач по устойчивому развитию современного и будущего общества. Экологическая эффективность предполагает рациональное природопользование и обеспечение высокого качества жизни в городе.

В настоящем исследовании предлагается изучить отечественный и зарубежный опыт применения зеленой инфраструктуры (далее — ЗИФ) и рассмотреть новые возможности в адаптации международных данных к нашим социальным, экономическим и экологическим условиям для необходимых изменений в нормативных документах по предложенной методологии исследования и улучшения качества городской среды в проектной практике. Рациональное управление ливневыми водами могло бы повлиять на снижение эффекта теплового острова и «остудить» города, например, дождевыми садами, технологические решения и локация которых будут представлены далее. Авторы планируют провести анализ функций зеленых насаждений в городе и на конкретном примере продемонстрировать возможность внедрения элементов ЗИФ, а также отметить потенциальные выгоды моделирования процессов подобных решений в российских городах. Таким образом, необходимость определения вектора развития «зеленой инфраструктуры», ее роли и места, как системы управления озелененными территориями, обусловила актуальность темы данной статьи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим карту аномалий общего количества осадков с января по сентябрь 2020 г., составленную ВМО⁶ (рис. 2). Синий цвет указывает на большее количество осадков по сравнению с многолетними средними значениями. В Москве с января по сентябрь 2020 г. в среднем выпало 30 мм осадков ежемесячно. Это превышает норму на 50–70 %.

Лето 2020 г. в Москве оказалось самым дождливым за последние пять лет (рис. 3). По результатам аналитики подтоплений и скоплений воды, проведенной за последние годы в Москве, был установлен перечень из 119 первоочередных проблемных адресов. В основном это участки на улично-дорожной сети, в меньшей степени — дворовые территории⁷. Чаще всего причины скопления воды связаны с отсутствием водосточной сети или недостаточной пропускной способностью существующей.

Для решения этих проблем власти Москвы совместно с сетевыми компаниями (АО «Мосводоканал», АО «Мосгаз», ПАО «Мосэнерго» и др.) годами модернизируют инфраструктуру водоотведения. В 2021 г. было обновлено 33,2 км водосточных сетей, а на 2022 г. запланировано строительство и реконструкция 20,5 км сетей водостока⁸. Преобладающим видом капитального ремонта водосточной

⁵ Интерактивная карта «Стройки Москвы». 2022. URL: <https://stroi.mos.ru/construction>

⁶ Карта аномалий общего количества осадков с января по сентябрь 2021 года относительно базового периода 1951–2000 годов. 2021. URL: 3fs-public.ckeditor/files/pr_7.png?3_ifPzSsJ73TvA_WnYofjm1cmjc1DboI

⁷ Ииханян К. Для мониторинга ливневки используем роботов. URL: <https://www.mos.ru/news/item/23943073/>

⁸ Заседание Президиума Правительства Москвы по развитию коммунально-инженерной инфраструктуры и энергосбережения. URL: <https://www.mos.ru/mayor/themes/5299/8084050/>

Аномалии осадков, 2020, январь–сентябрь, мм
Precipitation anomalies, January–September 2020, mm

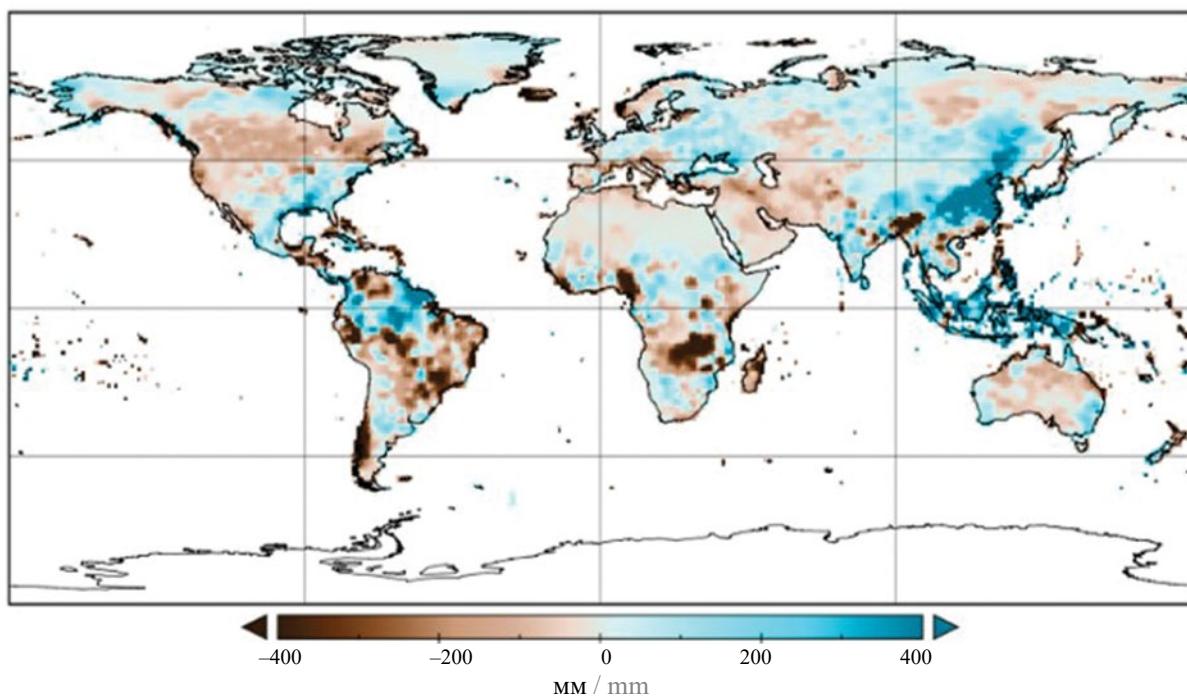


Рис. 2. Карта аномалий общего количества осадков с января по сентябрь 2020 г. относительно базового периода 1951–2000 гг. в мире по данным ВМО

Fig. 2. Map of anomalies in the total precipitation from January to September 2020 relative to the base period of 1951–2000 in the world according to WMO

сети стала санация — бесструнный метод ремонта трубопроводов. В результате снижение износа сетей коллекторного хозяйства составило восемь процентов — с 25 до 17 %. Таким образом, количество проблемных мест по скоплению воды в Москве сократилось до 43 адресов в 2022 г.

Один из этих оставшихся проблемных адресов — перекресток Ленинского пр-та с улицами Лобачевского и Обручева. Летом 2021 г. в Москве на части Ленинского пр-та проводилось благоустройство. Однако изменения не затронули инженерные коммуникации и дополнительные парковочные места для автомобилей, за счет которых в мировой градостроительной практике управляют ливневыми водами. Именно это условие стало основополагающим при выборе места для выполнения исследования.

По данным экологической карты-рейтинга районов Москвы⁹ рассматриваемый перекресток находится в благоприятной экологической зоне (рис. 4).

С правой стороны от Ленинского пр-та по направлению к Московской кольцевой автомобильной дороге (МКАД) располагаются овраг и сосновый бор, по центру — разделительная полоса и р. Самородинка, а с левой стороны — пруд Запятая и Юго-Западный лесопарк. Эти природные и озелененные территории являются местами потен-

циального размещения элементов зеленой инфраструктуры.

На выбранной территории не происходит сбросов в водные объекты г. Москвы. Территория находится в зоне периодического подтопления грунтовыми водами.

Перекресток Ленинского пр-та и начала ул. Обручева стал одним из масштабно реконструируемых в 2021 г. в ходе благоустройства районов Обручевский и Проспект Вернадского, существенные изменения показаны желтым цветом на рис. 5, 6. Площадь перекрестка увеличилась на 25 % по сравнению с 2014 г. Изменилась схема работы светофоров, что снизило скопление автотранспорта на перекрестке.

Проезжую часть Ленинского пр-та модернизировали — обновили дорожное полотно, нанесли новую разметку, добавили полосы для общественного транспорта и на левые повороты за счет уменьшения ширины полос движения транспорта и зеленых насаждений, а также создали островки безопасности для пешеходов. Озеленение городских территорий находится на средне-высоком уровне и составляет более 50 %, будучи стабильным на протяжении последних десяти лет [22].

По проектным решениям и натурным обследованиям выяснилось, что разделительная полоса с растительностью находится выше уровня дороги,

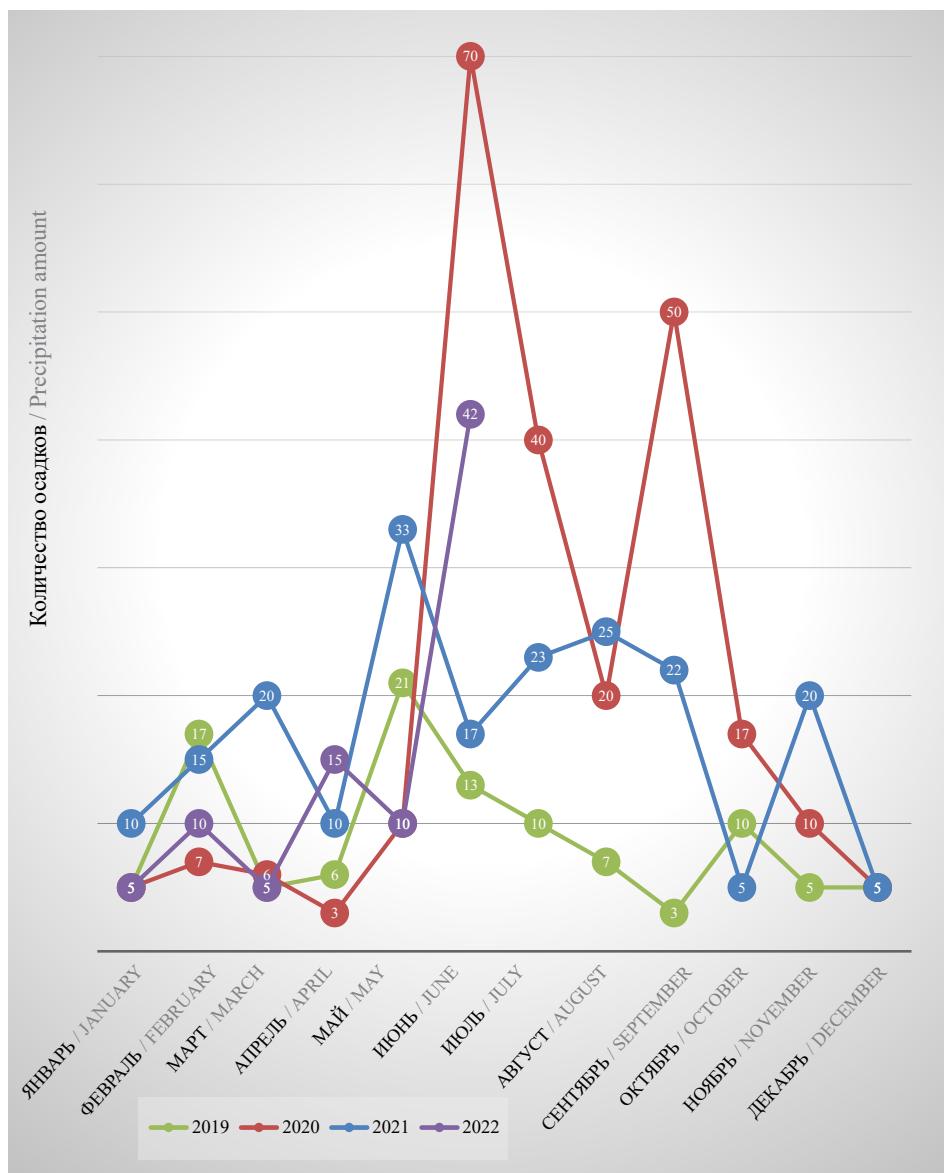


Рис. 3. Диаграмма среднего ежемесячного количества осадков, мм, в Москве 2019–2022 гг. (рисунок авторов)

Fig. 3. Average monthly precipitation diagram, mm, in Moscow 2019–2022 (authors' scheme)

а это решение препятствует сбору дождевой воды на участках зеленых насаждений, так как нет организованного водостока. На рассматриваемом перекрестке задействовано около 90 % непроницаемых территорий, из-за чего водные потоки не аккумулируются на участках зеленых насаждений, а уходят в сток ливневой канализации.

В ходе натурного обследования обращено внимание на то, что провода, которые портили эстетический вид, в процессе благоустройства убрали под землю в специальные трубы. К сожалению, расположение подземных инженерных коммуникаций точно неизвестно, что также может затруднить внедрение элементов зеленой инфраструктуры в эксплуатируемые объекты линейной структуры в городе.

В настоящее время в почвенном покрове Москвы имеют большое распространение урбанизмы и это не случайно. Это почвы с неправильным

строением профиля, несогласованным залеганием горизонтов, присутствием антропогенных горизонтов с высокой загрязненностью тяжелыми металлами и органическими веществами, строительными и бытовыми отбросами. Толщина антропогенно-преобразованного покрова составляет от пары сантиметров до одного и более метра. Подобная структура почвенных слоев и ее состав окажет негативное влияние на состояние устойчивости интегрируемых зеленых компонентов и потребует научного поиска в решении этой проблемы инженерными средствами.

На основе фотофиксации был проведен SWOT-анализ (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats-analysis) территории исследования (табл. 2).

Исследуемая территория относится к типу территорий с малой плотностью застройки. По карте рельефа перекресток находится в самых



Рис. 4. Экологическая карта-рейтинг районов Москвы (рисунок авторов)

Fig. 4. Ecological rating map of Moscow districts (authors' scheme)

низких точках рельефа местности, что означает частое скопление ливневых потоков на проезжей части, так как существующие элементы серой инфраструктуры (СИФ) не справляются с нагрузкой. Место поперечного разреза дорожного полотна было выбрано в наиболее характерной части перекрестка, где наблюдаются максимальные ливневые потоки с четырех направлений проезжей части (рис. 7).

Авторами планируется изучить механический и биологический способы сбора и очистки загрязненного ливневого стока, определить наиболее эффективные биоремедиационные технологии и способы их рационального размещения на выбранной территории в городской среде, увязать их с резервами участков в контуре Ленинского пр-та и зеленой разделительной полосой в его структуре, используя элементы зеленой инфраструктуры.

Из вышеизложенного можно сделать первые выводы о плюсах и минусах выбранной территории, а также о перспективах ее развития. В настоящее время на исследуемой территории газон расположен выше уровня тротуара (рис. 6), водоотведение осуществляется при помощи городской системы стока и направляется прямо в городскую канализационную сеть. Такой подход имеет недостатки:

- ливневая канализация чаще всего не может справиться с ливневыми потоками, особенно при сильном ливне, так как большая часть городских коллекторов построена в 1950-х годах;
- износ городских коллекторов превышает 40 %. Ремонт существующей системы СИФ очень дорогой, а строительство новой экономически невыгодно. Таким образом, темпы реконструкции московской системы водоотведения отстают от общемировых на 10 лет;



Рис. 5. Фото со спутника 2014 г.

Fig. 5. Satellite photos made in 2014



Рис. 6. Фото со спутника 2021 г.

Fig. 6. Satellite photos made in 2021

Табл. 2. SWOT-анализ выбранной территории

Table 2. SWOT analysis of the selected area

Среда Environment	Положительные стороны Positive aspects	Отрицательные стороны Negative aspects
Внутренняя Internal factors	<p>Ширина Ленинского пр-та 57 м. Наличие пешеходных и транспортных потоков. Наличие озелененных полос. Рельеф территории позволяет устроить многочисленный поверхностный сток</p> <p>Leninsky Prospekt is 57 meters wide. The presence of pedestrian and car traffic flows. The presence of green lanes. The relief of the territory allows to arrange multiple surface runoff</p>	<p>Наблюдается перегруженность системы отведения ливневых вод. При проектировании для стока воды не был учтен естественный рельеф. Непонятное расположение подземных инженерных коммуникаций. Современное благоустройство не отвечает международным стандартам</p> <p>Overloading of the stormwater drainage system. The natural relief was not taken into account for designing water runoff. Unclear location of underground utilities. Modern landscaping does not meet international standards</p>
Внешняя External factors	<p>Влажный континентальный климат. Механическая фильтрация сточных вод.</p> <p>Существует запас места для размещения зеленой инфраструктуры</p> <p>Humid continental climate. Mechanical filtration of wastewater. There is a reserve of space for the placement of green infrastructure</p>	<p>Часто выпадает большое количество осадков. Отсутствие проницаемых покрытий. Строительство новых километров ливневой канализации и дополнительных очистных сооружений экономически невыгодно</p> <p>There is often a large amount of precipitation. No permeable coatings. The building of new kilometers of storm sewers and additional sewage processing facilities is economically unprofitable</p>

- во многих местах нарушена геометрия улиц, вода зачастую не может стекать естественным образом, а поверхностей естественного дренажа, т.е. парков и газонов, недостаточно;
- после обновления дорожного покрытия ливневые решетки оказываются закатанными в асфальт или находятся на возвышении, что препятствует нормальному водоотводу;
- потоки воды намывают множество разнообразного мусора, что снижает эффективность системы;
- сквозь ливневую канализацию в открытые водоемы просачиваются загрязняющие вещества (ЗВ)

(тяжелые металлы, нефтепродукты и т.д.), а механическая фильтрация ливневых стоков не налажена.

В международной и отечественной практике для уменьшения количества ЗВ и стоков с автодорог непосредственно на проезжей части применяют сбор ливневых вод через водосборные лотки и предбordюрные углубления для дальнейшего отвода на очистные сооружения. Стоки скапливаются в локальных очистных сооружениях (ЛОС), очищаются от примесей и могут быть повторно использованы без вреда окружающей среде. Такой метод с применением СИФ называют традиционным (рис. 8).



Рис. 7. Карта и разрез исследуемого перекрестка (рисунок авторов)

Fig. 7. Map and section of the studied crossroad (authors' scheme)

В последнее время все чаще используются практики, основанные на принципах минимального воздействия на окружающую среду с помощью элементов зеленой инфраструктуры. Это экологически обоснованные подходы к управлению ливневыми стоками, когда предпочтение отдается управлению осадками на месте. Целью такого подхода является поддержание естественного гидрологического баланса территории и деградация загрязнений за счет использования свойств почвы и растений. Такие системы для очистки поверхностных стоков с автомобильных дорог должны отвечать требова-

ниям экологичности и эффективности при строительстве и применении. Авторами предлагается теоретический подход к сопоставлению теоретических и практических данных, на основе чего были получены сравнительные характеристики требований к ЗИФ способу (табл. 3).

Такими авторами, как Ю.В. Евстигнеева, Ю.В. Трофименко, Н.А. Евстигнеева, установлено, что выявленным требованиям наиболее полно отвечают ЛОС, в которых использованы технологии биоремедиации, основанные на метаболическом потенциале биологических объектов — высших

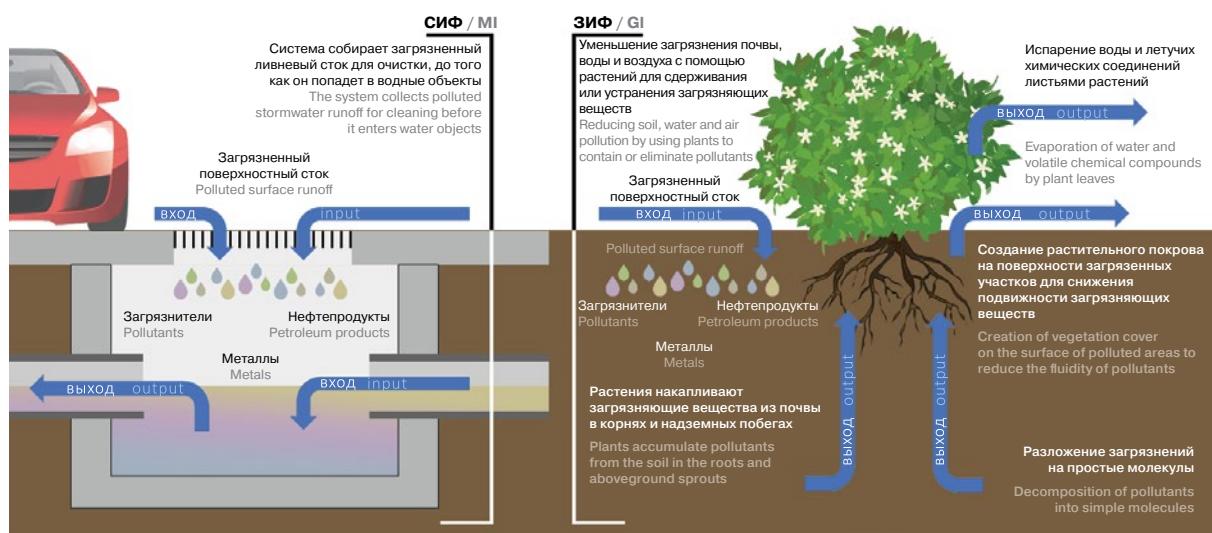
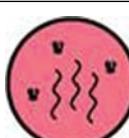


Рис. 8. Механический и биологический способы сбора и очистки загрязненного ливневого стока (рисунок авторов)

Fig. 8. MI or mechanical infrastructure method and GI, or green infrastructure method of collecting and cleaning polluted stormwater runoff (authors' scheme)

Табл. 3. Требования эффективности и экологичности ЛОС ЗИФ способа

Table 3. Requirements for the effectiveness and environmental friendliness of local purification facilities within the GI-method

Требования эффективности Efficiency requirements	Требования экологичности Environmental requirements
Достаточное количество свободных площадей для размещения Sufficient amount of free space for placement	
	Экологичность строительства и эксплуатации Environmental friendliness of construction and operation
Сбор ливневых вод с автодорог через водосборные лотки и предбordюрные углубления для дальнейшего отвода на очистные сооружения Collecting of stormwater from highways through catchment trays and pre-bordering depressions for further diversion to treatment facilities	
	Отсутствие застойной воды в зарослях Lack of stagnant water in the thickets
Высокая эффективность очистки стоков в теплый и холодный периоды года High efficiency of sewage purification in warm and cold periods of the year	
	Отсутствие неприятных запахов и бурного развития насекомых Lack of unpleasant odors and rapid growth of insects
Простота содержания сооружения, не требующая высокой квалификации обслуживающего персонала Simplicity of the maintenance of the structure, which does not require highly qualified maintenance personnel	
	Необходима регулярная механическая очистка от мусора Regular mechanical cleaning of debris is necessary
Экономичность (низкая стоимость) строительства и эксплуатации Cost-effectiveness (low cost) construction and operation	
	Контроль за употреблением противогололедных реагентов Control over the use of deicing reagents

растений и микроорганизмов [23]. Для населенных пунктов могут быть рекомендованы три ключевых типа сооружений: биодренажная канава, биофильтрационный склон и дождевой сад, используемые для водоотвода и очистки поверхностных стоков с улично-дорожной сети (табл. 4).

Рассмотрим каждое сооружение подробнее.

Биофильтрационный склон представляет собой наклонный участок территории с растительностью (рис. 9, а). Биофильтрационный склон отличается от канала тем, что не имеет русла, а очищаемая вода движется в тонкослойном режиме. Работа фильтрационного склона основана на фильтровании взвешенных частиц при движении через растительность, а также биологическом поглощении ЗВ растениями и микроорганизмами почвы. Биофильтрационные склоны могут быть засажены как специально подобранный, так и дикорастущей растительностью, а также кустарником и деревьями.

По таблице эффективности биофильтрационные склоны соответствуют предварительному этапу очистки поверхностного стока и могут ис-

пользоваться рядом с парковочными площадками и небольшими жилыми территориями.

Биодренажные канавы — неглубокие искусственные низменности, покрытые растительностью, которые служат для накопления, очистки и фильтрации дождевых стоков (рис. 9, б). Устраиваются вдоль тротуаров, а также рядом с зонами озеленения недалеко от проезжей части. По краям канав необходимо устанавливать водонепроницаемые покрытия для предотвращения загрязнения прилегающих почв и грунтовых вод. Большой продольный уклон биодренажных канав составляет 4:1 или 3:1. В условиях крутого рельефа для предотвращения эрозии следует применять террасирование канав со ступенчатым уклоном. В таких канавах используются болотные и иные влаголюбивые растения. Процент примеси глины в почве не должен превышать 5 %. Рекомендуемое расстояние от зеркала грунтовых вод до биоремедиационной почвы — более 1,5 м. Биодренаж является самым эффективным способом естественного замедления и очистки стока, позволяющим одновременно подпитывать грунтовые воды [24].

Табл. 4. Эффективность очистки на ЛОС с использованием биоремедиационных технологий

Table 4. Efficiency of local treatment facilities using bioremediation technologies

Сооружение Construction	Эффективность удаления загрязняющих веществ и микроорганизмов Efficiency of removing pollutants and microorganisms					
	Взвешенные вещества Suspended substances	Биогенные элементы Biogenic elements	Взвешенные вещества Suspended substances	Нефтепродукты Petroleum products	Взвешенные вещества Suspended substances	Бактерии Bacteria
Биофильтрационные склоны Biofiltration slopes	◊	○	◊	◊	◊	○
Биодренажные канавы Biological drainage ditches	◊	○	◊	◊	◊	○
Дождевые сады Rain gardens	●	◊	●	●	●	●

Примечание: ○ — низкая эффективность (10–40 %); ◊ — средняя эффективность (40–70 %); ● — высокая эффективность (70–100 %).

Note: where ○ — low efficiency (10–40 %); ◊ — medium efficiency (40–70 %); ● — high efficiency (70–100 %).

Американский и немецкий опыт [25] использования биодренажей показывает, что сбор и отвод дождевой воды в грунт через специальные устройства имеет ряд возможностей, положительно воздействующих на городскую среду: формирование благоприятного микроклимата на селитебных территориях, уменьшение поверхностного пылеобразования, транзит в почву дополнительной влаги, необходимой для питания растений, а также снижение нагрузки на канализационную сеть.

Дождевой сад — один из методов управления городскими ливневыми стоками, который дает возможность решать проблемы затопления территорий, а также загрязнения дождевых потоков (рис. 9, с). Технология дождевых садов основана на принципе имитирования естественных природных процессов накопления и испарения воды. Представляет собой пониженную область в ландшафте, где собирается дождевая вода с крыш, дорог или улиц, и позволяет воде впитаться в землю. Это недорогой способ снижения объема ливневого стока и улучшения качества ливневых вод, поскольку сады эффективно поглощают и уменьшают количество ЗВ. Они естественным образом абсорбируют дождевую воду, поглощая на 30–40 % больше стоковых вод, чем типичный газон. Такая технология очень популярна во Франции, США, Великобритании, Австралии и Канаде, а также в северных странах — Норвегии, Швеции, Финляндии [26].

Проницаемые покрытия — важное дополнение к биоремедиационным технологиям. Такое монолитное позволяет осадкам вертикально проходить через твердые поверхности, что уменьшает ливневый сток, улучшает качество воды за счет фильтра-

ции ЗВ в подповерхностных слоях и способствует восстановлению естественного гидрологического баланса на территории за счет пополнения запасов грунтовых вод.

Проницаемые поверхности дорожного покрытия обычно включают проницаемый бетон, пористый асфальт и брускатку [27]. Проницаемые поверхности дорожного покрытия изготавливаются либо из пористого материала, который позволяет ливневой воде проходить через него, либо из непористых блоков, расположенных так, чтобы вода имела свободную миграцию между ними в усиленных швах. В некоторых конструкциях проницаемое покрытие состоит из нескольких подземных слоев почвы, гравия и песка для увеличения емкости и максимальной скорости инфильтрации (рис. 9, д). Фильтр удаляет отложения и другие загрязнители из поверхностного стока. Время от времени такие системы необходимо очищать во избежание заиливания.

Песок нельзя использовать для борьбы со снегом и льдом на проницаемых поверхностях, поскольку он закупоривает поры и снижает пропускную способность. Затраты на обслуживание в зимний период снижаются за счет сохранения соли в самом дорожном покрытии. Это также снижает количество ливневых стоков, загрязненных хлоридами солей. Стоимость водопроницаемого покрытия в два-три раза выше стоимости обычного асфальтового покрытия. Однако использование проницаемой дорожной одежды может снизить затраты на установку большего количества ЛОС «серой инфраструктуры» для ливневых вод, и эту экономию следует учитывать при любом анализе затрат.

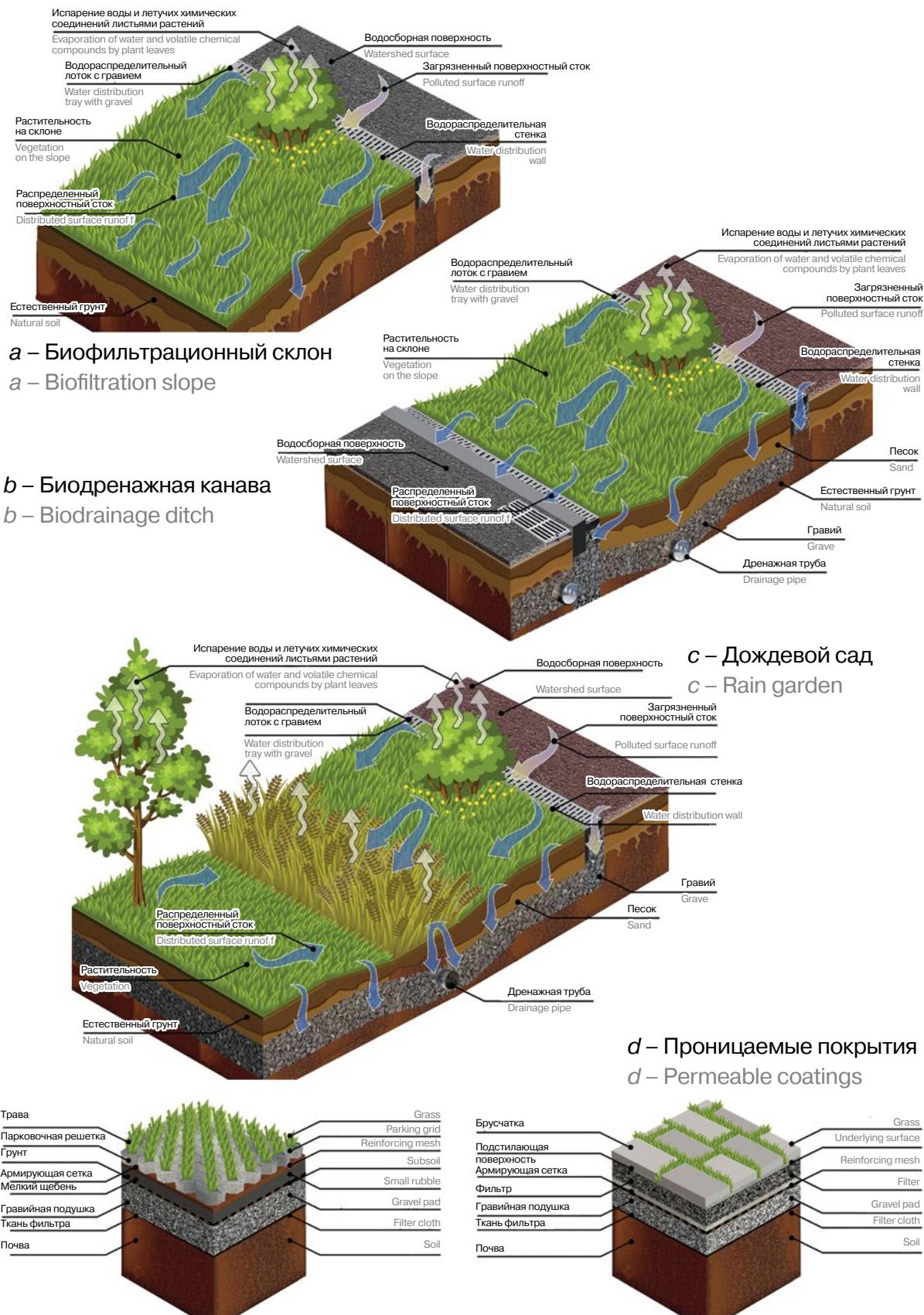


Рис. 9. Схема биофильтрационного склона (а); биодренажной канавы (б); дождевого сада (в); устройства проницаемых покрытий (г) (рисунок авторов)

Fig. 9. The schematic of the biological filtration slope (a); the biological drainage ditch (b); the rain garden (c); permeable coatings (d) (authors' scheme)

Проницаемое покрытие обычно применяется на дорогах, тропах и стоянках, где движутся легкие транспортные средства, а также тротуарах и проездах в жилых кварталах. Проницаемые покрытия предназначены для замены непроницаемых зон, а не для отвода ливневых вод с других непроницаемых поверхностей. Использование этого метода должно быть частью общей системы управления ливневыми стоками и не заменять другие методы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проницаемые покрытия тротуаров и парковок необходимы в городе (табл. 5). Деревья, окруженные такими поверхностями, получают больший объем воздуха и воды, чем в непроницаемых материалах. Применение подобных «зеленых» технологий способствует не только рациональному использованию сточных вод, но и оздоровлению окружающей среды за счет как можно большего количества растений.

Как видно из табл. 5, при благоустройстве территории авторами предлагается использовать несколько вариантов ливневых систем, что обеспечит

комплексную защиту строений и открытых территорий от излишков воды. Линейно-поверхностный дренаж (line-rain) и точечно-углубленный дренаж (point-storm) предназначены для решения различных задач (рис. 10).

Первый тип дренажа нужен для отвода излишков атмосферных осадков, второй — для большого объема ливневых вод. Две эти системы не исключают друг друга, а взаимодополняют и монтируются совместно из полимерных материалов. Пропускная способность трубопроводов из полимерных материалов при прочих равных выше пропускной способности труб из других материалов (бетон, сталь и т.д.) в связи с меньшей шероховатостью [28]. При их проектировании необходимо предусматривать дополнительную нагрузку на коллектор.

Авторами предлагается выполнить покрытие тротуара из проницаемых материалов и применить уклон 1 % для отведения ливневых вод в проектируемые дренажные системы. Line-rain дренаж по всей границе проезжей части и зеленых насаждений будет улавливать большую часть атмосферных осадков. Для увеличения скорости

Табл. 5. Изменение распределения ливневых вод в зависимости от степени проницаемости покрытия территории
Table 5. Changes in the distribution of stormwater depending on the degree of permeability of the area coverage

Номер Number	Тип территории Type of territory	Качество среды жизнедеятельности человека The quality of the human environment	Применение СИФ/ЗИФ MI/GI application	Степень проницаемости покрытия территории The extent of permeability of the territory coverage
1. Особо охраняемые природные территории 1. Specially protected natural areas				100 %
				7,5 % территории Москвы 7.5 % of the territory of Moscow
				Площадь 5,1 тыс. га Area 5.1 thousand hectares

Озеленение, предназначенное для отведения поверхностного стока, также может обеспечить снижение скорости потока отводимой воды, улучшение качества городского пространства, повысить эстетические свойства ландшафта
Greening designed to divert surface runoff can also provide a reduction in the flow rate of withdrawn water, improve the quality of urban space, and enhance the aesthetic properties of the landscape

Продолжение табл. 5 / Continue of the Table 5

Номер Number	Тип территории Type of territory	Качество среды жизнедеятельности человека The quality of the human environment	Применение СИФ/ЗИФ MI/GI application	Степень проницаемости покрытия территории The extent of permeability of the territory coverage
2. Природные и озелененные территории 2. Natural and green areas			СИФ + ЗИФ MI + GI	80–90 % 20,8 % территории Москвы 20.8 % of the territory of Moscow
3. Территории с малой плотностью застройки 3. Territories with low building density			Только СИФ Only MI	45–50 % 22,7 % территории Москвы 22.7 % of the territory of Moscow
<p>Озеленение, предназначенное для отведения поверхностного стока, помогает сократить объем и интенсивность стока до дождевой канализации, очищать его от загрязняющих веществ, повышать качество воды и снижать риски подтоплений и наводнений на территории городов и населенных пунктов Greening, designed to divert surface runoff, helps to reduce the quantity and intensity of flow to the rain sewer, clean it from pollutants, improve water quality and reduce the risks of flooding in cities and towns</p>				
<p>Инвестиции в озеленение, предназначенное для отведения поверхностного стока, в малых городах и населенных пунктах заменяют, а в мегаполисах дополняют подземную трубопроводную дождевую канализацию и продлевают срок ее службы Investments in gardening designed to divert surface runoff are being substituted in small towns and settlements, and in megacities they complement underground rainwater pipeline and extend its service life</p>				

Номер Number	Тип территории Type of territory	Качество среды жизнедеятельности человека The quality of the human environment	Применение СИФ/ЗИФ MI/GI application	Степень проницаемости покрытия территории The extent of permeability of the territory coverage
				0–25 %
				49 % территории Москвы 49 % of the territory of Moscow
4. Территории с большой плотностью застройки 4. Territories with high building density				Площадь 34 тыс. га Area 34 thousand hectares

Вода, которая попадает на крыши, улицы, бульвары, тротуары, детские площадки, парковки, не может впитаться в землю и становится ливневым стоком, собирая загрязняющие вещества, такие как взвешенные вещества, нефтепродукты, тяжелые металлы, хлориды, органические соединения, которые при отсутствии городской канализации и очистных сооружений сбрасываются в местные водоемы, загрязняют почву и подземные воды

Water that gets on roofs, streets, boulevards, sidewalks, playgrounds, parking lots cannot be absorbed into the soil and becomes a storm drain, collecting pollutants such as suspended solids, petroleum products, heavy metals, chlorides, organic compounds, which in the lack of urban sewerage and sewage treatment plants are discharged into local reservoirs, pollute the soil and groundwater

водоотведения созданы небольшие склоны из зеленых насаждений, которые дополнительно впитывают избыток ливневых вод, переливающихся через решетку. Таким образом, тротуар останется сухим, а излишки дождевой поверхности воды могут быть аккумулированы зелеными компонентами объекта: от газона и композиций из злаковых и луговых культур до массивов кустарников и деревьев с разным отношением к затоплению.

Существующий point-storm дренаж на рассматриваемом перекрестке представлен четырьмя ливневыми решетками по Ленинскому пр-ту. Это обусловлено шириной проезжей части на исследуемом участке Ленинского пр-та — 57 м и прохождением наибольшего объема ливневых вод. Улицы Лобачевского и Обручева, шириной 25 и 35 м соответственно, не имеют связи с городской ливневой канализацией. Таким образом, существующий point-storm дренаж улавливает до 60 % ливневых потоков. Остальная часть ливневых вод скапливается в низине рельефа, т.е. в центре перекрестка. Для устранения выявленных недостатков необходимо инженерное переустройство дорожного полотна

и прилегающих участков зеленых насаждений с внедрением элементов зеленой инфраструктуры. Авто-ры считают целесообразным широкое применение биодренажных канав на исследуемой территории в условиях низкой плотности застройки, поскольку

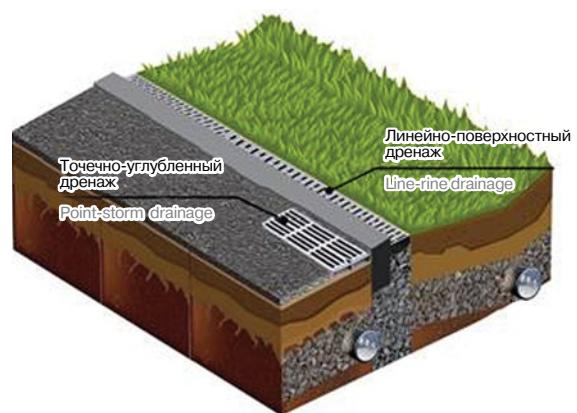


Рис. 10. Схематичное изображение линейно-поверхностного дренажа и точечно-углубленного дренажа (рисунок авторов)

Fig. 10. Schematic representation of line-rain drainage and point-storm drainage (authors' scheme)

Табл. 6. Модель перекрестка с использованием ЗИФ элементов и обновленного дренажа

Table 6. The crossroads model that has GI elements and a renewed drainage

Номер Number	1 зеленая полоса от магазина до тротуара 1 green strip from the store to the sidewalk	2 зеленая полоса между тротуаром и проезжей частью 2 green strip between the sidewalk and the roadway
План Plan		
Существующее фото Present-day photo		
ЗИФ элемент GI element	Дождевой сад проницаемые покрытия Rain garden permeable coatings	Биофильтрационный склон проницаемые покрытия biological filtration slope permeable coatings
Модель Model		

Номер Number	3 зеленая разделительная полоса на проезжей части 3 green dividing strip on the roadway	4 склон в лес 4 slope into the forest
План Plan		
Существующее фото Present-day photo		
ЗИФ GI element	Биодренажная канава с деревьями проницаемые покрытия Biological drainage ditch with trees permeable coatings	Гибридный дождевой сад проницаемые покрытия Hybrid rain garden permeable coatings
Модель Model		

Окончание табл. 6 / End of the Table 6

Номер Number	5 пешеходная часть 5 pedestrian part	6 зеленые насаждения около торгового центра «Рио» 6 green spaces near the Rio shopping center
План Plan		
Существующее фото Existing photo		
ЗИФ элемент GI element	Биодренажная канава проницаемые покрытия Biological drainage ditch permeable coatings	Биодренажная канава с деревьями проницаемые покрытия Biological drainage ditch with trees permeable coatings
Модель Model		

они занимают относительно большие территории и практически не имеют вертикального отделения от тротуара и проезжей части. Использование биодренажной канавы с деревьями позволит собрать, сохранить и передать большой объем ливневой воды. Также большой объем ливневой воды в канаве обеспечит устойчивость зеленых насаждений.

Многочисленные площади с зелеными насаждениями на исследуемой территории авторами предлагается превратить в дождевые сады. Отвод воды в дождевой сад эффективен при пиковых значениях объема атмосферных осадков, так как осуществляется прямое поступление стока ливневой воды с улицы. Зеленые насаждения в составе дождевого сада обеспечивают поглощение воды и предварительную очистку ее от ЗВ. Поэтому дождевые сады имеют большую глубину и пропускную способность инфильтрации, чем биодренажные канавы. Следовательно, и состав растений на этих участках может быть разный, что создает вариативные возможности для благоустройства в городе даже в структуре транспортных коммуникаций.

С целью увеличения эффективности водосбора в дождевой сад авторами предлагается использовать комбинацию из биофильтрационного склона и дождевого сада. Такой биодренажный дождевой сад или новая модель территории с откосами по периметру и технологическими решениями с подбором, соответствующий условиям ассортимента растений, имеет гибридные свойства применяемых элементов зеленой и серой инфраструктуры. Определенные виды растений, каменные валуны и булыжники будут способствовать улучшению эстетики ландшафта, увеличению крутизны боковых склонов и обеспечат контроль водной эрозии при должном закреплении. Дно дождевого сада может быть засыпано щебнем или гравием, что воспрепятствует возникновению размывов. Дождевые сады могут быть связаны поверхностными каналами или дренажными трубами для предотвращения водной перегрузки на одном из них. Дождевые сады, встроенные в планировочные решения остановочного пункта в виде небольших элементов, улучшают условия нахождения пассажиров на остановочных пунктах.

Все вышеперечисленное озеленение потребует минимального проведения регулярного обслуживания, такого как обрезка, полив во время засухи, удаление сорняков. Такой метод основан на комплексном подходе в проектировании, когда технологические и ландшафтные решения оптимизируют затраты по уходу и содержанию зеленых оазисов, поддерживая моделирование устойчивых компонентов озеленения за счет атмосферных осадков. В этом процессе внимания потребует только плановая очистка впускных отверстий и дренажных труб. Таким образом, авторы предлагают для проектной апробации теоретическую 3D-модель перекрестка с использованием ЗИФ-элементов и обновленной конструкции дренажа (табл. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенного анализа показали, что выбранная территория исследования — по типологии поперечного профиля дороги, резервных участков под зеленую инфраструктуру и типу дренажной системы — пригодна для внедрения элементов зеленой инфраструктуры. Поэтому обозначим общие аспекты интегрирования зеленой инфраструктуры в городскую среду:

- соответствие размеров отведенной под ЗИФ территории потребностям города;
- возможность максимального использования существующей растительности, рельефа, водоема;
- обеспечение присоединения сетей инженерного благоустройства территории к городским сетям;
- возможность постройки капитальных сооружений в условиях данного рельефа, грунта, грунтовых вод и т.п., соответствующая нормам доступности участка;
- резерв территорий вне архитектурного пространства для возможности создания участков удержания и аккумулирования дождевой и поверхностной воды за счет создания урбанизированных биотопов в городе.

Обобщая представленный в статье анализ возможностей ЗИФ, необходимо отметить, что большие участки зеленых насаждений являются отличной платформой для размещения элементов зеленой инфраструктуры и управления ливневыми водами. Как было сказано выше, современные исследования показали, что биодренажные конструкции могут быть эффективными для улучшения качества воды и сохранения гидрологической функции на объекте до начала строительства, даже когда температура воздуха опускается ниже нуля. Исследования авторов доказывают, что при правильном анализе участка с градостроительной, инженерной и ландшафтной сторон, а также ответственном подборе растений местной флоры, биодренажные системы могут хорошо работать даже в регионах с холодным климатом, например в России [29–31]. Исследованный перекресток в Москве является ярким местным примером применения элементов зеленой инфраструктуры, опыта которого должен быть распространен на аналогичные объекты системы транспортных коммуникаций, типологическая структура которых используется на всей территории РФ. Действующие объекты транспортной и промышленной инфраструктуры, рассмотренные в авторском ведении применения гибридных моделей зеленой инфраструктуры с соответствующими расчетами по возможностям и количеству собираемой, транспортируемой и аккумулируемой дождевой и поверхностной воды, могут активно повлиять на корректировку нормативных показателей, а самое главное — на создание узлового благоустройства с включением природных биотопов разной структуры и гидрофильтрности в целях комфортной и устойчивой среды проживания в российских городах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Богданович А.Ю., Липка О.Н. Синергия климатической глобальной цели устойчивого развития и Национального плана адаптации в России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2020. Т. 31. № 3–4. С. 7–32. DOI: 10.21513/0207-2564-2020-3-07-32
2. Fowler H.J., Lenderink G., Prein A.F., Westra S., Allan R.P., Ban N. et al. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes // Nature Reviews Earth & Environment. 2021. Vol. 2. Issue 2. Pp. 107–122. DOI: 10.1038/s43017-020-00128-6
3. Морозова Г.Ю., Дебелая И.Д. Зеленая инфраструктура как фактор обеспечения устойчивого развития Хабаровска // Экономика региона. 2018. Т. 14. № 2. С. 562–574. DOI: 10.17059/2018-2-18
4. Скриган А.Ю. Зеленая инфраструктура городов как элемент адаптации к изменению климата: обзор научных идей и практической реализации // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. 2017. № 11. С. 103–111.
5. Нефедов В.А. Городской ландшафтный дизайн. СПб. : Любавич, 2012. 317 с.
6. Балакин В.В., Сидоренко В.Ф. Шумозащитная эффективность разделительных полос озеленения на объектах транспортной инфраструктуры // Национальная ассоциация ученых. 2015. № 9–1 (14). С. 110–111.
7. Zaykova E. Green Spice for the Megacity and Urbanization // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 2. P. 022014. DOI: 10.1088/1757-899x/869/2/022014
8. Pauleit S., Ambrose-Oji B., Andersson E., Anton B., Buijs A., Haase D. et al. Advancing urban green infrastructure in Europe: Outcomes and reflections from the GREEN SURGE project // Urban Forestry & Urban Greening. 2019. Vol. 40. Pp. 4–16. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.10.006
9. Zaykova E. Postindustrial space: Integration of green infrastructure in the center, middle and periphery of the city // Springer Geography. 2018. Pp. 106–117.
10. Willems J.J., Molenveld A., Voorberg W., Brinkman G. Diverging ambitions and instruments for citizen participation across different stages in green infrastructure projects // Urban Planning. 2020. Vol. 5. Issue 1. Pp. 22–32. DOI: 10.17645/up.v5i1.2613
11. Thomas R., Claudia W. Planting in a post-wild world: designing plant communities for resilient landscapes. 2015. 272 p.
12. Thomson G., Newman P. Green infrastructure and biophilic urbanism as tools for integrating resource efficient and ecological cities // Urban Planning. 2021. Vol. 6. Issue 1. Pp. 75–88. DOI: 10.17645/up.v6i1.3633
13. Dreiseitl H., Wanschura B., Wörlein M., Molendaschl M., Wescoat J. Making cities liveable green-blue infrastructure and its impact on society. 2016. 18 p. URL: <https://ramboll.com/-/media/files/rgr/documents/markets/water/m/making-cities-liveable.pdf?la=en>
14. Chatzimenter A., Apostolopoulou E., Mazaris A.D. A review of green infrastructure research in Europe: Challenges and opportunities // Landscape and Urban Planning. 2020. Vol. 198. P. 103775. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103775
15. Липка О.Н. Подходы к разработке крупномасштабных проектов по адаптации к изменениям климата на основе экосистем в дельте р. Или (Казахстан) // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2020. Т. 31. № 3–4. С. 88–119. DOI: 10.21513/0207-2564-2020-3-88-119
16. Середа Л.О., Куролап С.А., Яблонских Л.А. Эколого-геохимическая оценка техногенного загрязнения почвенного покрова промышленных городов : монография. Воронеж : Научная книга, 2018. 196 с.
17. Li L., Uyttenhove P., Eetvelde V.V. Planning green infrastructure to mitigate urban surface water flooding risk — a methodology to identify priority areas applied in the city of Ghent // Landscape and Urban Planning. 2020. Vol. 194. P. 103703. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.103703
18. Мелехин А.Г., Щукин И.С. Анализ существующих биоинженерных сооружений очистки поверхностного стока и возможности их применения в условиях Западного Урала // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2013. № 2. С. 40–50.
19. Webber J.L., Fletcher T.D., Cunningham L., Fu G., Butler D., Burns M.J. Is green infrastructure a viable strategy for managing urban surface water flooding? // Urban Water Journal. 2020. Vol. 17. Issue 7. Pp. 598–608. DOI: 10.1080/1573062X.2019.1700286
20. Шеина С.Г., Юдина К.В. Экологическая комфортность как основной параметр устойчивого развития города // Строительство и архитектура. 2018. С. 33–37.
21. Годовой отчет Научно-исследовательского института устойчивого развития в строительстве 2020. СПб., 2020. 35 с. URL: <https://greenzoom.ru/books/18-vezegodnyj-otchet-ano-niirs-za-2020-god/>
22. Макаров А.О. Оценка экологического состояния почв некоторых железнодорожных объектов ЦАО г. Москвы : дис. ... канд. биол. наук. М., 2014. 303 с.
23. Евстигнеева Ю.В., Трофименко Ю.В., Евстигнеева Н.А. Биоремедиационные технологии очистки поверхностного стока с улично-дорожной сети населенных пунктов // Студенческий научный форум : мат. XII Междунар. студенч. науч. конф. 2020.
24. Urban street design guide. 2021. URL: <https://treet-design-elements/stormwater-management/bioswales/>

25. Кац М. Проектирование городских улиц. URL: http://tatinik/files/products/516328/proektirovaniye-gorodskikh-ulic-9785916713558_1733.pdf

26. Bassuk N.L., Dropkin E.M. Woody shrubs for stormwater retention practices. 2014. 56 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.4800.2328

27. Дергунова А.В., Пиксайкина А.А. Применение пористых тротуаров в создании инфраструктуры городской среды // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 12. С. 1440–1447. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1440-1447

28. Потапов А.М., Маслова Н.М., Струк О.В. Сравнительный расчет пропускной способности безнапорных трубопроводов из различных материалов.

Поступила в редакцию 19 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 17 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 18 октября 2022 г.

О б а в т о р а х: Елена Юрьевна Зайкова — кандидат архитектуры, доцент кафедры градостроительства, заместитель директора Института архитектуры и градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 503400, ORCID: 0000-0002-0555-9941; lena_landscape21@mail.ru;

София Сергеевна Феофанова — аспирант кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8352-1211; sonyafeofanova@mail.ru.

Вклад авторов:

Зайкова Е.Ю. — научное руководство, развитие методологии исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Феофанова С.С. — сбор материала, обработка материала, написание исходного текста, создание иллюстраций и таблиц.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bogdanovich A.Yu., Lipka O.N. The synergy of the climate global sustainable development goal and the national adaptation plan in Russia. *Problems of Ecological Monitoring and Modeling of Ecosystems*. 2020; 31(3-4):7-32. DOI: 10.21513/0207-2564-2020-3-07-32 (rus.).
2. Fowler H.J., Lenderink G., Prein A.F., Westra S., Allan R.P., Ban N. et al. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2021; 2(2):107-122. DOI: 10.1038/s43017-020-00128-6
3. Morozova G.Y., Debelya I.D. Green infrastructure as a factor for sustainable development of Khabarovsk. *Economy of Regions*. 2018; 14(2):562-574. DOI: 10.17059/2018-2-18 (rus.).
4. Skryhan H. Green infrastructure of the cities as an element of the adaptation to climate change: review of the scientific ideas and practical implementation. *Bulletin of Pskov State University Series: Natural and physical-mathematical sciences*. 2017; 11:103-111. (rus.).
5. Nefedov V.A. *Urban landscape design*. St. Petersburg, Lyubavich, 2012; 317. (rus.).
6. Balakin V.V., Sidorenko V.F. Noise-proof efficiency of dividing strips of landscaping at transport infrastructure facilities. *National Association of Scientists*. 2015; 9-1(14):110-111 (rus.).
7. Zaykova E. Green spice for the megacity and urbanization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(2):022014. DOI: 10.1088/1757-899x/869/2/022014
8. Pauleit S., Ambrose-Oji B., Andersson E., Anton B., Buijs A., Haase D. et al. Advancing urban green infrastructure in Europe: Outcomes and reflections from the GREEN SURGE project. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019; 40:4-16. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.10.006
9. Zaykova E. Postindustrial space: Integration of green infrastructure in the center, middle and periphery of the city. *Springer Geography*. 2018; 106-117.

10. Willems J.J., Molenveld A., Voorberg W., Brinkman G. Diverging ambitions and instruments for citizen participation across different stages in green infrastructure projects. *Urban Planning*. 2020; 5(1):22-32. DOI: 10.17645/up.v5i1.2613
11. Thomas R., Claudia W. *Planting in a Post-Wild World: Designing Plant Communities for Resilient Landscapes*. 2015; 272.
12. Thomson G., Newman P. Green infrastructure and biophilic urbanism as tools for integrating resource efficient and ecological cities. *Urban Planning*. 2021; 6(1):75-88. DOI: 10.17645/up.v6i1.3633
13. Dreiseitl H., Wanschura B., Wörlein M., Molandaschl M., Wescoat J. *Making Cities Liveable Green-Blue Infrastructure and its Impact on Society*. 2016; 18. URL: <https://ramboll.com/-/media/files/rgr/documents/markets/water/m/making-cities-liveable.pdf?la=en>
14. Chatzimenter A., Apostolopoulou E., Mazaris A.D. A review of green infrastructure research in Europe: Challenges and opportunities. *Landscape and Urban Planning*. 2020; 198:103775. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103775
15. Lipka O.N., Mazmanians G.M., Isupova M.V., Aleynikov A.A., Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V. Approaches to a large-scale ecosystem-based adaptation project development in the Ili river delta (Kazakhstan). *Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modeling*. 2020; 31(3-4):88-119. DOI: 10.21513/0207-2564-2020-3-88-119 (rus.).
16. Sereda L.O., Kurolap S.A., Yablonskikh L.A. *Ecological and geochemical assessment of technogenic pollution of the soil cover of industrial cities : monograph*. Voronezh: Scientific Book, 2018; 196. (rus.).
17. Li L., Uyttenhove P., Eetvelde V.V. Planning green infrastructure to mitigate urban surface water flooding risk — a methodology to identify priority areas applied in the city of Ghent. *Landscape and Urban Planning*. 2020; 194:103703. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.103703
18. Melekhin A.G., Shchukin I.S. Analysis of existing bioengineering facilities for surface runoff treatment and the possibility of their application in the conditions of the Western Urals. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2013; 2:40-50. (rus.).
19. Webber J.L., Fletcher T.D., Cunningham L., Fu G., Butler D., Burns M.J. Is green infrastructure a viable strategy for managing urban surface water flooding? *Urban Water Journal*. 2020; 17(7):598-608. DOI: 10.1080/1573062X.2019.1700286
20. Sheina S.G., Yudina K.V. Ecological comfort as the main parameter of sustainable development of the city. *Construction and Architecture* 2018; 33-37. (rus.).
21. Annual report of the ANO "Research Institute for Sustainable Development in Construction". St. Petersburg, 2020; 35. URL: <https://greenzoom.ru/books/18-ezegodnyj-otchet-ano-niurus-za-2020-god/> (rus.).
22. Makarov A.O. *Assessment of the ecological state of soils of some railway facilities of the Central Administrative District of Moscow : dis. ... cand. biological sciences*. Moscow, 2014; 303. (rus.).
23. Evstigneeva Yu.V., Trofimenko Yu.V., Evstigneeva N.A. Bioremediation technologies for cleaning surface runoff from the road network of settlements. *Student Scientific Forum : Materials of the XII International Student Scientific Conference*. 2020. (rus.).
24. *Urban street design guide*. 2021. URL: treet-design-elements/stormwater-management/bioswales/
25. Kats M. *Urban Street Design Guide*. URL: tatinik/files/products/516328/proektirovanie-gorodskikh-ulic-9785916713558_1733.pdf (rus.).
26. Bassuk N.L., Dropkin E.M. *Woody shrubs for stormwater retention practices*. 2014; 56. DOI: 10.13140/RG.2.1.4800.2328
27. Dergunova A.V., Piksaykina A.A. The use of porous pavements in creating the infrastructure of the urban environment. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; 13(12):1440-1447. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1440-1447 (rus.).
28. Potapov A.M., Maslova N.M., Struk O.V. *Comparative calculation of the capacity of non-pressure pipelines made of various materials*. Irkutsk, 2006; 7. URL: http://integra-chita.ru/all_docs/docs20091222095414.PDF (rus.).
29. Zaykova E.Y. Healing landscapes in the multi-functional hybrid objects. *Proceedings of the Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering*. 2019; 347-355.
30. Zaykova E. Formation methods of hybrid urban spaces in the historic city center. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:01031. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701031
31. Zaykova E. Strategies ensuring the stability of natural and urbanized biotopes in hybrid multi-functional objects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012065. DOI: 10.1088/1757-899x/1030/1/012065

Received September 19, 2022.

Adopted in revised form on October 17, 2022.

Approved for publication on October 18, 2022.

BIO NOTES: **Elena Yu. Zaykova** — Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of Urban Planning, Deputy Director of the Institute of Architecture and Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3019-6269, ID RISC: 503400, ORCID: 0000-0002-0555-9941; lena_landscape21@mail.ru;

Sofia S. Feofanova — postgraduate student of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8352-1211; sonyafeofanova@mail.ru.

Contribution of the authors:

Elena Yu. Zaykova — scientific guidance, development of research methodology, scientific text editing, final conclusions.

Sofia S. Feofanova — collecting material, processing material, writing source text, creating illustrations and tables.

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 624.04:72

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1453-1461

Влияние формообразования на поведение сетчатой оболочки в форме однополостного гиперболоида

Геннадий Савельевич Нечипорук, Светлана Станиславовна Правдолюбова,
Михаил Оганесович Векилян

Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета; г. Рязань, Россия

Аннотация

Введение. Исследуется напряженно-деформированное состояние (НДС) сетчатых оболочек в форме однополостного гиперболоида, состоящих из одной, двух и трех секций, под воздействием вертикальной и ветровой нагрузок и собственного веса. Особенностью оболочек является использование в их геометрии — соотношении диаметров и высот — числа Фибоначчи.

Материалы и методы. Положение прямолинейных образующих оболочки связано с углом наклона образующих, вызванного взаимным поворотом верхнего и нижнего оснований, и задает различные формы конструкции. Определение НДС оболочек проводится численным методом с применением ПК ЛИРА-САПР. Сравниваются наибольшие усилия в образующих и наибольшие горизонтальные перемещения верхнего края оболочки, вызванные ветровой нагрузкой.

Результаты. Получены выражения для выявления положения образующей и размеров действительной полуоси гиперболоида. Приводятся расчетные модели оболочек с различным наклоном образующих. В результате анализа полученных данных даются предложения по оптимальным с позиций прочности и жесткости очертаниям оболочек различной высоты и этажности. При действии только вертикальной нагрузки и собственного веса взаимный поворот верхнего и нижнего оснований не оказывается на НДС оболочек. При действии ветровой нагрузки картина значительно меняется. Так, для односекционных оболочек средней высоты и высоких оболочек с оптимальными параметрами внутренних усилий и перемещений размер действительной полуоси совпадает с размером, соответствующим «золотому сечению». В то же время оболочки с малым углом взаимного поворота оснований плохо сопротивляются боковой нагрузке. В двух- и трехсекционных оболочках значение действительной полуоси несколько больше.

Выводы. Применение сетчатых оболочек в виде однополостного гиперболоида, в геометрии которых использовано соотношение «золотого сечения», позволяет получить более выразительные конструктивные решения. Представлены расчетные схемы подобных конструкций.

Ключевые слова: оболочка, Фибоначчи, образующая, однополостный гиперболоид, перемещение, усилие, несущая система, формообразование

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность редакционной коллегии, рецензентам, сотрудникам редакции за сотрудничество, внимание к данной работе и время, потраченное на изучение материалов.

Для цитирования: Нечипорук Г.С., Правдолюбова С.С., Векилян М.О. Влияние формообразования на поведение сетчатой оболочки в форме однополостного гиперболоида // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1453–1461. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1453-1461

Автор, ответственный за переписку: Светлана Станиславовна Правдолюбова, Pravda_63@mail.ru.

The influence of shaping on the behavior of a mesh shell shaped as a one-sheeted hyperboloid

Gennady S. Nechiporuk, Svetlana S. Pravdolyubova, Mikhail O. Vekilyan
Ryazan Institute (branch) Moscow Polytechnic University; Ryazan, Russian Federation

Abstract

Introduction. The stress-strain state (SSS) of mesh shells that have the shape of a one-sheeted hyperboloid, consisting of one, two and three sections and subjected to vertical and wind loads coupled with their own weight is studied. The feature of these shells is the use of the Fibonacci number in their geometry, or in the ratio of their diameters and heights.

Materials and methods. The position of rectilinear generatrices of shell depends on the angle of inclination of generatrices, which is determined by the mutual rotation of the upper and lower bases, and it determines various shapes of the structure. The stress-strain state of shells is found numerically using the LIRA-SAPR software package. The largest forces arising in

the generatrices and the largest horizontal displacements of the upper edge of the shell, caused by wind loading, are compared.

Results. Equations are obtained to identify the position of the generatrix and the size of the real semi-axis of the hyperboloid. Analytical models of shells with different inclinations of generatrices are provided. As a result of the data analysis, the shapes of shells, having different heights and numbers of storeys, are proposed to ensure their optimal strength and stiffness. If the structure is subjected to vertical loads and self-weight, the mutual rotation of upper and lower bases does not affect the SSS of shells. When the wind load is applied, the situation is completely different. Hence, for single-section shells of medium height and high shells with optimal parameters of internal forces and displacements, the size of the real semi-axis coincides with the size corresponding to the "golden section". At the same time, shells with a small angle of mutual rotation of the bases barely resist lateral loading. In two- and three-sectional shells, the value of the real half-axis is slightly greater.

Conclusions. The use of mesh shells, having the shape of a one-sheeted hyperboloid that has the "golden section" ratio, allows obtaining more expressive structural solutions. Analytical models of such structures are presented.

KEYWORDS: shell, Fibonacci, generatrix, one-sheeted hyperboloid, displacement, force, bearing system, shaping

Acknowledgements. The authors express their sincere gratitude to the editorial board, reviewers, and editorial staff for their cooperation, attention to this work, and the time spent on studying the materials.

FOR CITATION: Nechiporuk G.S., Pravdolyubova S.S., Vekilyan M.O. The influence of shaping on the behavior of a mesh shell shaped as a one-sheeted hyperboloid. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1453-1461. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1453-1461 (rus.).

Corresponding author: Svetlana S. Pravdolyubova, Pravda_63@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается поведение сетчатой оболочки, выполненной в форме однополостного гиперболоида (рис. 1). Одним из первых такую оболочку использовал известный русский и советский инженер, архитектор В.Г. Шухов, который спроектировал и построил большое число сетчатых оболочек на стальном каркасе, использующихся для строительства башен различного типа [1, 2]. Самую первую сетчатую конструкцию предложил И.П. Кулибин в проекте арочного деревянного моста через р. Неву в Санкт-Петербурге [3].

Конструкция в виде сетчатой оболочки является одной из самых прогрессивных несущих систем и используется в различных областях техники [4]. Интерес к подобным несущим конструкциям объясняется его формообразующими возможностями, позволяющими достигнуть функционального назначения с использованием минимального количества потребных ресурсов [5].



Рис. 1. Однополостный гиперболоид

Fig. 1. One-sheeted hyperboloid

Сетчатая оболочка — основная несущая конструкция в большинстве современных зданий и конструкций [6]. Архитекторы, такие как Норманн Фостер [7], Николас Гrimшоу [8] и другие часто используют конструкции, созданные с применением сетчатых пространственных оболочек.

Изучению сетчатых оболочек посвящены работы Chen-Hong [9], C.T. Loy [10]. T.J. Der [11, 12] провел экспериментальное исследование поведения гиперболической оболочки под действием ветровой нагрузки и сосредоточенной силы. В трудах Г.И. Беликова [13, 14] рассматривается поведение сетчатого гиперболоида при действии собственного веса, внешнего давления и ветровой нагрузки без изменения геометрии оболочки.

В настоящей работе исследуются оболочки с соотношением диаметров нижнего и верхнего оснований, равным числу Фибоначчи $\phi = 1,618$ (рис. 1), с различным наклоном прямолинейных образующих. Одним из чудесных свойств «золотого сечения» служит его способность порождать изысканные формы не только в архитектуре, но и в повседневных геометрических объектах [15, 16].

В многоступенчатых оболочках высоты секций так же пропорциональны числу ϕ .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Однополостный гиперболоид [17]

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} - \frac{z^2}{h^2} = 1 \quad (1)$$

имеет два семейства прямолинейных образующих AC и BD (рис. 2). Если соотношение радиусов оснований однополостного гиперболоида подчиняется соотношению «золотого сечения» r и $r\phi$, то соотношение мнимых полуосей так же связано с этим числом — h и $h(\phi-1)$.

Положение прямолинейной образующей AC можно получить, повернув точку B прямой AB

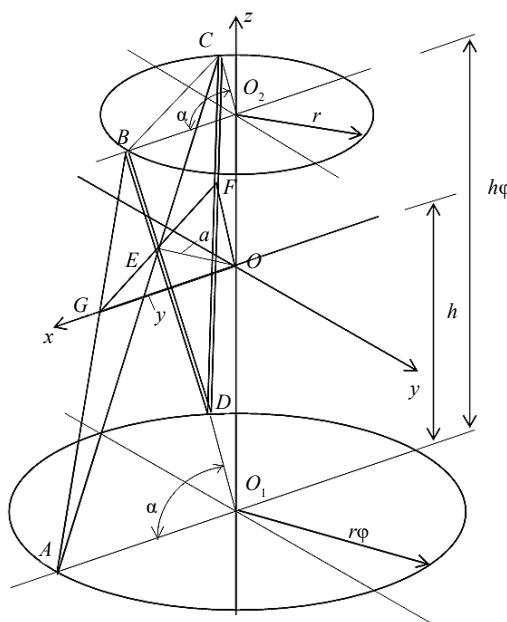


Рис. 2. Геометрия прямолинейных образующих

Fig. 2. Geometry of rectilinear generatrices

на угол α в положение точки C . Аналогично точка C прямой CD перемещается в положение точки B . Значение действительной полуоси a можно записать как $a = y \cdot \cos(\alpha/2)$, где:

$$y = r \left(\frac{\varphi^2 - \varphi + 1}{\varphi} \right) = 2r/\varphi. \quad (2)$$

Окончательно:

$$a = 2r/\varphi \cdot \cos \alpha/2. \quad (3)$$

Видно, что с увеличением угла α значение действительной полуоси a будет уменьшаться. При $\alpha = 120^\circ$ $a = r/\varphi$.

В соответствии с дискретной расчетной моделью сетчатая оболочка рассматривается как про-

странственная стержневая система [18]. При вычислениях использовался программный комплекс ЛИРА–САПР, который реализует численный метод конечных элементов [19–21].

Вначале были рассмотрены восемь оболочек, выполненных из металлических труб: 68×3 с площадью сечения $9,896 \text{ см}^2$ (верхнее и нижнее кольца), 54×3 с площадью сечения $4,807 \text{ см}^2$ (прямолинейные образующие) и 25×3 с площадью сечения $2,073 \text{ см}^2$ (поперечные связующие кольца). Диаметр нижнего основания $4,854$ м, диаметр верхнего основания 3 м и высота оболочки $9,708$ м (т.е. $r = 1,5$ м, $h = 6$ м). Размеры оболочки привязаны к числу φ . Оболочки нагружены вертикальной (10 кН на узел) и ветровой ($0,1 \text{ кН}/\text{м}$) нагрузками. Отличие состояло в угле поворота прямолинейной образующей. На рис. 3 показаны четыре таких оболочки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Графики изменения горизонтального перемещения верхнего основания (кривая 1) и наибольшей продольной силы в наклонных стержнях (кривая 2) при смене угла наклона прямолинейных образующих представлены на рис. 4. Видно, что из условий жесткости и прочности наиболее оптимальными оказываются оболочки с поворотом верхней точки образующей на $90\text{--}120^\circ$. Кривая 3 на рис. 4 показывает изменение наибольших продольных усилий в образующих при отсутствии боковой нагрузки. Величина N в этом случае практически не зависит от угла поворота образующей.

При исследовании оболочек большей высоты (рис. 5), когда $h = 12$ м, а общая высота равна $19,416$ м, изменение горизонтальных перемещений и наибольших сжимаемых усилий повторяет картину, характерную для оболочек средней высоты. Характер изменения указанных параметров приведен на рис. 5. Здесь и далее на следующих графиках:

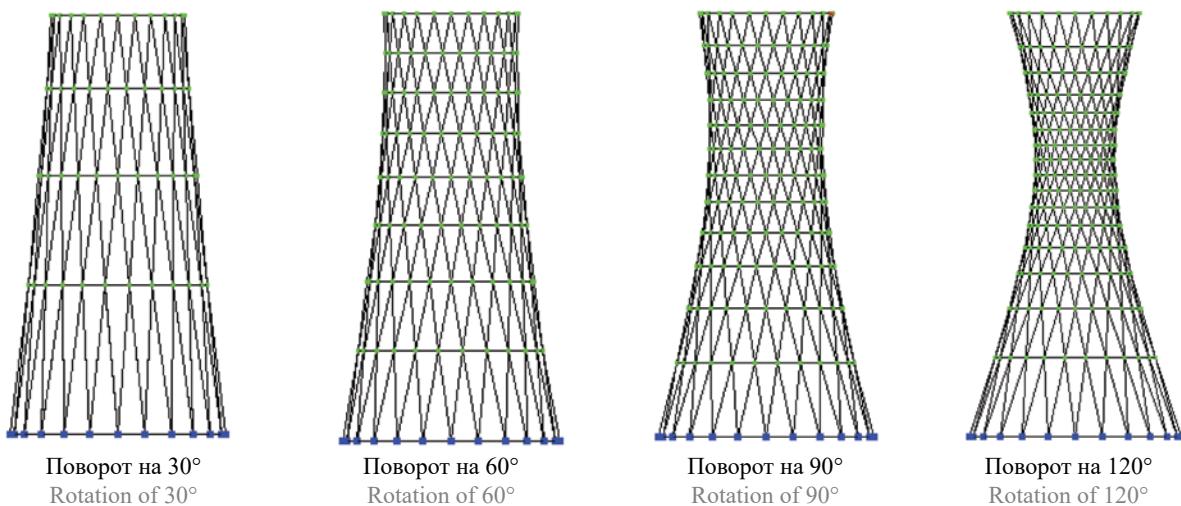


Рис. 3. Варианты оболочек средней высоты

Fig. 3. Options of medium-height shells

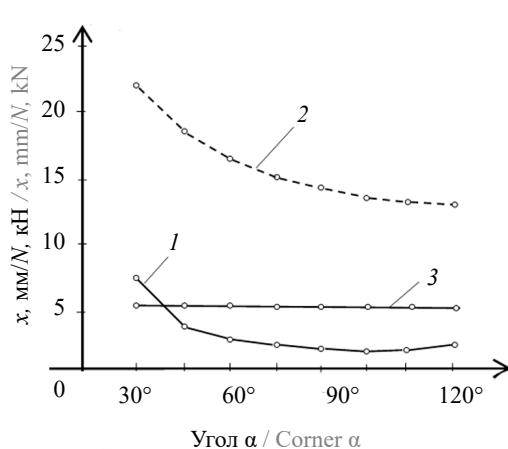


Рис. 4. Зависимость перемещений и усилий от угла наклона образующих у оболочек средней высоты

Fig. 4. Dependence of displacements and forces on the angle of inclination of generatrices near shells of medium height

кривая 1 — горизонтальные перемещения; кривая 2 — наибольшие продольные усилия.

Из рис. 5 следует, что наиболее жесткими оказываются оболочки при повороте образующей на угол $\alpha = 105\text{--}120^\circ$. На рис. 6 показаны варианты высоких оболочек.

Рассмотрены оболочки, составленные из секций различной высоты.

Двухступенчатые оболочки (рис. 7) получены путем добавления снизу к оболочке средней высоты секции высотой 15,708 м (это $h_{\text{фф}}$) и основанием

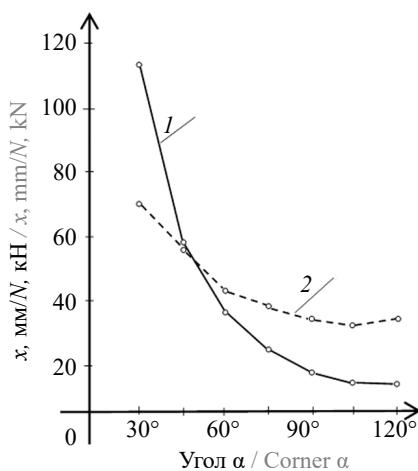


Рис. 5. Зависимость перемещений и усилий от угла α у высоких оболочек

Fig. 5. Dependence of displacements and forces on the angle α for high shells

диаметром 3,927 м или $r_{\text{фф}}$. Высота оболочки составила 25,416 м.

Стержни, идущие вдоль образующей, выполнены из трубы 68 × 3. Ветровая нагрузка принята на нижнюю секцию $q = 0,1$ кН/м, на верхнюю секцию $q = 0,15$ кН/м.

Зависимость перемещений (кривая 1) и усилий (кривая 2) от величины угла α при воздействии ветровой нагрузки в двухступенчатых оболочках показана на рис. 8.

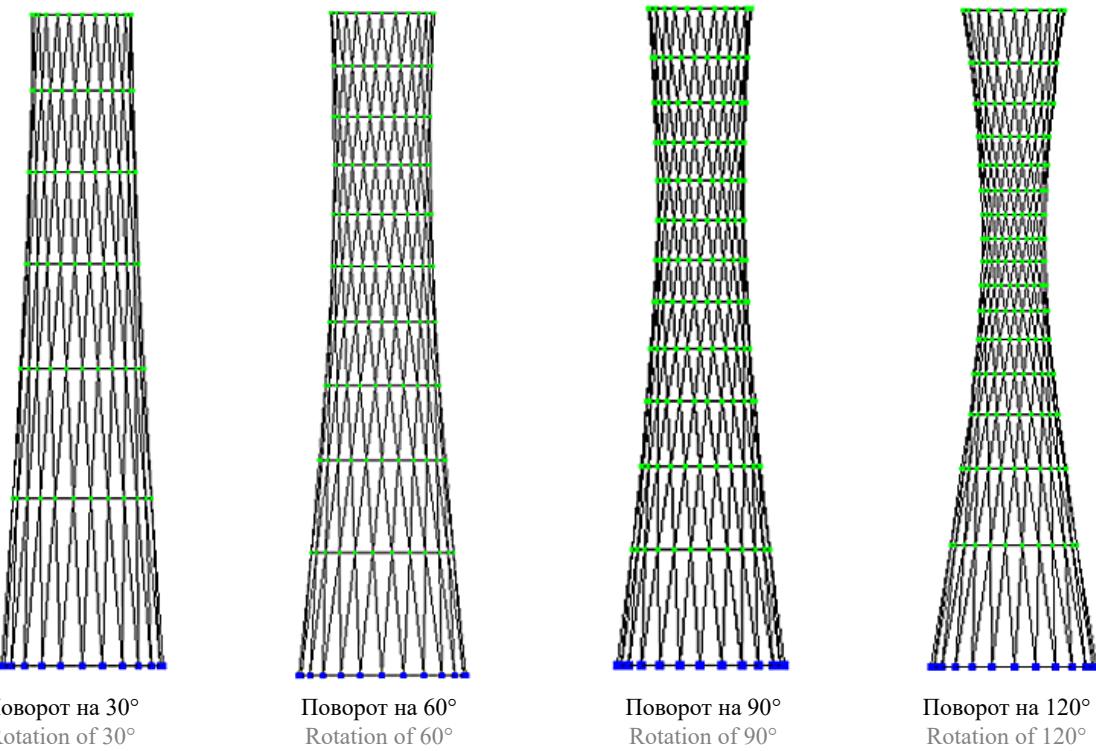


Рис. 6. Варианты высоких оболочек

Fig. 6. Options of high shells

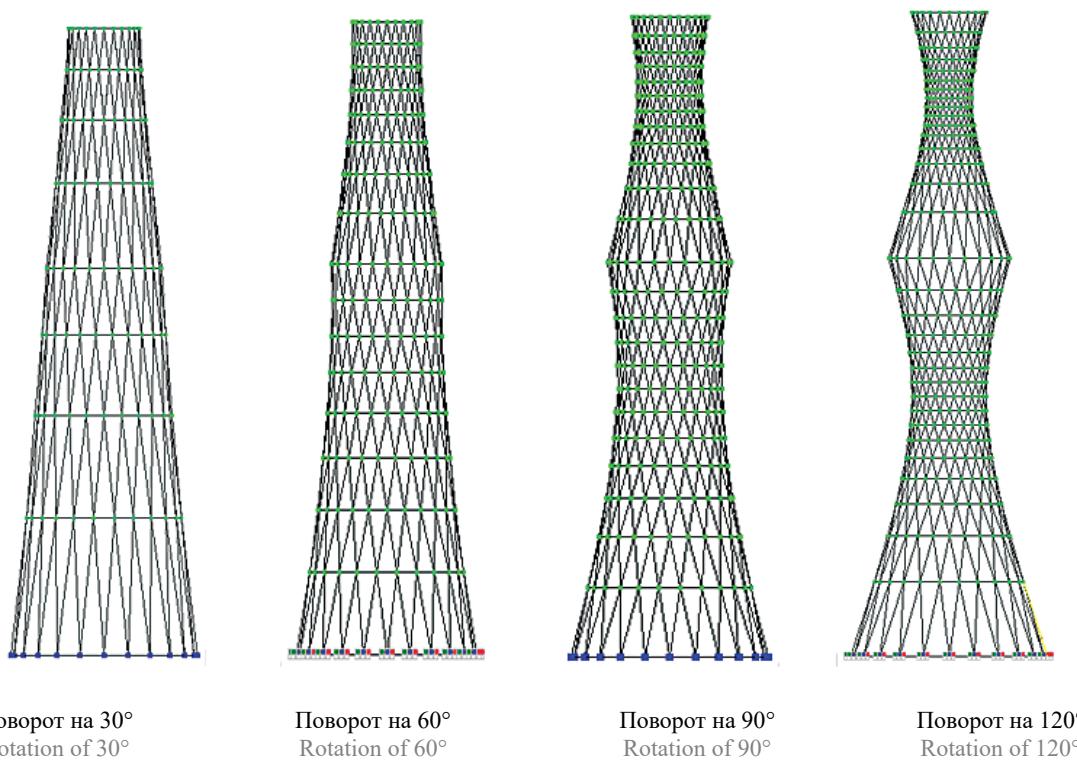


Рис. 7. Двухступенчатые оболочки

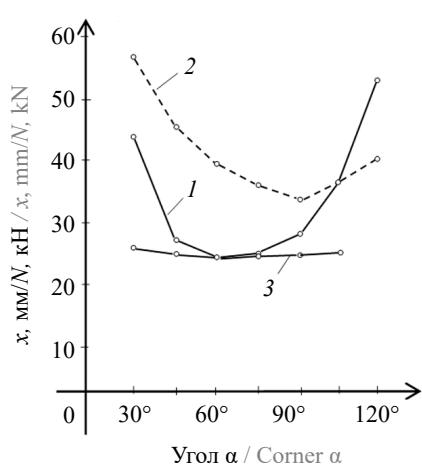
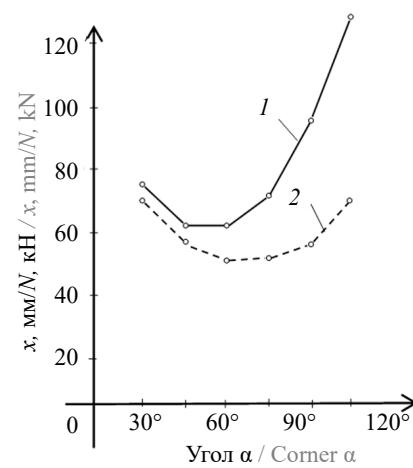
Fig. 7. Two-stage shells

Из графиков видно, что наибольшей жесткостью обладают оболочки, полученные путем поворота образующей на угол 60° . Наименьшие продольные усилия при этом наблюдаются у оболочек с $\alpha = 90^\circ$.

Трехступенчатые оболочки (рис. 10) получены добавлением сверху к двухступенчатой оболочке секции высотой $h = 6$ м с верхним кольцом диаметром $1,854$ м, это $2r/\varphi$. Образующие выполнены из труб с сечением 38×3 . Высота трехступенчатой оболочки составила $31,416$ м. Ветровая

нагрузка на верхнюю секцию — $0,2$ кН/м, вертикальная нагрузка на верхнее кольцо — 120 кН (5 кН на узел).

На рис. 9 приведены зависимости горизонтальных перемещений и наибольших продольных усилий для трехступенчатых оболочек, полученных при различных поворотах образующих. Перемещение по сравнению с двухступенчатой оболочкой увеличилось почти в 3 раза, наибольшие усилия увеличились вдвое. За оптимальные можно принять оболочки с поворотом на 60° .

Рис. 8. Зависимость перемещений и усилий от угла α у двухступенчатых оболочекFig. 8. Dependence of displacements and forces on the angle α for two-stage shellsРис. 9. Зависимость перемещений и усилий от угла α у трехступенчатых оболочекFig. 9. Dependence of displacements and forces on the angle α for three-stage shells

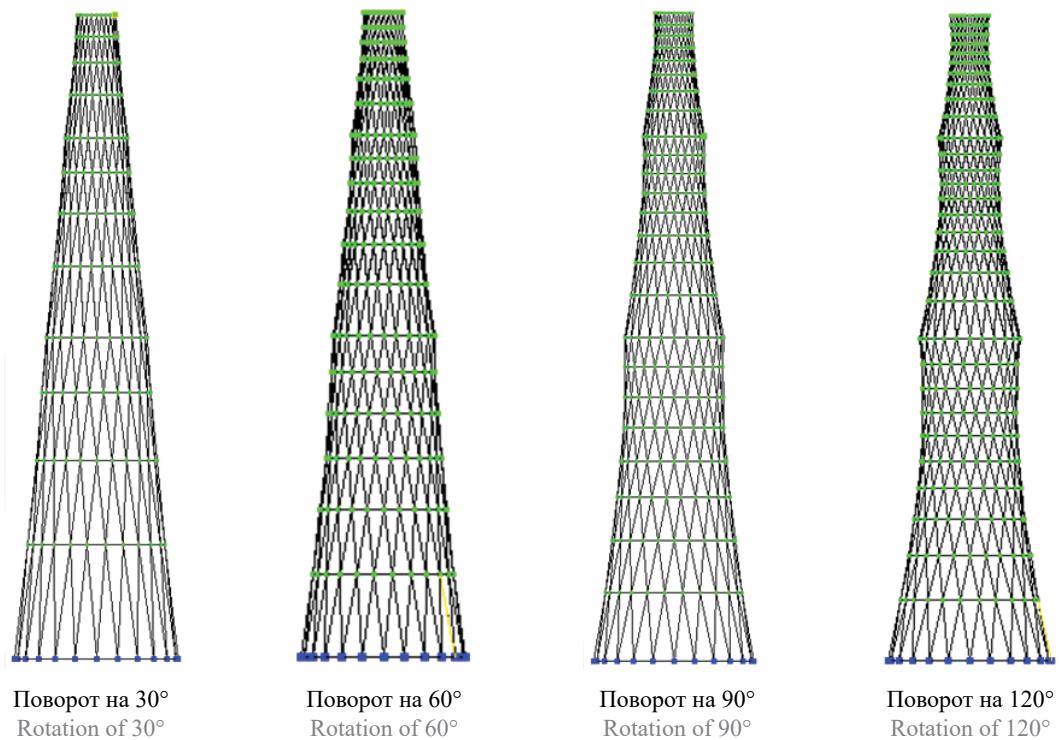


Рис. 10. Трехступенчатые оболочки

Fig. 10. Three-stage shells

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рис. 11 представлены оболочки с оптимальными параметрами по жесткости и прочности. У оболочек с одной секцией значение действительной полуоси $a = r/\varphi$.

По форме эти оболочки близки к известным шедеврам, построенным в виде однополостного гиперболоида, — телебашне в Гуанчжоу (Китай), баш-

не порта Кобе (Япония), расположенному в столице Катара зданию Aspire Tower.

У двух- и трехсекционных оболочек значение действительной полуоси a больше и составляет $a = 2r/\varphi \cos\alpha/2 = 2r\cos30^\circ/\varphi = 1,732 r/\varphi$.

Это значение справедливо для каждой из секций. За радиус r принимается радиус верхнего кольца.

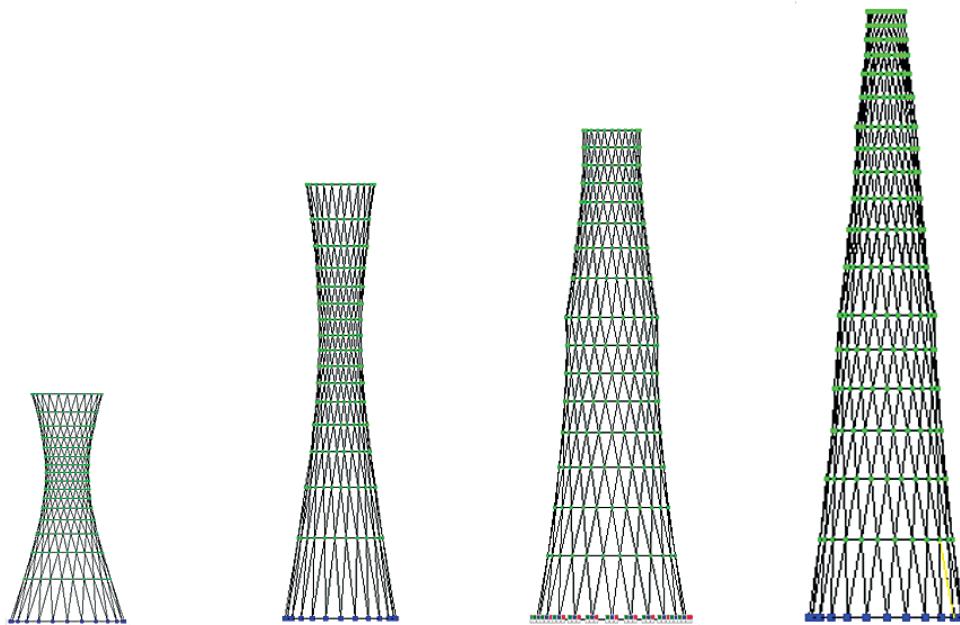


Рис. 11. Очертание оболочек с оптимальными параметрами

Fig. 11. The outline of shells with optimal parameters

Для двухсекционных оболочек рассматривались наибольшие перемещения при разных поворотах образующей верхней секции (кривая 3 на рис. 8). Перемещения практически одинаковы при поворотах образующей на 60–120°.

Развитие современного строительства связано с необходимостью применения экономически эффективных, надежных, технологичных конструкций зданий и сооружений.

Одним из видов таких эффективных конструкций являются легкие пространственные металлические конструкции, в том числе сетчатые оболочки. Они обладают высокой архитектурной выразительностью и конструктивной формой. При этом следует отметить, что они наиболее экономичны по расходу материала по сравнению с другими жесткими конструкциями.

Однако за свою вековую историю, при всей уникальности монтажа и экстремально легкого веса, эта конструкция не может считаться образцом прочности ввиду своей конструктивной формы. В ЗАО

ЦНИИПСК им. Мельникова были разработаны подобные Шаболовской башне, но более прочные конструкции и особенно узлы соединения элементов. Разработкой конструкций узлов сетчатых пространственных покрытий в нашей стране занимались А.Ю. Гурьев, П.А. Дмитриев, А.А. Журавлев, Б.В. Лабудин, Б.В. Миряев, Б.К. Михайлов, Б.Г. Мухин, В.А. Савельев, Е.Н. Серов, Б.С. Цетлин и другие ученые.

Именно узлы обеспечивают совместную работу стержней, и применение узлов с различной жесткостью значительно изменяет характер работы конструкции под нагрузкой.

Целью настоящей работы не было совершенствование узловых соединений сетчатых оболочек и исследование их напряженно-деформированного состояния. В работе рассмотрена динамика изменения геометрических характеристик сетчатой оболочки в форме гиперболоида и ее влияние на прочность и жесткость конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Виноградова Т.П., Авдеев С.Н. Нижегородские открытия. Код Шухова. Н. Новгород : Изд-во «Покровка 7», 2013. 144 с.
2. Графе Р., Гаппоева М.М., Перчи О. В.Г. Шухов, 1853–1939. Искусство конструкции. М. : Мир, 1994. 192 с.
3. Раскин Н.М. Рукописные материалы И.П. Кулибина в архиве Академии наук СССР: научное описание с приложением чертежей. М. ; Л. : Изд-во Акад. Наук СССР, 1953. 734 с.
4. Ништ М.И., Подобедов В.А., Мичкин А.И., Иродов Е.Ю. Перспективы применения решетчатых несущих поверхностей // Самолетостроение. Техника воздушного флота. 1990. № 57. С. 17–23.
5. Энгель Х. Несущие системы / пер. с нем. Л.А. Андреевой. М. : АСТ : Астрель, 2007. 344 с.
6. Пшеничников Г.И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластиноок. М. : Наука, 1982. 352 с.
7. Foster N., Fernández-Galiano L. Norman foster in the 21st century. AV, Monografías. Artes Gráficas Palermo, 2013. Рр. 163–164.
8. Grimshaw N. Grimshaw Architecture: The First 30 Years. London : Prestel, 2010. 160 p.
9. Chen H.-J., Tsai S.W. Analysis and optimum design of composite grid structures // Journal of Composite Materials. 1996. Vol. 30. Issue 4. Pp. 503–534. DOI: 10.1177/002199839603000405
10. Loy C. Vibration of antisymmetric angle-ply laminated cylindrical panels with different boundary conditions // The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. 1999. Vol. 52. Issue 1. Pp. 55–71. DOI: 10.1093/qjmam/52.1.55
11. Der T.J. The buckling behavior of the hyperboloidal cooling towers under satral loading // IASS symposium. Madrid, 1970.
12. Der T.J., Fidler R.A. A model study of the buckling behaviour of hyperbolic shells // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1968. Vol. 41. Issue 1. Pp. 105–118. DOI: 10.1680/iicep.1968.7749
13. Беликов Г.И. Расчет сетчатых оболочек вращения : дис. ... канд. техн. наук. М., 1974. 150 с.
14. Беликов Г.И. Статика, динамика и устойчивость сетчатых и подкрепленных оболочек с учетом поперечного сдвига. Волгоград : ВолГАСА, 2003. 296 с.
15. Корбала Ф. Золотое сечение: математический язык красоты / пер. с англ. М. : DeAgostini, 2013. 158 с.
16. Conway J.H., Guy R.K. The book of numbers. NY : Copernikus, 1996. 173 p.
17. Бронштейн И.Н., Семеняев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М. : Наука, 1986. 554 с.
18. Игнатьев В.А. Расчет стержневых пластиноок и оболочек: Метод дискретных конечных элементов. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1988. 159 с.
19. Петренко Ф.И. Расчет сетчатых оболочек отрицательной гауссовой кривизны с учетом геометрической и физической нелинейности : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 189 с.

20. Городецкий А.С., Барабаш М.С., Сидоров В.И. Компьютерное моделирование в задачах строительной механики. М. : Изд-во АСВ, 2016. 337 с.

Поступила в редакцию 29 апреля 2022 г.

Принята в доработанном виде 3 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 8 ноября 2022 г.

О Б А В Т О Р АХ: Геннадий Савельевич Нечипорук — кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры, градостроительства и дизайна; Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета; 390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, д. 26/53, РИНЦ ID: 19628692, ORCID: 0000-0001-5611-7230; gnechiporuk@mail.ru;

Светлана Станиславовна Правдолюбова — доцент кафедры архитектуры, градостроительства и дизайна; Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета; 390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, д. 26/53, РИНЦ ID: 866262, ORCID: 0000-0001-5611-7230; Pravda_63@mail.ru;

Михаил Оганесович Векилян — доцент кафедры архитектуры, градостроительства и дизайна; Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета; 390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, д. 26/53, РИНЦ ID: 750802; mr.vekilyan@mail.ru.

Вклад авторов:

Нечипорук Г.С. — научное руководство, разработка концепции исследования, определение НДС конструкций.

Правдолюбова С.С. — методология исследования, формообразующие характеристики геометрии оболочек, редакция текстового материала.

Векилян М.О. — изучение российского и зарубежного опыта исследования сетчатых оболочек.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vinogradova T.P., Avdeev S.N. *Nizhny Novgorod discoveries. The Shukhov code*. Nizhny Novgorod, Pokrovka 7 Publishing House, 2013; 144. (rus.).
2. Gafe R., Gappoева М.М., Perchi O. *V.G. Shukhov, 1853-1939. The art of construction*. Moscow, Mir Publ., 1994; 192. (rus.).
3. Raskin N.M. *Handwritten materials of I.P. Kulinin in the archive of the USSR Academy of Sciences. Scientific description with the application of drawings*. Moscow ; Leningrad, Publishing House of the SSSR Academy of Sciences, 1953; 747. (rus.).
4. Nisht M.I., Podobedov V.A., Michkin A.I., Irodov E.Yu. Prospects for the use of lattice bearing surfaces. *Aircraft Construction. Air Fleet Equipment*. 1990; 57:17-23. (rus.).
5. Engel H. *Carrier systems* / trans. from it L.A. Andreeva. Moscow, AST, Astrel Publ., 2007; 344. (rus.).
6. Pshenichnikov G.I. *Theory of thin elastic mesh shells and plates*. Moscow, Nauka Publ., 1982; 352. (rus.).
7. Foster N., Fernández-Galiano L. *Norman Foster in the 21st Century. AV, Monografias*. Artes Gráficas Palermo, 2013; 163-164.
8. Grimshaw N. *Grimshaw Architecture: The First 30 Years*. London, Prestel, 2010; 160.
9. Chen H.-J., Tsai S.W. Analysis and optimum design of composite grid structures. *Journal of Composite Materials*. 1996; 30(4):503-534. DOI: 10.1177/002199839603000405
10. Loy C. Vibration of antisymmetric angle-ply laminated cylindrical panels with different boundary conditions. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*. 1999; 52(1):55-71. DOI: 10.1093/qjmm/52.1.55
11. Der T.J. Behavior of hyperboloid cooling towers under horizontal load. *IASS Symposium*. Madrid, 1970.
12. Der T.J., Fidler R.A. A model study of the buckling behaviour of hyperbolic shells. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1968; 41(1):105-118. DOI: 10.1680/iicep.1968.7749
13. Belikov G. *And Calculation of mesh shells of rotation: dis. ... cand. technical sciences*. Moscow, 1974; 150. (rus.).
14. Belikov G.I. *Statics, dynamics and stability of mesh and reinforced structures taking into account transverse shear*. Volgograd, VolGASA, 2003; 298. (rus.).
15. Korbalan F. *The golden ratio. The mathematical language of beauty* / trans. from English. Moscow, DeAgostini, 2013; 158. (rus.).
16. Conway J.H., Guy R.K. *The Book of Numbers*. NY, Copernikus, 1996; 173.
17. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. *Handbook of Mathematics for engineers and university students*. Moscow, Nauka Publ., 1986; 554. (rus.).

18. Ignatiev V.A. *Calculation of rod plates and shells: The discrete finite element method*. Saratov, Publishing House of SSU, 1988; 159. (rus.).
19. Petrenko F.I. *Calculation of mesh shells of negative Gaussian curvature taking into account geometric and physical nonlinearity : dis. ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2017; 189. (rus.).
20. Gorodetsky A.S., Barabash M.S., Sidorov V.I. *Computer modeling in the tasks of construction mechanics*. Moscow, ASV Publ., 2016; 337. (rus.).
21. Tur A.V. *Improving the nodal connections of mesh domes from thin-walled cold-formed profiles : dis. ... candidate of technical sciences*. Samara, 2013; 243. (rus.).

Received April 29, 2022.

Adopted in revised form on November 3, 2022.

Approved for publication on November 8, 2022.

BIO NOTES: **Gennady S. Nechiporuk** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architecture, Urban Planning and Design; **Ryazan Institute (branch) Moscow Polytechnic University**; 26/53 Pravo-Lybedskaya st., Ryazan, 390000, Russian Federation; ID RISC: 19628692, ORCID: 0000-0001-5611-7230; gnechiporuk@mail.ru;

Svetlana S. Pravdolyubova — Associate Professor of the Department of Architecture, Urban Planning and Design; **Ryazan Institute (branch) Moscow Polytechnic University**; 26/53 Pravo-Lybedskaya st., Ryazan, 390000, Russian Federation; ID RISC: 866262, ORCID: 0000-0001-5611-7230; Pravda_63@mail.ru;

Mikhail O. Vekilyan — Associate Professor of the Department of Architecture, Urban Planning and Design; **Ryazan Institute (branch) Moscow Polytechnic University**; 26/53 Pravo-Lybedskaya st., Ryazan, 390000, Russian Federation; ID RISC: 750802; mr.vekilyan@mail.ru.

Contribution of the authors:

Gennady S. Nechiporuk — scientific guidance, development of the research concept, determination of SSS structures.

Svetlana S. Pravdolyubova — research methodology, shape-forming characteristics of the geometry of shells, editing of the text material.

Mikhail O. Vekilyan — study of Russian and foreign experience in the study of mesh shells.

The authors declare no conflict of interest.

Конечно-элементная модель диффузии хлорида в предварительно напряженной корродированной арматуре железобетонных конструкций

Татьяна Анатольевна Мацеевич, Илья Федорович Андреев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Общая модель коррозии железобетонных конструкций должна включать инициирование воздействий окружающей среды, таких как карбонизация, растрескивание и проникновение ионов хлора. Это зависит от скорости и степени коррозии, а также от коррозионного воздействия уменьшенных участков и ослабленной прочности сцепления между предварительно напряженной и ненапряженной арматурой и бетоном. Большинство предыдущих исследований было сосредоточено на проблемах одномерной диффузии с предполагаемой постоянной скоростью коррозии.

Материалы и методы. Вслед за общей коррозией при локальной коррозии выделяется водород с щелочной водой, ионами хлора. Распространение трещины на участках арматурной проволоки рассчитано с использованием переходной конечно-элементной программы для диффузии хлорида, зависимой от времени.

Результаты. В большинстве случаев уравнение диффузии не имеет решения в замкнутой форме, и поэтому можно использовать метод конечных разностей. При плотности тока с различным В/Ц скорость коррозии со временем уменьшается. С увеличением В/Ц скорость коррозии увеличивается.

Выводы. Получена конечно-элементная модель диффузии хлорида, которая может быть применена для последующей оценки надежности железобетонных конструкций с корродированной арматурой. Показано, что плотность тока и скорость коррозии зависят от наличия воды и кислорода на поверхности стали, которые нелинейно уменьшаются со временем. Выявлено, что в предварительно напряженной железобетонной балке коррозия одного стержня влияет на общую коррозию всех стержней в канате, при этом общая площадь уменьшения сечения стержней составляет не более 15 %.

Ключевые слова: диффузионный анализ, коррозия, предварительно напряженная арматура, конечно-элементная модель, плотность тока, скорость коррозии, уменьшение диаметра арматуры

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз», № FSWG-2020-0007).

Для цитирования: Мацеевич Т.А., Андреев И.Ф. Конечно-элементная модель диффузии хлорида в предварительно напряженной корродированной арматуре железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1462–1470. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1462-1470

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Анатольевна Мацеевич, MatseevichTA@mgsu.ru.

The finite element model of chloride diffusion in pre-stressed corroded reinforcement bars of reinforced concrete structures

Tatyana A. Matseevich, Ilya F. Andreev

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

ABSTRACT

Introduction. The general corrosion model, made for reinforced concrete structures, must include the initiation of environmental influences such as carbonation, cracking and chloride ion penetration. It depends on the rate and degree of corrosion, corrosive effects in reduced areas, as well as the lower strength of bond between pre-stressed and unstressed reinforcement bars and concrete. The majority of earlier studies were focused on one-dimensional diffusion problems with an assumed constant corrosion rate.

Materials and methods. In the aftermath of general corrosion, localized corrosion is accompanied by a release of hydrogen and alkaline water, chlorine ions. Crack propagation in reinforcement wires is calculated using the transient finite element software for chloride diffusion, which is time-dependent.

Results. In most cases, the diffusion equation does not have a closed form solution, and therefore, the finite difference

method can be used. The authors have shown that the corrosion rate decreases with time if current density has different water-cement ratios. If the water-cement ratio increases, the corrosion rate increases, as well.

Conclusions. In a pre-stressed reinforced concrete beam, the corrosion of one bar affects the total corrosion of all bars and the reduction in the cross-sectional area of bars that does not exceed 15 %.

KEYWORDS: diffusion analysis, corrosion, pre-stressed reinforcement, finite element model, current density, corrosion rate, reduction in the reinforcement bar diameter

Acknowledgments. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education (Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure the safe operation of buildings and structures amid production-induced and biogenic threats, project No. FSWG-2020-0007).

FOR CITATION: Matseevich T.A., Andreev I.F. The finite element model of chloride diffusion in pre-stressed corroded reinforcement bars of reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1462-1470. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1462-1470 (rus.).

Corresponding author: Tatyana A. Matseevich, MatseevichTA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, отказ конструкции определяется как нарушение предельного состояния по прочности или предельного состояния по пригодности к эксплуатации. Определения отказа часто субъективны. В работе [1] описано разрушение железобетонной конструкции как начало коррозии арматуры. Установлено начало разрушения железобетонной конструкции как время инициирования снижения прочности коррозией в публикации [2]. А в трудах [3, 4] начало разрушения железобетонной конструкции измеряется временем полной карбонизации защитного слоя бетона.

Все предыдущие определения разрушения бетонных конструкций связаны со степенью коррозии, ростом трещин и снижением прочности конструкций. Однако большинство критериев рассчитываются эмпирически или основаны на изучении в локальной области сечения.

Поведение корродированных железобетонных конструкций обобщено в исследованиях [5, 6]. При их изучении показано, что измеряемая плотность тока зависит от водоцементного отношения (В/Ц) и функции уменьшения площади арматуры.

В работах [7–13] рассмотрены и решены задачи, связанные с надежностью, прогнозированием долговечности и безопасности железобетонных конструкций с коррозионными повреждениями.

Были построены математические модели для представления диффузии хлоридов в бетонные поры в сочетании со статистическими подходами. Они моделировали влияние неопределенностей на прогнозирование прочности конструкции во времени. Предложена модель для представления механического поведения железобетонных балок в зависимости от времени [14]. В этой модели применен закон Фика для представления процесса диффузии хлоридов во времени, были приняты эмпирические законы с целью количественной оценки потерь поперечного сечения арматуры, а для проведения вероятностного анализа использован метод моделирования Монте-Карло. Проанализировано влияние изменчивости, связанной с толщиной бетонного

покрытия и В/Ц, на вероятность разрушения конструкции [15].

Рассмотрено математическое моделирование коррозионного массопереноса гетерогенной системы «жидкая агрессивная среда – бетон» [16]. Методы конечных элементов и конечных разностей в зависимости от времени массопереноса в бетоне обобщены в труде [17], в котором предложено связать процессы массопереноса, гидратации и развития пористой структуры. В исследовании [18] решена активная стадия коррозии путем диффузии кислорода.

Коррозионные продукты, такие как ржавчина, хорошо прикрепляются к рабочей арматуре и обеспечивают сцепление между сталью и бетоном [19]. Незначительная коррозия увеличивает прочность соединения [20]. Однако сильная коррозия снижает ее [21]. Согласно экспериментальным данным, после коррозии 80 % арматуры остаточная прочность сцепления по сравнению с начальной снижается до 10–15 % [22].

Аналитическая ширина раскрытия трещин и расстояние между трещинами определялись исходя из равновесия сил и совместности деформаций между арматурным стержнем и бетоном [23]. Для применения уравнений к предварительно напряженным бетонным сечениям предполагалось постоянное соотношение между прочностью связи арматурного стержня и предварительно напряженными элементами. Кроме того, нет пояснений относительно связи растрескивания с коррозионными процессами. Проверено снижение прочности сцепления с использованием корродированной арматуры для обычного портландцемента [24].

Коррозия стали начинается всякий раз, когда либо высокая щелочность в бетоне переходит на более низкий уровень, либо коррозионные агенты, такие как хлориды, накапливаются до порогового уровня на границе раздела бетона и арматуры [25, 26]. После этого коррозия продолжается, так как кислород диффундирует через бетонное покрытие. Бетонное покрытие, в свою очередь, в результате образования продуктов коррозии (ржавчины), заметно теряет свои качества в виде выкрашивания, окалины,

растрескивания или выщелачивания [27]. Начинается сильная коррозия, и поврежденное бетонное покрытие обеспечивает лишь слабую защиту стали.

В данной работе предлагается конечно-элементная модель (КЭМ) диффузии хлорида для последующей оценки надежности железобетонных конструкций с корродированной арматурой.

Основные допущения предлагаемой модели:

- для нелинейного анализа выбирается критическое сечение;
- исходное состояние сечения принимается подверженным коррозии, начавшейся по какой-либо причине. Зная результаты проверки или исходные значения для расчета начала коррозии, можно рассчитать и сравнить состояние коррозии по результатам разработанной программы диффузии ионов хлора;
- общая модель коррозии ограничена диффузионным анализом ионов хлора, что является самым быстрым параметром разрушения железобетонных конструкций, вызванного коррозией.

Предлагаемая модель состоит из двух частей:

- 1) начало коррозии (разработана конечно-элементная программа для диффузии ионов хлора);
- 2) распространение коррозии (моделируется уменьшением площади арматуры).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Начало коррозии

На первом этапе коррозия практически не возникает до тех пор, пока накопление вредных химических веществ, таких как хлориды или двуокись углерода, не превысят пороговый уровень на поверхности стали. Хотя карбонизация является одним из важных процессов, которые могут инициировать коррозию стали в бетоне, в модели не учитывается, так как редко возникает в бетонных конструкциях, непосредственно подвергающихся воздействию внешней среды. Концентрация хлоридов должна достигать критической пороговой концентрации C_{pk} , чтобы вызвать растворение защитной пассивной пленки вокруг арматуры, тем самым инициируя ее коррозию.

На C_{pk} влияет В/Ц, тип цемента, температура, содержание воды и кислорода, pH, содержание летучей золы и микрокремнезема. Таким образом, следует ожидать, что критическая пороговая концентрация хлорида будет варьироваться, и по этой причине ее необходимо рассматривать как случайную переменную величину.

Например, согласно исследованию [1], средний процент порогового хлорид-иона для инициирования коррозии составляет 0,058 от массы бетона при коэф-

фициенте вариации 0,012, а по концентрации хлорида 1,33 коэффициент вариации составляет 0,282.

Распространение коррозии

Всякий раз, когда концентрация хлоридов на границе раздела бетона и стали достигает порогового уровня, это вызывает коррозию стали, если доступны и вода, и кислород. Хлорид, работающий более или менее в качестве катализатора, в процессе коррозии, существенно не расходуется, в то время как расходуются вода и кислород. В бетоне относительно много воды по сравнению с растворенным кислородом. Следовательно, подача кислорода является контролирующим фактором при определении скорости коррозии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Конечно-элементная модель диффузии

В большинстве случаев уравнение диффузии не имеет решения в замкнутой форме. Можно использовать численный анализ, т.е. метод конечных разностей. Кроме того, учет других эффектов, таких как конвекция, сорбция, растягивающее напряжение и т.п., широко используется в методе конечных элементов. Основное уравнение диффузии хлорида:

$$D \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - G\varphi + Q = 0, \quad (1)$$

где D — коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

Поскольку все рассмотренные уравнения переноса имеют схожую математическую структуру, для решения любого из них требуется единый численный аппарат. Решение уравнения (1) по вариационному методу Бубнова – Галеркина дает

$$\int_{\Omega} W_i \left(D \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - G\varphi + Q \right) d\Omega = 0, \quad (2)$$

где $W_i(x,y)$ — весовая функция; G — функция предельного состояния; Q — количество транспортируемого вещества; Ω — область варьирования.

В области с одним элементом переменная Φ выражается в терминах узловых значений элемента $\Phi^e = [N]\{\Phi^e\}$, где $[N]$ — вектор-строка, содержащий функции интерполяции элементов, связанные с каждым узлом; $\{\Phi^e\}$ — вектор узловых степеней свободы (неизвестный).

Используя функции формы в качестве весовых функций (т.е. $W_i = N_i$, индекс i относится к соответствующему номеру узла) и расширяя члены, остаток элемента принимает вид:

$$\{R^{(e)}\} = - \int_{x_i}^{x_j} [N]^T \left(K \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - G\varphi + Q \right) dA; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \{R^{(e)}\} = & - \int_{x_i}^{x_j} [N]^T \left(D \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - Q \right) \times \\ & \times dx + \int_{x_i}^{x_j} [G][N]^T \varphi dA, \end{aligned} \quad (4)$$

учитывая, что

$$\int_{x_i}^{x_j} [G][N]^T \varphi dA = \left(\int_{x_i}^{x_j} [G][N]^T \varphi dA \right) \{\Phi\}^{(e)}. \quad (5)$$

Вклад состоит из матрицы жесткости элемента $[k^{(e)}]$ и вектора силы элемента $\{f^{(e)}\}$. Остальные векторы

$$\{\Phi^{(e)}\} = \begin{bmatrix} \Phi_i \\ \Phi_j \end{bmatrix} \quad (6)$$

являются вектором-столбцом узловых значений и

$$[k_D^{(e)}] = \frac{D}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$[f_Q^{(e)}] = \frac{QL}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Поскольку интеграл умножается на $\{\Phi\}^{(e)}$, он является частью матрицы жесткости элемента. Если мы определим

$$[k_G^{(e)}] = \int_{x_i}^{x_j} [G][N]^T [N] dx \quad (9)$$

и проинтегрируем

$$[k_G^{(e)}] = \frac{GL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

тогда получим

$$\{R^{(e)}\} = \{I^{(e)}\} + \left(\{k_D^{(e)}\} + \{k_G^{(e)}\} \right) \{\Phi^{(e)}\} - \{f_Q^{(e)}\}, \quad (11)$$

где f_Q — функция плотности вероятности Q и

$$\begin{aligned} \{I^{(e)}\} = & \begin{bmatrix} I_i^{(e)} \\ I_j^{(e)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \frac{d\varphi}{dx} x = x_i \\ -D \frac{d\varphi}{dx} x = x_j \end{bmatrix} = \\ = & \begin{bmatrix} D \frac{d\varphi}{dx} x = x_i \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \frac{d\varphi}{dx} x = x_i \\ -D \frac{d\varphi}{dx} x = x_j \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (12)$$

что является условием конечного элемента в межэлементном требовании.

Это эквивалентно

$$\{I^{(e)}\} = \{I_i^{(e)}\} + \{I_b^{(e)}\}, \quad (13)$$

где $\{I_i^{(e)}\}$ — межэлементное требование; $\{I_b^{(e)}\}$ связан с граничным условием. Однако ненулевой член в $\{I_b^{(e)}\}$ является левой частью уравнения (12). Таким образом:

$$\begin{aligned} \{I_b^{(e)}\} = & \begin{bmatrix} D \frac{d\varphi}{dx} x = x_i \\ -D \frac{d\varphi}{dx} x = x_j \end{bmatrix} = \\ = & \begin{bmatrix} 0 \\ hA\varphi_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ hA\varphi_f \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

Поскольку φ совпадает с Φ_j , уравнение (14) эквивалентно

$$\begin{aligned} \{I_b^{(e)}\} = & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & hA \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_i \\ \Phi_j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ hA\varphi_f \end{bmatrix} = \\ = & [k^{(c)} M] \{\Phi^{(e)}\} - [f_s^{(c)}], \end{aligned} \quad (15)$$

где h — диффузия влаги;

$$[k^{(c)} M] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & hA \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$[f_s^{(c)}] = \begin{bmatrix} 0 \\ hA\varphi_f \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Полное уравнение невязки получается путем замены $\{I_i^{(e)}\}$ в уравнении (11) и имеет вид:

$$\{R^{(e)}\} = [k^{(e)}] \{\Phi^{(e)}\} - \{f\}^{(e)}. \quad (18)$$

Вклад $[k^{(c)} M]$ в $[k^{(e)}]$ происходит только для последнего напрягаемого стержня и только тогда, когда h отличен от нуля на конце стержня. Например, $[k^{(c)} M]$ равно нулю, если конец стержня изолирован. После сборки элементов для всей сетки получается система линейных дифференциальных уравнений первого порядка во временной области:

$$[C]\{\Phi'\} + [K]\{\Phi\} - \{F\} = 0. \quad (19)$$

Это интегрируется во времени с использованием аппроксимации конечных разностей (т.е. переменные $\{\Phi\}^{t+\Delta t}$ в момент времени $t + \Delta t$ оцениваются с точки зрения решения $\{\Phi\}^t$ в момент времени t), используя следующий алгоритм:

$$\begin{aligned} & ([C] + \theta \Delta t [K]) \{\Phi\}^{t+\Delta t} = \\ & = ([C] - (1 - \theta) \Delta t [K]) \{\Phi\}^t + \\ & + \Delta t \left((1 - \theta) \{F\}^t + \theta \{F\}^{t+\Delta t} \right) = 0, \end{aligned} \quad (20)$$

где Δt обозначает приращение времени, а θ — параметр в диапазоне от 0 до 1 (асимптотическая скорость сходимости Δt^2 получается при $\theta = 0,5$).

Распространение коррозии

На второй стадии коррозии процесс протекает на границе раздела бетона и стали за счет потребления кислорода, диффундирующего через защитный слой бетона. Поток кислорода определяет скорость коррозии стали ($w(t)$) [28] в том случае, если:

$$w(t) = \frac{a[Fe]}{n[O_2]} Q(t), \quad (21)$$

где a — отношение площади потока кислорода в бетоне к поверхности арматурного стержня; $[Fe]$ — атомный вес железа; n — число молекул кислорода, израсходованных на окисление каждого атома железа; $[O_2]$ — молекулярный вес кислорода; $Q(t)$ — количество транспортируемого вещества (мг) во времени.

Например, если электрохимическая реакция уравнения (21) протекает в процессе коррозии так, что $n = 0,5$, а для a принимается отношение 1,0, диффузионный поток кислорода 100 мг/см²/год даст скорость коррозии стали, равную 350 мг/см²/год средней скорости потери атмосферостойкой стали.

В упрощенном методе коррозия арматуры может привести к уменьшению диаметра стержня из арматурной стали $D(t)$.

Скорость коррозии может быть наиболее точно измерена при полевых/экспериментальных исследованиях как плотность тока i_{corr} , $\mu\text{A}/\text{см}^2$.

$$\Delta D(t) = 0,0232(t - t_i) i_{corr}; \quad t > t_i, \quad (22)$$

где t_i — время инициации.

Плотность тока и скорость коррозии зависят от наличия воды и кислорода на поверхности стали. Текущая плотность, как функция В/Ц, может быть получена из следующих эмпирических уравнений [21]:

$$i_{corr}(I) = 37,8(1 - B/\Pi)^{-1,64}, \mu\text{A}/\text{см}^2, \quad (23)$$

$$i_{corr}(t_p) = i_{corr}(I)0,85t_p^{-0,29}, \quad (24)$$

где t_p — время, прошедшее с начала коррозии.

На рис. 1 показана функция плотности тока с различным В/Ц, зависящая от времени, рассчитанная с использованием уравнений (23) и (24). С увеличением В/Ц плотность и скорость коррозии будут увеличиваться.

С временем плотность тока и скорость коррозии уменьшаются. Таким образом, из рис. 1 легко увидеть, что предположение о постоянной плотности тока коррозии являются необоснованным.

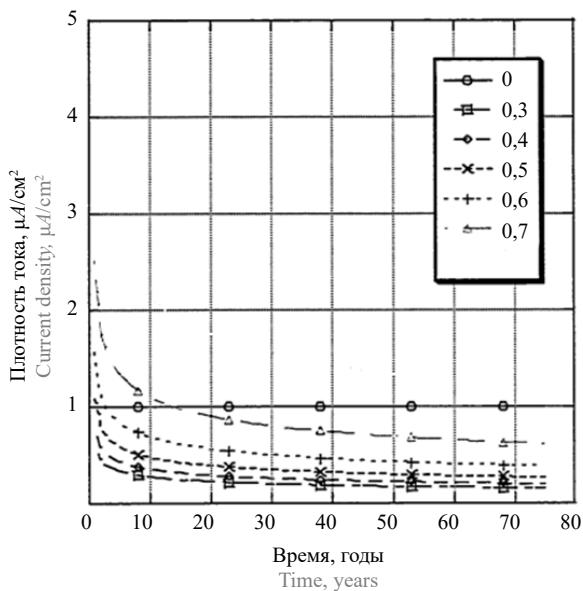


Рис. 1. Зависимость функции плотности тока при различных соотношениях В/Ц от времени

Fig. 1. Tim dependence of the current density function at various water-cement ratios

В свою очередь редуцированную площадь арматуры A_r , можно получить следующим образом:

$$A_r(t) = \frac{\pi}{4} [D_i - \Delta D(t)]^2. \quad (25)$$

На рис. 2 приведено влияние уменьшенной площади одного стержня на общую коррозию каната, рассчитанное с применением уравнения (25). Также можно найти корреляцию между арматурными стержнями

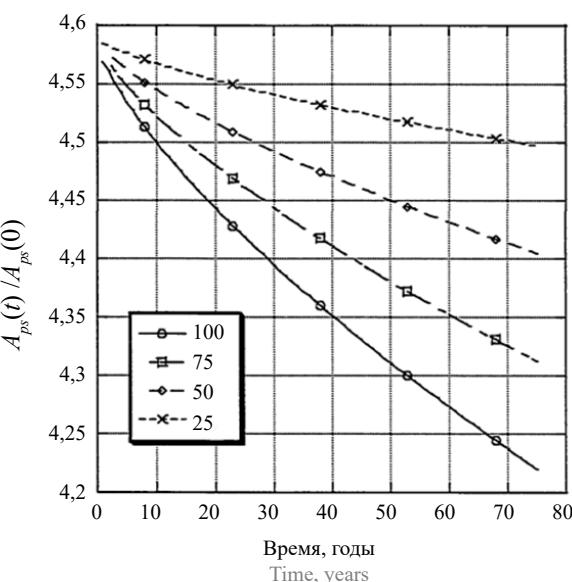


Рис. 2. Уменьшение площади арматуры при изменении соотношения между напрягающими стержнями в предварительно напряженной железобетонной балке

Fig. 2. Reduction in the reinforcement bar area in case of a change in the ratio between tension bars in a pre-stressed reinforced concrete beam

нями, скоростью коррозии и уменьшением площади арматуры.

На рис. 3 показана площадь уменьшения арматуры в нормированном (приведенном) виде.

Уменьшенные площади на каждом временном шаге ($A_{ps}(t)$) делятся на начальную площадь арматуры ($A_{ps}(0)$).

Как видно из рис. 3, в рассмотренных случаях общая площадь уменьшения сечения стержней составляет не более 15 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Получена КЭ модель диффузии хлорида, которая может быть использована для последующей оценки надежности железобетонных конструкций с корродированной арматурой.

Показано, что плотность тока и скорость коррозии зависят от наличия воды и кислорода на поверхности стали, которые нелинейно уменьшаются со временем.

Выявлено, что в предварительно напряженной железобетонной балке коррозия одного стержня влияет на общую коррозию каната, при этом общая площадь уменьшения сечения стержней составляет не более 15 %.

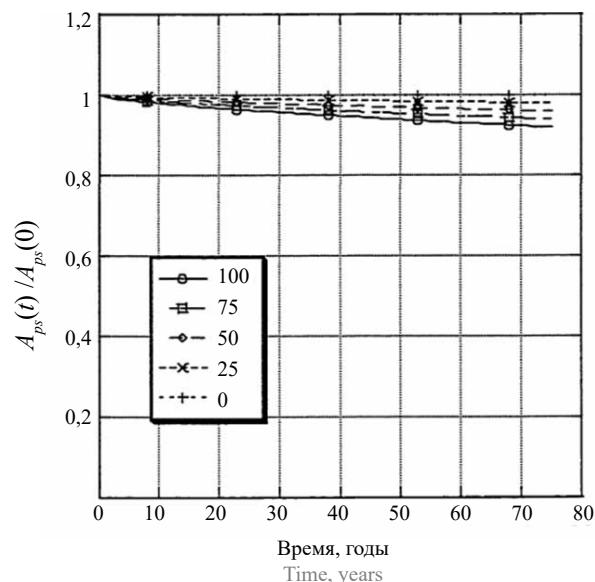


Рис. 3. Нормированное уменьшение площади арматуры при изменении соотношений (%) между корродированными и не корродированными стержнями в предварительно напряженной железобетонной балке

Fig. 3. A normalized reduction in the area of reinforcement bars in case of a change in the ratios (%) between corroded and non-corroded bars in a pre-stressed reinforced concrete beam

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Browne R.D. Mechanisms of corrosion of steel in concrete in relation to design, inspection, repair of offshore and coastal structures // American Concrete Institute, Farmington Hills, Sp-65. 1980. P. 169.
2. Andrade C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements // Cement and Concrete Research. 1993. Vol. 23. Issue 3. Pp. 724–742. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90023-3
3. Tuutti K. Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel // Concrete Structures. 1980. Vol. 1. Pp. 293–301.
4. Atkinson A., Hearne J.A. Mechanistic model for the durability of concrete barriers exposed to sulphate-bearing groundwaters // MRS Proceedings. 1989. Vol. 176. DOI: 10.1557/PROC-176-149
5. Ting, S.-C. The effects of corrosion on the reliability of concrete bridge girders : dissertation of the University of Michigan. 1989.
6. Stewart M.G., Rosowsky D.V. Time-dependent reliability of deteriorating reinforced concrete bridge decks // Structural Safety. 1998. Vol. 20. Issue 1. Pp. 91–109. DOI: 10.1016/S0167-4730(97)00021-0
7. Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой // Строительство и реконструкция. 2022. № 1 (99). С. 89–98. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-99-1-89-98
8. Меркулов С.И. Развитие теории конструктивной безопасности объектов в условиях коррозионных воздействий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 3. С. 44–46.
9. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Логинова С.А. Исследование влияния процессов массопереноса на надежность и долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах // Строительные материалы. 2017. № 12. С. 52–57.
10. Tamrazyan A.G., Koroteev D.D. Assessment of the durability of corrosion-damaged prefabricated reinforced concrete structures // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1687. Issue 1. P. 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1687/1/012009
11. Морозов В.И., Анцыгин О.И., Савченко А.П. Расчет и моделирование работы строительных конструкций с коррозионными повреждениями // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 1 (18). С. 25–30.
12. Смоляго Г.А., Дронов В.И., Дронов А.В., Меркулов С.И. Изучение влияния дефектов железобетонных конструкций на развитие коррозионных процессов арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 12. С. 25–27.
13. Селяев В.П., Неверов В.А., Сорокин Е.В., Юдина О.А. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом сульфатной кор-

- рорози бетона // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 1 (45). С. 41–52. DOI: 10.5862/MCE.45.5
14. *Frangopol D.M., Lin K.Y., Estes A.C.* Reliability of reinforced concrete girders under corrosion attack // Journal of Structural Engineering. 1997. Vol. 123. Issue 3. Pp. 286–297. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1997)123:3(286)
15. *Nogueira K.G., Leonel E.D., Coda H.B.* Reliability algorithms applied to reinforced concrete structures durability assessment // Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 2012. Vol. 5. Issue 4. Pp. 440–450. DOI: 10.1590/s1983-41952012000400003
16. *Каюмов Р.А., Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Манохина Ю.В., Красильников И.В.* Математическое моделирование коррозионного массо-переноса гетерогенной системы «жидкая агрессивная среда – цементный бетон». Частные случаи решения // Известия КГАСУ. 2013. № 4 (26). С. 343–348.
17. *Maekawa K., Chaube R.P., Kishi T.* Coupled mass transport, hydration and structure formation theory for durability design of concrete structures // Conference: International Workshop on Rational Design of Concrete Structures — Integration of Structural Design and Durability Design. 1995.
18. *Martín-Pérez B., Pantazopoulou S.J., Thomas M.D.A.* Numerical solution of mass transport equations in concrete structures // Computers & Structures. 2001. Vol. 79. Issue 13. Pp. 1251–1264. DOI: 10.1016/S0045-7949(01)00018-9
19. *Murphy F.G.* CIRIA Report 71. London.
20. *Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G.* The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 2 (94). С. 56–62. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-94-2-56-62
21. *Fu X., Chung D.D.L.* Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar // Cement and Concrete Research. 1997. Vol. 27. Issue 12. Pp. 1811–1815. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00172-5
22. Stress corrosion of prestressing steel // Proceedings 2-nd Symposium on 20–21 September. Netherlands, 1973.
23. *CEB/FIP 90* // Structural Concrete. 1990. Vol. 2. Pp. 124–126.
24. *Cabrera J.G.* Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion // Cement and Concrete Composites. 1996. Vol. 18. Issue 1. Pp. 47–59. DOI: 10.1016/0958-9465(95)00043-7
25. *Khan I., Francois R., Castel A.* Prediction of reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams // Cement and Concrete Research. 2014. Vol. 56. Pp. 84–96. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.006
26. *Гусев Б.В., Файвусович А.С.* Физико-математическая модель процессов коррозии арматуры железобетонных конструкций в агрессивных средах: теория. М. : Научный мир, 2009. 54 с.
27. *Тамразян А.Г., Минеев М.С.* Калибровка модели коррозионного растрескивания защитного слоя бетона // Строительство и реконструкция. 2021. № 2 (94). С. 56–62. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-94-2-56-62
28. *Nowak A.S., Nassif H., DeFrain L.* Effect of truck loads on bridges // Journal of Transportation Engineering. 1993. Vol. 119. Issue 6. Pp. 853–867. DOI: 10.1061/(asce)0733-947x(1993)119:6(853)

Поступила в редакцию 21 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 3 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 8 ноября 2022 г.

О Б А В Т О Р АХ: **Татьяна Анатольевна Мацеевич** — доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой высшей математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1299-6980, ORCID: 0000-0001-6292-0759, Scopus: 51461741900; MatseevichTA@mgsu.ru;

Илья Федорович Андреев — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4056-0171, ORCID: 0000-0001-9339-8078; yfyf@gmx.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Browne R.D. Mechanisms of corrosion of steel in concrete in relation to design, inspection, repair of offshore and coastal structures. *American Concrete Institute, Farmington Hills, Sp-65.* 1980; 169.
2. Andrade C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. *Cement and Concrete Research.* 1993; 23(3):724-742. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90023-3
3. Tuutti K. Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel. *Concrete Structures.* 1980; 1:293-301.
4. Atkinson A., Hearne J.A. Mechanistic model for the durability of concrete barriers exposed to sulphate-

- bearing groundwaters. *MRS Proceedings*. 1989; 176. DOI: 10.1557/PROC-176-149
5. Ting S.-C. *The effects of corrosion on the reliability of concrete bridge girders : dissertation of the University of Michigan*. 1989.
6. Stewart M.G., Rosowsky D.V. Time-dependent reliability of deteriorating reinforced concrete bridge decks. *Structural Safety*. 1998; 20(1):91-109. DOI: 10.1016/S0167-4730(97)00021-0
7. Tamrazyan A.G., Matsevich T.A. Reliability analysis of reinforced concrete slabs with corroded reinforcements. *Building and Reconstruction*. 2022; 1(99):89-98. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-99-1-89-98 (rus.).
8. Merkulov S.I. Development of the theory of constructive safety of objects in the conditions of corrosion impacts. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2014; 3:44-46. (rus.).
9. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Loginova S.A. Study of effect of mass transfer processes on reliability and durability of reinforced concrete structures operating in liquid aggressive media. *Construction Materials*. 2017; 12:52-57. (rus.).
10. Tamrazyan A.G., Koroteev D.D. Assessment of the durability of corrosion-damaged prefabricated reinforced concrete structures. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1687(1):012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1687/1/012009
11. Morozov V.I., Antsygin O.I., Savchenko A.P. Calculating and modeling the operation of structures with corrosion damages. *Bulletin of Civil Engineers*. 2009; 1(18):25-30. (rus.).
12. Smolyago G.A., Dronov V.I., Dronov A.V., Merkulov S.I. Investigation of influence of defects of reinforced concrete structures on corrosion processes of steel reinforcement. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 12:25-27. (rus.).
13. Selyaev S.V., Neverov N.V., Selyaev S.P., Sorokin S.E., Yudina Yu.O. Predicting the durability of concrete structures, including sulfate corrosion of concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 1(45):41-52. DOI: 10.5862/MCE.45.5 (rus.).
14. Frangopol D.M., Lin K.Y., Estes A.C. Reliability of reinforced concrete girders under corrosion attack. *Journal of Structural Engineering*. 1997; 123(3):286-297. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1997)123:3(286)
15. Nogueira K.G., Leonel E.D., Coda H.B. Reliability algorithms applied to reinforced concrete structures durability assessment. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2012; 5(4):440-450. DOI: 10.1590/s1983-41952012000400003
16. Kayumov R.A., Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Khrunov V.A., Manohina Yu.V., Krasilnikov I.V. Mathematical modeling of corrosion mass transfer of the heterogeneous system "corrosive liquids – cement concrete". Special cases of the solutions. *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2013; 4(26):343-348. (rus.).
17. Maekawa K., Chaube R.P., Kishi T. Coupled mass transport, hydration and structure formation theory for durability design of concrete structures. *Conference: International Workshop on Rational Design of Concrete Structures — Integration of Structural Design and Durability Design*. 1995.
18. Martín-Pérez B., Pantazopoulou S.J., Thomas M.D.A. Numerical solution of mass transport equations in concrete structures. *Computers & Structures*. 2001; 79(13):1251-1264. DOI: 10.1016/S0045-7949(01)00018-9
19. Murphy F.G. *CIRIA Report 71*. London.
20. Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 4(80):128-137. DOI: 10.18720/MCE.80.12
21. Fu X., Chung D.D.L. Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar. *Cement and Concrete Research*. 1997; 27(12):1811-1815. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00172-5
22. Stress corrosion of prestressing steel. *Proceedings 2-nd Symposium on 20-21 September*. Netherlands, 1973.
23. CEB/FIP 90. *Structural Concrete*. 1990; 2:124-126.
24. Cabrera J.G. Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion. *Cement and Concrete Composites*. 1996; 18(1):47-59. DOI: 10.1016/0958-9465(95)00043-7
25. Khan I., Francois R., Castel A. Prediction of reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams. *Cement and Concrete Research*. 2014; 56:84-96. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.006
26. Gusev B.V., Faivusovich A.S. *Physical-Mathematical Model of Reinforcement Corrosion Processes in Reinforced Concrete Structures in Aggressive Environments: theory*. Moscow, Scientific world, 2009; 54. (rus.).
27. Tamrazyan A.G., Mineev M.S. Calibration of the corrosion cracking model of protective concrete layer. *Building and Reconstruction*. 2021; 2(94):56-62. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-94-2-56-62 (rus.).
28. Nowak A.S., Nassif H., DeFrain L. Effect of truck loads on bridges. *Journal of Transportation Engineering*. 1993; 119(6):853-867. DOI: 10.1061/(asce)0733-947x(1993)119:6(853)

Received October 21, 2022.

Adopted in revised form on November 3, 2022.

Approved for publication on November 8, 2022.

BIO NOTES: **Tatyana A. Matseevich** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1299-6980, ORCID: 0000-0001-6292-0759, Scopus: 51461741900ID; MatseevichTA@mgsu.ru;

Ilya F. Andreev — postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4056-0171, ORCID: 0000-0001-9339-8078; yfyf@gmx.com.

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

The authors declare no conflicts of interest.

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 556.535.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1471-1477

Настройка пользовательского интерфейса для оценки стока в бассейне реки Эль-Аси с использованием искусственного интеллекта

Алаа Слейман, Дмитрий Вячеславович Козлов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Поверхностный сток имеет большое значение в процессах формирования водных ресурсов речного бассейна. Целью данного исследования является разработка пользовательского интерфейса для численного решения задачи оценки стока в бассейне реки Эль-Аси (Оронтес) в Сирии с использованием моделей искусственного интеллекта.

Материалы и методы. Для проектирования пользовательского интерфейса использован метод искусственных нейронных сетей. Поставленная задача выполнялась в три процедурных этапа: обучение, проверка и тестирование. Были отработаны несколько типов модельных алгоритмов. Сравнение эффективности моделей проводилось с помощью коэффициента корреляции и среднеквадратической ошибки.

Результаты. Установлено, что искусственные нейронные сети с прямой связью (FFNN) и алгоритмом обучения с обратным распространением (BP) (Feed forward (FF) back propagation (BP) ANN) показали лучший результат в гидрологических прогнозах и моделировании нелинейных функций, поэтому они и были применены в пользовательском интерфейсе. Разработанное программное средство экономит время и усилия пользователя, поскольку генерирует очень большую группу моделей в соответствии с различными параметрами и функциями и выбирает лучшую модель по критериям их эффективности (коэффициенту корреляции R и среднеквадратической ошибке RMSE), и позволяет выполнять другие операции, например, такие как графическое отображение выходных данных или структуры принятой модели или начало оценки значений стока. Программа построена в рабочей среде числовых вычислений MATLAB.

Выводы. Программное средство отличается простотой и удобством применения в соответствии с разработанной пользовательской методикой, которая легко выстраивается с момента запуска программы через последовательность активации команд интерфейса до демонстрации выходных результатов. Рекомендовано расширить использование моделей искусственного интеллекта для прогнозирования и оценки элементов гидрологического цикла, особенно в случае отсутствия доступных исходных данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: речной сток, оценка, искусственный интеллект, искусственные нейронные сети, пользовательский интерфейс, MATLAB, прогнозирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Слейман А., Козлов Д.В. Настройка пользовательского интерфейса для оценки стока в бассейне реки Эль-Аси с использованием искусственного интеллекта // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1471–1477. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1471-1477

Автор, ответственный за переписку: Алаа Слейман, alaa-slieman@hotmail.com.

Configuration of user interface for evaluation of runoff in Orontes basin using artificial intelligence

Alaa Slieman, Dmitry V. Kozlov

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

ABSTRACT

Introduction. Surface runoff is of great importance for water resources formation processes in a river basin. The purpose of this study is to develop a user interface for a numerical solution to the problem of evaluating the runoff in the El-Asi (Orontes) River basin in Syria using artificial intelligence models.

Materials and methods. The method of artificial neural networks was used to design the user interface. The task was solved in three stages: training, verification and testing. Several types of model algorithms were tested. Efficiency values were compared for different models using correlation coefficients and the mean root square error.

Results. The authors have found that feed-forward artificial neural networks and back propagation artificial neural networks show the best result if used to make hydrological forecasts and simulate nonlinear functions; that's why they were applied to the user interface. The developed software tool saves the user's time and effort, because it generates a very large group of models pursuant to various parameters and functions. It selects the best model according to the effectiveness criteria

(such as correlation coefficient R and mean root square error MRSE), and allows the performance of other operations, such as the graphical representation of output data, the structure of the model used or the onset of evaluation of runoff values. The software is developed in the operational environment of MATLAB.

Conclusions. The software tool is simple and user friendly; it complies with the user-focused methodology, which is easily implemented from the moment the software, is launched through the sequence of activated interface commands. It is recommended to expand the use of artificial intelligence models for forecasting and evaluating elements of the hydrological cycle, especially in absence of source data.

KEYWORDS: runoff, evaluation, artificial intelligence, artificial neural networks, user interface, MATLAB, forecasting

FOR CITATION: Slieman A., Kozlov D.V. Configuration of user interface for evaluation of runoff in Orontes basin using artificial intelligence. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1471-1477. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1471-1477 (rus.).

Corresponding author: Alaa Slieman, alaa-slieman@hotmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностный сток имеет большое значение в процессах формирования водных ресурсов речного бассейна, являясь одним из наиболее важных элементов гидрологического цикла. Способность достаточно точно оценить этот фактор имеет важное значение как в гидрологическом моделировании, так и при исследовании водного баланса водосборов.

На протяжении десятилетий эта тема привлекает внимание многих исследователей. Целый ряд специалистов достаточно широко применяли для моделирования процессов «осадки – сток» на водосборах систему гидрологического моделирования HEC-HMS и получали хорошие результаты [1–5]. В то же время другие исследователи использовали компьютерную модель MIKE, и точность их результатов в значительной степени зависела от географического положения рассматриваемого речного бассейна, а также достоверности и многообразия исходных данных [6–10]. Программа ArcSWAT неоднократно использовалась при моделировании поверхностных вод суши. Полученные результаты получили хорошие значения оценочных критериев как на этапе валидации, так и в процессе тестирования [11, 12].

В последние годы технологии искусственного интеллекта (ИИ), в том числе искусственные нейронные сети, приобрели большое значение в инженерной гидрологии. Было проведено много исследований в области прогнозирования и моделирования элементов гидрологического цикла, включая речной сток, с использованием искусственных нейронных сетей и оценки эффективности этих моделей ИИ [13–18].

Так, например, (Sharda et al., 2006) использовали искусственные нейронные сети для прогнозирования речного стока на водосборах Средних Гималаев, получив хорошие результаты с высокими значениями коэффициента корреляции, и приходя к выводам, что эффективность таких моделей ИИ может быть повышена путем увеличения объема исходной информации, используемой в процессе построения модели [19]. (Aytek et al., 2008) использовали модели искусственного интеллекта для моделирования взаимосвязи стока и осадков, получив хорошие результаты, отдавая предпочтение генетическим

алгоритмам [20]. Кроме того, (Chen et al., 2013) использовали модели искусственных нейронных сетей для оценки дождевого стока по данным об осадках. На основании анализа значений критериев эффективности эти модели показали высокую надежность полученных результатов [21].

В рамках рассматриваемой территории верхней части бассейна реки Эль-Аси (Оронтес) в Сирии был проведен ряд исследований по оценке поверхностного стока и взаимосвязи дождевых осадков и стока [22, 23], но ни в одном исследовании не рассматривалась возможность применения моделей искусственного интеллекта для решения таких задач.

Целью данного исследования является разработка пользовательского интерфейса для численной оценки стока в бассейне реки Эль-Аси (Оронтес) с использованием моделей искусственного интеллекта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено для условий верхней части бассейна реки Эль-Аси, расположенной между сирийско-ливанской границей и озером Каттина. Данные об этом речном стоке были взяты с гидрометрической станции Аль-Амири на сирийско-ливанской границе и станции Аль-Джавадия в месте впадения реки в озеро Каттина (рис. 1).

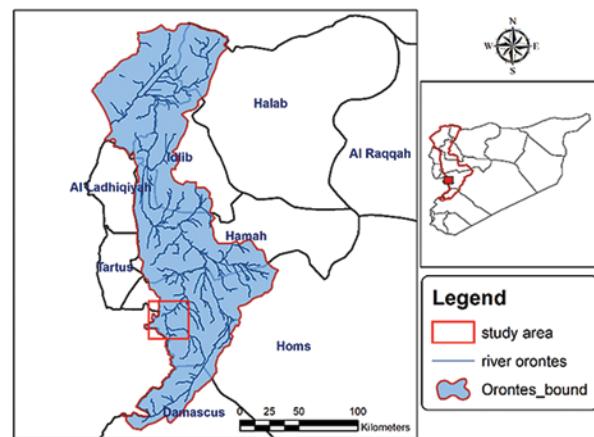


Рис. 1. Объект исследования — верхняя часть бассейна реки Эль-Аси

Fig. 1. The subject of research is the upper part of the Al-Asi River basin

Искусственные нейронные сети — это математическая модель и ее программно-аппаратное воплощение, построенная по организационно-функциональному принципу биологических нейронных сетей, в основу которой положен метод обработки данных с помощью нейронных систем, имитирующих работу человеческого мозга [21].

Искусственные нейронные сети с прямой связью (FFNN), обученные алгоритмом с обратным распространением (BP), считаются одними из самых известных и распространенных типов многослойных нейронных сетей при решении различных инженерных задач. В своей работе они зависят от моделирования структуры FFNN и используемого метода биологических нейронных сетей [24]. Следует отметить, что искусственные нейронные сети с прямой связью (FFNN) и алгоритмом обучения с обратным распространением (BP) считаются лучшими в гидрологических прогнозах и моделировании нелинейных функций с произвольным числом входных данных [21].

Для того чтобы обучение нейронных сетей происходило автоматически, сравнение моделей проводилось на основе критериев их эффективности (коэффициента корреляции и среднеквадратической ошибки). А чтобы проектируемый пользовательский интерфейс выдавал наилучшую нейронную сеть, также выполнялось сравнение моделей по значениям критериев эффективности для каждого из трех процедурных этапов: обучения, проверки и тестирования.

В данном исследовании использовалась уровневая модель нейронной сети, состоящая из трех слоев (уровней).

1. Входного, содержащего ряд нейронов, которые автоматически идентифицируются в соответствии с исходными данными, введенными в модель, представляющими собой информацию о речном стоке на целевой (выходной) гидрометрической станции с задержкой по времени или сток на близ-

лежащих станциях, связанных с целевой станцией, или даже осадки, наблюдаемые в пределах речного бассейна или районов, близких к рассматриваемой территории.

2. Выходного (целевого), содержащего один нейрон, представляющий собой поверхностный сток на целевой станции.

3. Одного скрытого слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Входные данные для задачи создания и использования интерфейса характеризуются неопределенностью, неоднозначностью и неполнотой исходной информации, представляя собой имеющиеся наблюдаемые значения и оценки стока в верхней части бассейна реки Эль-Аси. Код основной программы вычисления для интерфейса был написан на языке программирования операционной среды MATLAB. Создание пользовательского интерфейса выполнено с учетом особенностей данных о стоке на рассматриваемом водосборе. Было протестировано большое количество искусственных нейронных сетей и алгоритмов обучения. Подтверждено, что искусственные нейронные сети с прямой связью (Feed forward (FF) NN) и алгоритмом обучения с обратным распространением (Back propagation (BP)) демонстрируют лучшие результаты в гидрологических прогнозах и моделировании нелинейных функций, поэтому именно они и были применены при создании кода для пользовательского интерфейса.

Кроме того, при разделении данных в процессе обучения модели (на тестовые и тренировочные) был использован метод блоков (кросс-валидация по K блокам (K -Fold Cross Validation)), что повышает эффективность сравнения моделей.

С методической точки зрения интерфейс программы характеризуется последовательной работой, так как начинается с момента ввода исходной информации, затем выполняются нормализация и разделение введенных данных, выбор числа нейронов

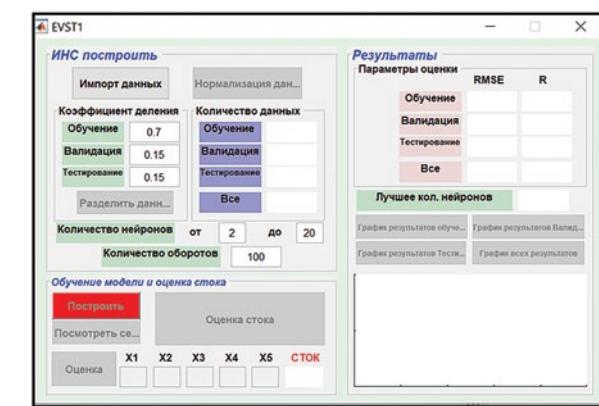


Рис. 2. Предлагаемый интерфейс программы с основными элементами

Fig. 2. The proposed interface and its main elements

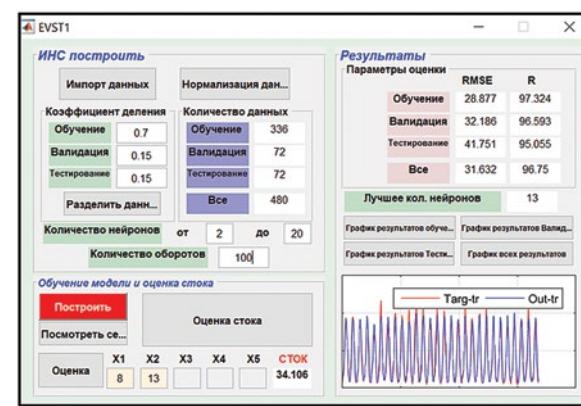


Рис. 3. Использование интерфейса в процессе оценки речного стока

Fig. 3. Using the interface in the process of the river runoff evaluation

и количества обратных распространений (оборотов), затем происходит обучение нейронной сети и оценка стока, и демонстрация выходных результатов в виде структуры принятой модели (сети) и перечня параметров эффективности выбранной сети (рис. 2).

Дальнейшее представление результатов связано с графическим отображением выходных данных, оценкой значений стока и количественными

результатами критериев эффективности принятой модели либо путем прямого ввода, либо оценкой для сохраненного набора данных в файле (рис. 3). Графические результаты из финального окна пользовательского интерфейса для трех процедурных этапов (обучения, валидации (проверки) и тестирования) и итоговых (выходных) данных по стоку представлены на рис. 4.

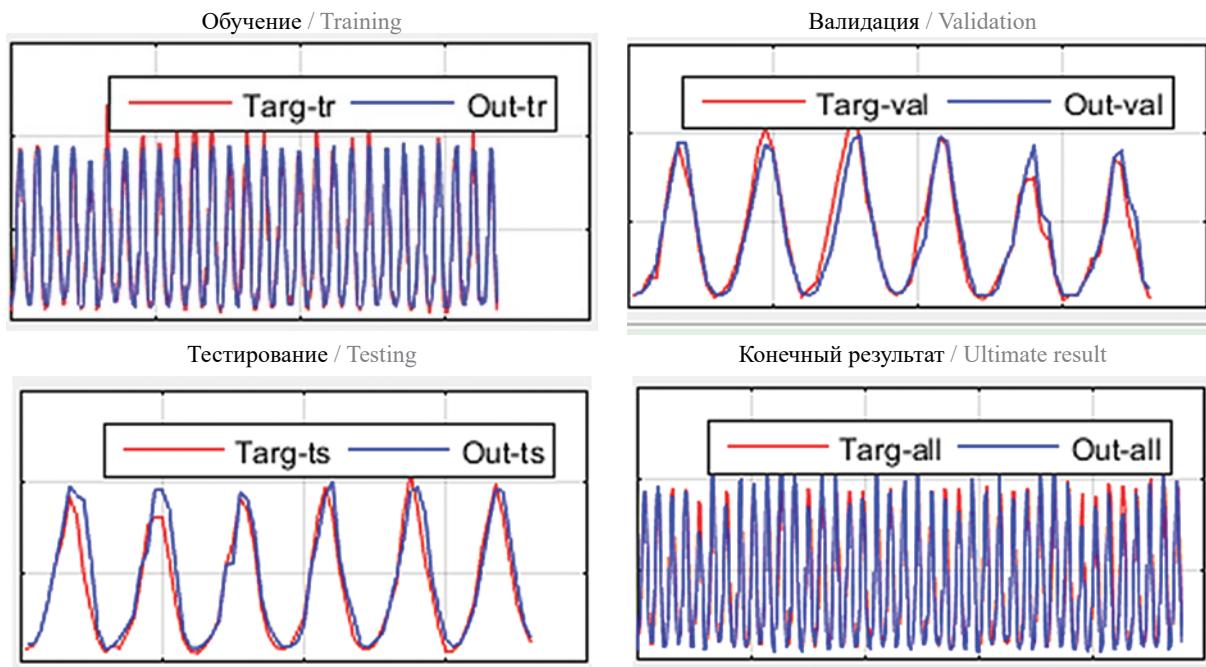


Рис. 4. Графические результаты из окна пользовательского интерфейса

Fig. 4. Graphical representation of results in the user interface window

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанное программное средство экономит время и усилия пользователя, поскольку позволяет генерировать очень большую группу моделей искусственного интеллекта с использованием различных параметров и функций, выбирая лучшую модель по значениям целевых функций (критериям эффективности), таким как среднеквадратическая ошибка RMSE и коэффициент корреляции R . Кроме того, пользовательская программа позволяет выполнять и другие операции, такие как графическое отображение (изображение) выходных данных, отображение структуры принятой

модели или начального момента оценки значений сточного стока.

Программное средство отличается простотой и удобством использования предложенной методики, которая достаточно легко реализуется через последовательность активации команд пользовательского интерфейса. По результатам выполненного исследования с применением разработанного пользовательского интерфейса рекомендуется расширить использование моделей искусственного интеллекта для прогнозирования и оценки элементов гидрологического цикла, особенно в случае полного отсутствия или недостаточности доступных исходных данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hammouri N., El-Naqa A. Hydrological modeling of ungauged wadis in arid environments using GIS: a case study of Wadi Madoneh in Jordan // Revista Mexicana de Ciencias Geologicas. 2007. Vol. 27 (2). Pp. 185–196. URL: <https://www.redalyc.org/pdf/572/57224205.pdf>
2. Abushandi E., Merkel B. Modelling rainfall-runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an Arid region of Jordan // Water Resources Management. 2013. Vol. 27. Pp. 2391–2409. DOI: 10.1007/s11269-013-0293-4

3. *Derdour A., Bouanani A., Babahamed K.* Modelling rainfall-runoff relations using HEC-HMS in a semi-arid region: Case study in Ain Sefra watershed, Ksour Mountains (SW Algeria) // *Journal of Water and Land Development*. 2017. Vol. 36. Issue 1. Pp. 45–55. DOI: 10.2478/jwld-2018-0005
4. *Haddad A., Remini B.* Extreme rainfall-runoff events modeling by HEC-HMS model for Koudiet Rosfa watershed, Algeria // *GeoScience Engineering*. 2021. Vol. 67. Issue 4. Pp. 144–155. DOI: 10.35180/gse-2021-0060
5. *Hamdan A.N.A., Almuktar S., Scholz M.* Rainfall-runoff modeling using the HEC-HMS model for the Al-Adhaim river catchment, Northern Iraq // *Hydrology*. 2021. Vol. 8. Issue 2. P. 58. DOI: 10.3390/hydrology8020058
6. *Kok M.T., Wei K.S., Chien L.W., Huiling J.K., Suresh B.P.* Evaluation of performance of Active, Beautiful and Clean (ABC) on stormwater runoff management using MIKE URBAN: a case study in a residential estate in Singapore // *Urban Water Journal*. 2019. Vol. 16. Issue 2. Pp. 156–162. DOI: 10.1080/1573062X.2019.1634744
7. *Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V.* Assessment of applicability of mike 11 NAM hydrological module for rainfall-runoff modelling in a poorly studied river basin // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 7. С. 1030–1046. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1030-1046
8. *Aredo M.R., Hatiye S.D., Pingale S.M.* Modeling the rainfall-runoff using MIKE 11 NAM model in Shaya catchment, Ethiopia // *Modeling Earth Systems and Environment*. 2021. Vol. 7. Issue 4. Pp. 2545–2551. DOI: 10.1007/s40808-020-01054-8
9. *Ghosh A., Roy M.B., Roy P.K.* Evaluating the performance of Mike Nam model on rainfall-runoff in Lower Gangetic floodplain, West Bengal, India // *Modeling Earth Systems and Environment*. 2022. Vol. 8. Issue 3. Pp. 4001–4017. DOI: 10.1007/s40808-020-01054-8
10. *Shamsudin S., Hashim N.* Rainfall-runoff simulation using MIKE11 Nam // *Journal Kejuruteraan Awam (Journal of civil engineering)*. 2022. Vol. 15. Issue 2.
11. *Santra P., Das B.S.* Modeling runoff from an agricultural watershed of western catchment of Chilika lake through ArcSWAT // *Journal of Hydro-Environment Research*. 2013. Vol. 7. Issue 4. Pp. 261–269. DOI: 10.1016/j.jher.2013.04.005
12. *Saade J., Atieh M., Ghanimeh S., Golmohammadi G.* Modeling impact of climate change on surface water availability using SWAT model in a Semi-Arid basin: Case of El Kalb river, Lebanon // *Hydrology*. 2021. Vol. 8. Issue 3. P. 134. DOI: 10.3390/hydrology8030134
13. *Биденко С.И., Храмов И.С., Шилин М.Б.* Оценка территориальной ситуации с использованием искусственных нейронных сетей // Ученые записки Российской государственной гидрометеорологической академии. 2019. № 54. С. 109–123. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-54-109-123 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37289687>
14. *Гордеева С.М., Малинин В.Н.* Использование DATA MINING в задаче гидрометеорологического прогнозирования // Ученые записки Российской государственной гидрометеорологической академии. 2016. № 44. С. 30–44.
15. *Гордеева С.М., Малинин В.Н.* О предвычислении годового стока крупных рек Европейской части России на основе метода деревьев решений (DECISION TREES) // Ученые записки Российской государственной гидрометеорологической академии. 2018. № 50. С. 53–65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32761979>
16. *Зеленцов В.А., Потрясаев С.А., Пиманов И.Ю., Пономаренко М.Р.* Автоматизация мониторинга и комплексного моделирования гидрологической обстановки в бассейнах рек // Ученые записки Российской государственной гидрометеорологической академии. 2019. № 55. С. 74–85. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-55-74-85 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38512336>
17. *Карапетян Т.А.* Использование искусственных нейронных сетей для оценки и прогнозирования речных стоков // *Молодой ученый. Технические науки*. 2019. Т. 19 (257). С. 30–33. URL: <https://moluch.ru/archive/257/58964>
18. *Шитиков В.К., Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В.* Нейросетевые методы оценки качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2002. Т. 4. № 2. С. 280–289. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=7556355>
19. *Sharda V.N., Patel R.M., Prasher S.O., Ojasvi P.R., Prakash C.* Modeling runoff from middle Himalayan watersheds employing artificial intelligence techniques // *Agricultural Water Management*. 2006. Vol. 83. Issue 3. Pp. 233–242. DOI: 10.1016/j.agwat.2006.01.003
20. *Aytek A., Asce M., Alp M.* An application of artificial intelligence for rainfall-runoff modeling // *Journal of Earth System Science*. 2008. Vol. 117. Issue 2. Pp. 145–155. DOI: 10.1007/s12040-008-0005-2
21. *Chen S.M., Wang Y.M., Tsou I.* Using artificial neural network approach for modelling rainfall-runoff due to typhoon // *Journal of Earth System Science*. 2013. Vol. 122. Issue. 2. Pp. 399–340. DOI: 10.1007/s12040-013-0289-8
22. *Issa M.* The relationship between river flow and precipitation in the Orontes Basin // *Damascus University Journal*. 2015. Vol. 31. Issue 2.
23. *Hamdan Y., Layos E., Mohammed I.* Identify indicators of climate change through the analysis of the amount of rain on upper basin for Orontes River // *Al-Baath University Journal*. 2017. Vol. 39 (43).

24. Nourani V., Gokcekun H., Gelete G. Estimation of suspended sediment load using artificial intel-

ligence-based ensemble model // Hindawi complexity. 2021. Vol. 2021. Pp. 1–19. DOI: 10.1155/2021/6633760

Поступила в редакцию 14 июля 2022 г.

Принята в доработанном виде 11 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 19 октября 2022 г.

О Б А Т О Р АХ: Алаа Слейман — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, оф. 606 Г; РИНЦ ID: 1105320; alaa-slieman@hotmail.com;

Дмитрий Вячеславович Козлов — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, оф. 606 Г; РИНЦ ID: 613295, Scopus: 36787104800, ResearcherID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341; kozlovdv@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Hammouri N., El-Naqa A. Hydrological modeling of ungauged wadis in arid environments using GIS: a case study of Wadi Madoneh in Jordan. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*. 2007; 27(2):185-196. URL: <https://www.redalyc.org/pdf/572/57224205.pdf>
2. Abushandi E., Merkel B. Modelling rainfall-runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an Arid region of Jordan. *Water Resources Manage*. 2013; 27:2391-2409. DOI: 10.1007/s11269-013-0293-4
3. Derdour A., Bouanani A., Babahamed K. Modelling rainfall-runoff relations using HEC-HMS in a semi-arid region: Case study in Ain Sefra watershed, Ksour Mountains (SW Algeria). *Journal of Water and Land Development*. 2017; 36(1):45-55. DOI: 10.2478/jwld-2018-0005
4. Haddad A., Remini B. Extreme rainfall-runoff events modeling by HEC-HMS model for Koudiet Rosfa watershed, Algeria. *GeoScience Engineering*. 2021; 67(4):144-155. DOI: 10.35180/gse-2021-0060
5. Hamdan A.N.A., Almuktar S., Scholz M. Rainfall-runoff modeling using the HEC-HMS model for the Al-Adhaim river catchment, Northern Iraq. *Hydrology*. 2021; 8(2):58. DOI: 10.3390/hydrology8020058
6. Kok M.T., Wei K.S., Chien L.W., Huiling J.K., Suresh B.P. Evaluation of performance of Active, Beautiful and Clean (ABC) on stormwater runoff management using MIKE URBAN: a case study in a residential estate in Singapore. *Urban Water Journal*. 2019; 16(2):156-162. DOI: 10.1080/1573062X.2019.1634744
7. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Assessment of applicability of mike 11 NAM hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(7):1030-1046. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1030-1046
8. Areo M.R., Hatiye S.D., Pingale S.M. Modeling the rainfall-runoff using MIKE 11 NAM model in Shaya catchment, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2021; 7(4):2545-2551. DOI: 10.1007/s40808-020-01054-8
9. Ghosh A., Roy M.B., Roy P.K. Evaluating the performance of Mike Nam model on rainfall-runoff in Lower Gangetic floodplain, West Bengal, India. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2022; 8(3):4001-4017. DOI: 10.1007/s40808-020-01054-8
10. Shamsudin S., Hashim N. Rainfall-runoff simulation using MIKE11 Nam. *Journal Kejuruteraan Awam (Journal of civil engineering)*. 2022; 15(2).
11. Santra P., Das B.S. Modeling runoff from an agricultural watershed of western catchment of Chilika lake through ArcSWAT. *Journal of Hydro-Environment Research*. 2013; 7(4):261-269. DOI: 10.1016/j.jher.2013.04.005
12. Saade J., Atieh M., Ghanimeh S., Golmohammadi G. Modeling impact of climate change on surface water availability using SWAT model in a Semi-Arid basin: Case of El Kalb river, Lebanon. *Hydrology*. 2021; 8(3):134. DOI: 10.3390/hydrology8030134
13. Bidenko S.I., Khramov I.S., Shilin M.B. Assessment of the territorial situation using artificial neural networks. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2019; 54:109-123. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-54-109-123 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37289687> (rus.).
14. Gordeeva S.M., Malinin V.N. Use of data mining in hydrometeorological forecasting. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2016; 44:30-44. (rus.).
15. Gordeeva S.M., Malinin V.N. On predicting annual runoff of large rivers of European Russia based on decision trees method. *Proceedings of the Russian*

- State Hydrometeorological University. 2018; 50:53-65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32761979> (rus.).
16. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Pimanov I.Yu., Ponomarenko M.R. Automation of monitoring and integrated modeling of hydrological situation in river basins. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2019; 55:74-85. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-55-74-85 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38512336> (rus.).
17. Karapetyan T.A. Using artificial neural networks to assess and predict river flows. *Young scientist. Technical Sciences*. 2019; 19(257):30-33. URL: <https://moluch.ru/archive/257/58964/> (rus.).
18. Shitikov V.K., Zinchenko T.D., Golovatyuk L.V. Methods of neural networks for estimation of superficial waters quality by usage of hydrobiological exponents. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2002; 4(2):280-289. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=7556355> (rus.).
19. Sharda V.N., Patel R.M., Prasher S.O., Ojasvi P.R., Prakash C. Model runoff from middle Himalayan watersheds employing artificial intelligence techniques. *Agricultural Water Management*. 2006; 83(3):233-242. DOI: 10.1016/j.agwat.2006.01.003
20. Aytek1 A., Asce M., Alp M. An application of artificial intelligence for rainfall-runoff modeling. *Journal of Earth System Science*. 2008; 117(2):145-155. DOI: 10.1007/s12040-008-0005-2
21. Chen S.M., Wang Y.M., Tsou I. Using artificial neural network approach for modelling rainfall-runoff due to typhoon. *Journal of Earth System Science*. 2013; 122(2):399-340. DOI: 10.1007/s12040-013-0289-8
22. Issa M. The relationship between river flow and precipitation in the Orontes Basin. *Damascus University Journal*. 2015; 31(2).
23. Hamdan Y., Layos E., Mohammed I. Identify indicators of climate change through the analysis of the amount of rain on upper basin for Orontes River. *Al-Baath University Journal*. 2017; 39(43).
24. Nourani V., Gokcekus H., Gelete G. Estimation of suspended sediment load using artificial intelligence-based ensemble model. *Hindawi complexity*. 2021; 2021:1-19. DOI: 10.1155/2021/6633760

Received July 14, 2022.

Adopted in revised form on October 11, 2022.

Approved for publication on October 19, 2022.

BIO NOTES: Alaa Slieman — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering;

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); office 606 G, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1105320; alaa-slieman@hotmail.com;

Dmitry V. Kozlov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; office 606 G, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 613295, Scopus: 36787104800, ResearcherID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341; kozlovdv@mail.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Численные решения задач неустановившейся фильтрации в гидротехнике

Николай Алексеевич Анискин, Станислав Алексеевич Сергеев

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

АНОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается решение задачи неустановившейся фильтрации в глинистом ядре высокой каменно-земляной плотины на примере плотины Нурекской ГЭС. Приводится обзор исследований и методов расчета задач неустановившейся фильтрации. С использованием программного комплекса Plaxis 2D получено численное решение фильтрационной задачи для глинистого ядра каменно-земляной плотины по его насыщению водой в процессе наполнения водохранилища и эксплуатации. Рассмотрен длительный временной период эксплуатации 30 лет.

Материалы и методы. Исследования неустановившегося фильтрационного режима на примере глинистого ядра высокой каменно-земляной плотины Нурекского гидроузла выполнены методом конечных элементов (МКЭ) с помощью программного комплекса Plaxis 2D. На сегодняшний день качественно более высокий уровень решения подобных задач достигается с помощью численных методов и, прежде всего, МКЭ. Решение фильтрационной задачи в большинстве применяемых вычислительных программ и комплексов сводится к решению основного дифференциального уравнения теории фильтрации с использованием известных граничных и начального условий.

Результаты. Получено численное решение фильтрационной задачи для глинистого ядра каменно-земляной плотины по его насыщению водой в процессе наполнения водохранилища и эксплуатации. Изучен временной период эксплуатации 30 лет. За это время только нижняя часть ядра полностью насыщена водой.

Выводы. Подтверждены выводы, полученные ранее другими методами, о достаточно долгом процессе установления квазистатического фильтрационного режима в подобных конструкциях. Полученная разница результатов объясняется принятыми ранее допущениями и более совершенной моделью фильтрации в комплексе Plaxis 2D. Используемая в этом комплексе модель позволяет учитывать изменение водопроводимости грунта в зависимости от его водонасыщения.

Ключевые слова: нестационарная фильтрация, фильтрационный поток, депрессионная поверхность, градиент фильтрации, коэффициент фильтрации, грунтовая плотина, численное моделирование

Для цитирования: Анискин Н.А., Сергеев С.А. Численные решения задач неустановившейся фильтрации в гидротехнике // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1478–1487. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1478-1487

Автор, ответственный за переписку: Станислав Алексеевич Сергеев, SergeevSA@mgsu.ru.

Numerical solutions to unsteady filtration problems in hydraulic engineering

Nikolai A. Aniskin, Stanislav A. Sergeev

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

ABSTRACT

Introduction. The authors consider a solution to the unsteady filtration problem, arising in the clay core of a high earth-and-rockfill dam. Towards this end, the authors use the case of the dam at Nurek hydroelectric power plant. The authors provide a review of studies and calculation methods applied to unsteady filtration problems. Plaxis 2D software is used to develop a numerical solution to the filtration problem arising in the clay core of an earth-and-rockfill dam. The authors have solved the problem of its saturation with water in the process of the reservoir filling and operation. A 30-year operation period was considered.

Materials and methods. The finite element method (FEM) and Plaxis 2D software package were applied to study the unsteady filtration mode using the case of the clay core of Nurek, a high earth-and-rockfill dam. Nowadays, a qualitatively higher level of solutions to such problems is attained by using numerical methods, and, most importantly, the finite element method. The application of software programmes and packages to filtration problem is reduced to solving the main differential equation of the filtration theory, if boundary and initial conditions are available.

Results. A numerical solution to the filtration problem of the dam's clay core that consists in its saturation with water in the process of the reservoir filling and operation was obtained. The 30-year period of operation was studied. Only the bottom part of the core was completely saturated with water during this period.

Conclusions. The authors validated earlier conclusions, made using other methods, about the long-term establishment of the quasi-static filtration mode at similar structures. The discrepancy between the results is explained by earlier assumptions

and a better filtration model, developed using Plaxis 2D software package. The model used there allows taking into account a change in the water permeability of soil depending on its water saturation rate.

KEYWORDS: unsteady filtration, filtration flow, depression surface, filtration gradient, filtration coefficient, rockfill dam, numerical simulation

FOR CITATION: Aniskin N.A., Sergeev S.A. Numerical solutions to unsteady filtration problems in hydraulic engineering. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1478-1487. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1478-1487 (rus.).

Corresponding author: Stanislav A. Sergeev, SergeevSA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных воздействий, оказываемых на грунтовые гидротехнические сооружения и их основания, является фильтрация. В практике гидротехнического строительства определенный интерес представляют задачи неустановившейся фильтрации в грунтовых сооружениях и основаниях. В процессе строительства и эксплуатации грунтового водоподпорного сооружения происходит проникновение, формирование и изменение во времени фильтрационного потока в плотине и ее основании, связанное с изменением уровней воды в бьефах. Одновременно происходит формирование напряженно-деформационного состояния (НДС) системы и изменение свойств грунтов: плотности, пористости, проницаемости и т.д. Эти два процесса взаимозависимы, и для получения достоверной картины работы сооружения вместе с основанием необходимо решать совместную фильтрационно-прочностную задачу. Однако ее решение в связи со сложностью не нашло широкого распространения.

В более простой постановке можно решать задачу неустановившейся фильтрации, считая грунты, в которых происходит движение фильтрационного потока, недеформируемыми с постоянными характеристиками плотности и проницаемости.

Можно выделить несколько типов фильтрационных задач подобного типа. Наиболее часто встречающиеся в гидротехнике задачи по этому направлению исследований связаны с последствиями изменения уровней бьефов [1–5]. Наибольший интерес вызывает так называемая сработка водохранилища, что может быть вызвано технологическими условиями эксплуатации (использование полезного объема водохранилища для различных целей) или аварийной ситуацией. Скорость сработки на крупных водохранилищах, как правило, находится в интервале от 0,1 до 0,5 м/сут, но в некоторых практических случаях может достигать 1,0 м/сут, а иногда и более [6].

При изменениях уровней бьефов неустановившаяся фильтрация в основном затрагивает зоны вблизи откосов верхового или низового клина плотины, вызывая отток воды из пор грунта в направлении поверхностей откосов. Это может привести к снижению устойчивости откосов плотины или появлению фильтрационных деформаций, что особенно опасно при быстрой сработке. Исследованию

вопроса оценки устойчивости грунтовых откосов посвящены работы как отечественных, так и зарубежных ученых [7–11].

Еще один тип задач неустановившейся фильтрации связан с изучением процесса изменения области насыщения водой грунтовых сооружений и массивов, возводимых методом намыва, или гидромеханизации. В этом случае при намыве изначально образуется грунтовый массив, полностью насыщенный водой, который затем постепенно осушается за счет отвода воды через внешние поверхности или внутренние дренажные устройства. Важно учитывать влияние этого процесса на устойчивость откосов сооружения. Особенно это актуально при намыве из мелкозернистых грунтов (суглинистых, лессовых) с низкой водоотдачей. Данный процесс рассматривается в трудах П.В. Недриги, Н.Н. Биндемана, В.М. Шестакова и др. [12–14].

Неустановившаяся фильтрация также проявляется в период строительства и начала эксплуатации грунтового сооружения, когда происходит наполнение водохранилища и начинается проникновение воды внутрь конструкции, возведенной насухо из грунта с определенной влажностью. В этом случае представляет интерес время достижения установленного квазистационарного режима. Для грунтов несвязанных мелкозернистых и крупнозернистых насыщение водой происходит достаточно быстро, в отличие от связанных мелкозернистых грунтов. Задачи по насыщению водой глинистого ядра высоконапорных каменно-земляных плотин и определению нагрузки порового давления исследовались в публикациях [15, 16]. Задачи решались в одномерной постановке аналитическим методом в предположении фильтрационной анизотропии глинистого грунта с большой проницаемостью в горизонтальном направлении, что является следствием технологии возведения. Помимо аналитического решения нестационарной задачи также использовался численный расчет на основе метода конечных элементов (МКЭ) в плоской постановке. На основе расчетов и результатов натурных замеров рассеивания порового давления в ядре [15] сделан вывод о значительном временном интервале по достижению квазистабилизированного фильтрационного режима. За 30 лет эксплуатации такой режим не был достигнут. Этот вывод подтверждается и результатами натурных наблюдений [15]. Исследования [15, 16] выполнены при

принятии определенных допущений и расчетных моделей. С целью проверки сделанных ранее выводов в данной работе представлены результаты численных исследований аналогичной конструкции, осуществленных на основе МКЭ с помощью программного комплекса Plaxis 2D, в котором используется другая модель для решения задач неустановившейся фильтрации в грунтах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Решение рассматриваемых фильтрационных задач базируется на теории неустановившегося движения несжимаемой жидкости в недеформируемой пористой среде, полностью насыщенной жидкостью. Большое применение на начальном этапе изучения данной проблемы получили гидравлические методы решения, основанные на уравнении Буссинеска [5]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{k h_{cp}}{\mu} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) + \frac{\varepsilon}{\mu}, \quad (1)$$

где H — фильтрационный напор; t — время; k — коэффициент фильтрации грунта; h_{cp} — средняя величина напора; ε — пористость грунта; μ — коэффициент водопоглощения (водоотдачи) грунта; x, y — координаты системы координат.

В более поздних работах основное допущение, принятое в гидравлической теории, — постоянство горизонтальных скоростей фильтрации по вертикальному сечению, было подвергнуто проверке в работах Маскета, а затем В.М. Шестакова [17–19], которые показали ее неточность.

Вопросы, связанные с расчетами неустановившейся фильтрации, нашли свое развитие в ряде исследований [20–25], выполненных при определенных ограничениях, что вызвано несовершенством используемых методов. Рассматривалась, как правило, однородная область, принималась постоянная скорость сработки водохранилища, ограничивался набор конструкций, для которых возможно применение предлагаемых методик.

На сегодняшний день качественно более высокий уровень решения подобных задач достигается с помощью численных методов и, прежде всего, МКЭ [26, 27]. Решение фильтрационной задачи в большинстве применяемых вычислительных программ и комплексов сводится к решению основного дифференциального уравнения теории фильтрации с использованием известных граничных и начального условий.

В соответствии с теорией движения фильтрационных вод, движение неустановившегося фильтрационного потока в анизотропной пористой среде в случае полного насыщения пор грунта водой описывается известным дифференциальным уравнением [5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial h_t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial h_t}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial h_t}{\partial z} \right] = S_s \frac{\partial h_t}{\partial t}, \quad (2)$$

где $h_t = f(x, y, z, t)$ — искомая напорная функция в расчетной области, изменяющаяся во времени t ; k_x, k_y, k_z — коэффициенты фильтрации по направлениям координатных осей X, Y, Z ; S_s — удельное водонасыщение грунта.

Удельное водонасыщение можно выразить следующим образом: $S_s = \gamma_w (m_v + n\beta)$, где γ_w — удельный вес воды; m_v — коэффициент объемной сжимаемости грунта области фильтрации; n — пористость; β — сжимаемость воды.

Поскольку вода мало сжимаема ($\beta = 4,7 \cdot 10^{-7}$ кПа⁻¹ для случаев фильтрационных течений), можно считать, что в уравнении (2) $S_s = \gamma_w \cdot m_v$.

В случае фильтрации в водонасыщенной среде подразумевается, что движение воды между частицами грунта происходит при полностью заполненных водой порах под действием гидравлического градиента из области с более высоким давлением в область с меньшим давлением. Такой подход использовался для численных исследований установившейся и неустановившейся фильтрации в грунтовых сооружениях и основаниях и показал хорошую сопоставимость с другими методами расчета [26, 27].

В задачах, связанных с изменениями уровней бьефов (например, при сработке водохранилища), область фильтрации состоит из двух зон грунтов: насыщенных водой и ненасыщенных, из которых произошел отток воды в результате снижения уровня водохранилища. Причем во времени изменяются границы этих зон, степень насыщения водой и, соответственно, фильтрационные свойства грунтов в ненасыщенной зоне. Решение нестационарной фильтрационной задачи в такой постановке является достаточно сложным. Небольшой обзор исследований в этом направлении будет представлен далее.

При трехмерной неустановившейся фильтрации в анизотропной ненасыщенной пористой среде процесс описывается дифференциальным уравнением [6]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h_m) \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \right] = C(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial t}, \quad (3)$$

где $k(h_m)$ — значение функции фильтрационной проводимости, определяется по кривой водопроводимости грунта (Hydraulic conductivity function — HCF) (рис. 1, *b*); h_m — дефицит фильтрационного напора (напор всасывания); $C(h_m)$ — уклон кривой объемного водонасыщения грунта (Soil-water retention curve — SWRC) (рис. 2).

Вопросам неустановившейся фильтрации в ненасыщенных грунтах посвящено большое количество исследований [28–31]. Одной из наиболее используемых моделей, описывающей зависимости водопроницаемости и водоудержания грунта в зависимости от степени его насыщения является модель

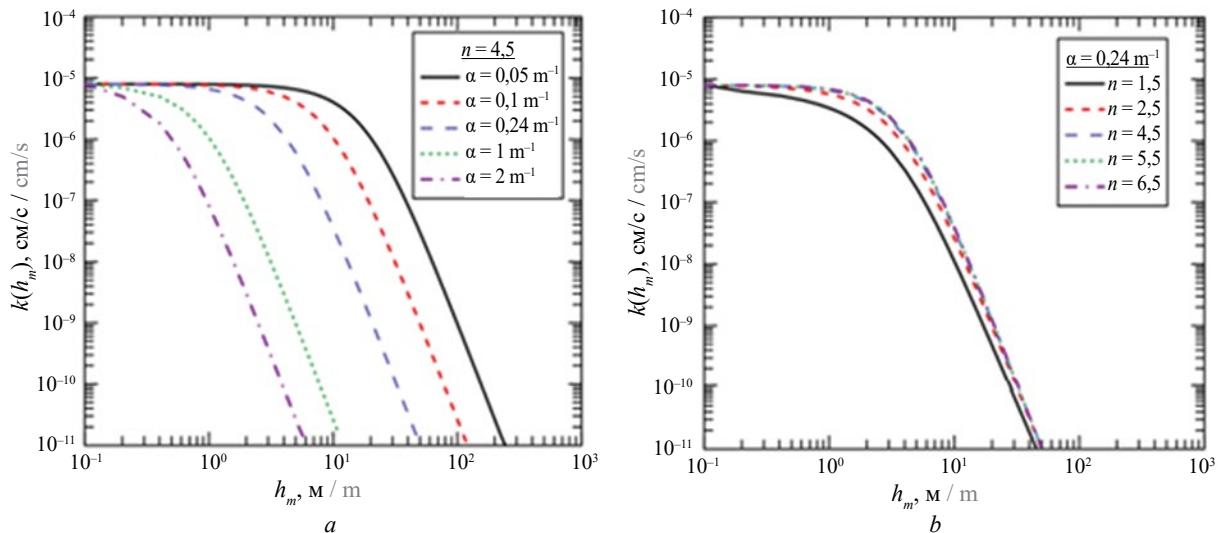


Рис. 1. Кривая водопроводимости грунта: *a* — при $n = 4,5$; $\alpha = 0,05\text{--}2$; *b* — при $n = 1,5\text{--}6,5$; $\alpha = 0,24$

Fig. 1. Water transmissivity of soil: *a* — at $n = 4,5$; $\alpha = 0,05\text{--}2$; *b* — at $n = 1,5\text{--}6,5$; $\alpha = 0,24$

Муалема (Mualem, 1976) [30]. Им была предложена достаточно простая интегральная формула для ненасыщенной водопроводимости грунта. В дальнейших исследованиях ван Генухтена (van Genuchten, 1980) [31] результаты, которые получили с помощью уравнений, основанных на теории Муалема, были сопоставлены с натурными данными, полученными для нескольких грунтов, имеющих широко варьирующиеся проницаемые свойства. Предложенная модель ван Генухтена позволяет описать фильтрационные свойства для широкого спектра грунтов. Она представляет собой зависимость, связывающую дефицит напора (напор всасывания) h_m и объемное водонасыщение грунта θ :

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (ah_m)^n\right]^m}, \quad (4)$$

где θ_s — объемное содержание насыщенной воды в порах грунта; θ_r — остаточное объемное содержание воды в порах грунта; h_m — дефицит фильтрационного напора (напор всасывания); a , n и $m = 1\text{--}1/n$ — параметры кривых свойств грунтов (определяются в результате лабораторных исследований грунта).

Фильтрационная проницаемость ненасыщенного грунта определяется в соответствии с моделью ван Генухтена следующим образом:

$$k(h_m) = k_s \sqrt{S_e} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]^2, \quad (5)$$

где k_s — фильтрационная проводимость (коэффициент фильтрации) насыщенного грунта; S_e — степень насыщения грунта, которая устанавливается по зависимости [31]:

$$S_e = \left[1 + (ah_m)^n\right]^{-m}. \quad (6)$$

В качестве примера модели ван Генухтена можно рассмотреть ее использование для описания свойств грунтов плотины Сан-Луис (Калифорния, США) [6], на которой в результате быстрой сработки водохранилища в 1981 г. произошло обрушение части верхового откоса плотины. На этой плотине высотой 116 м образовался оползень шириной по фронту 340 м с объемом сползшего грунта 310 000 м³.

Для грунтов плотины Сан-Луис на основе лабораторных испытаний кернов мелкозернистых грунтов построены кривые для определения свойств ненасыщенных грунтов: кривые объемного водонасыщения грунта (SWRC) (рис. 2) и кривые водопроницаемости (коэффициента фильтрации) грунта (HCF) (рис. 1). Полученные зависимости были использованы для выявления свойств грунтов при выполнении численных расчетов фильтрации и устойчивости откосов плотины [6].

В данной работе рассматривался процесс наполнения водохранилища и формирование фильтрационного потока в конструкции во времени. В этом случае решалась задача неустановившейся фильтрации. Исследования выполнены численным МКЭ с помощью программного комплекса Plaxis 2D. Модуль фильтрационных расчетов этого комплекса PlaxFlow использует для решения дифференциальные уравнения насыщенной и ненасыщенных фильтрации (1), (2). В случае фильтрации в ненасыщенных грунтах для определения свойств грунтов применяется описанная выше модель ван Генухтена выражения (4)–(6) [31].

Объект настоящего исследования — фильтрационный режим глинистого грунта высокой каменноzemляной плотины на примере плотины Нурекской ГЭС. Традиционное классическое решение фильтрации базируется на решении основного дифференциального уравнения фильтрации (2) в предположении установленвшегося режима. В этом случае графическая

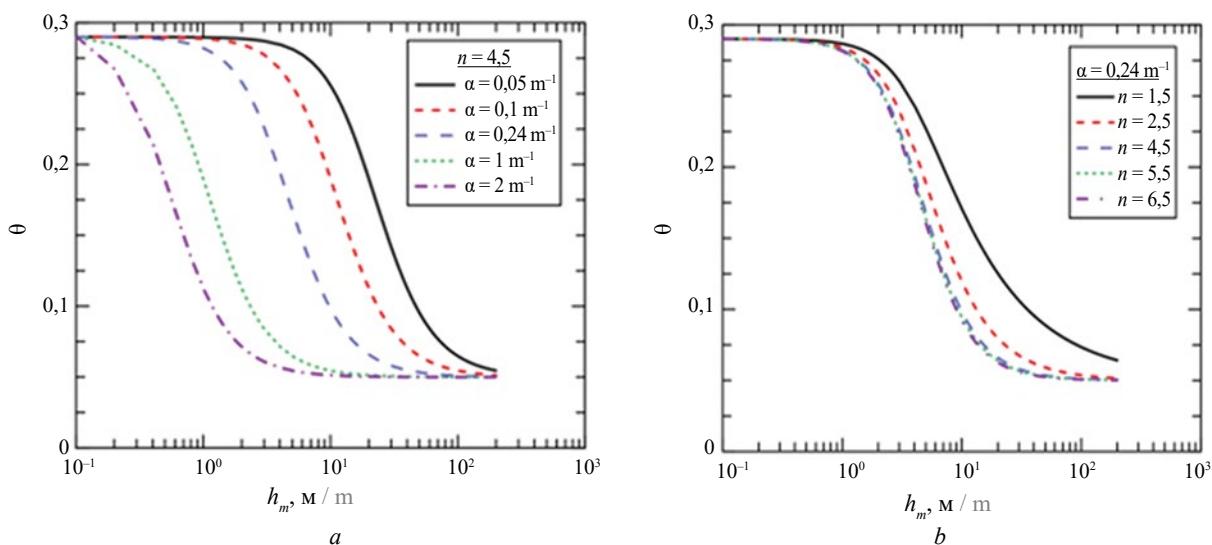


Рис. 2. Кривая объемного водонасыщения грунта: *a* — при $n = 4,5$; $\alpha = 0,05-2$; *b* — при $n = 1,5-6,5$; $\alpha = 0,24$

Fig. 2. Water saturation of soil: *a* — at $n = 4.5$; $\alpha = 0.05-2$; *b* — at $n = 1.5-6.5$; $\alpha = 0.24$

интерпретация решения может быть представлена в виде фильтрационной гидродинамической сетки.

На рис. 3 дано распределение линий равного напора (рис. 3, *a*) и изолиний суммы фильтрационного и порового давлений в грунтовом ядре (рис. 3, *b*) [15].

Полученное распределение порового давления на следующем этапе используется для решения задач по оценке устойчивости и НДС конструкции грунтовой плотины. Эта методика основана на решении фильтрационной задачи для установившегося фильтрационного потока. Возникает вопрос:

насколько обоснован такой подход и как быстро по времени в грунтовом ядре плотины достигается установившийся квазистационарный фильтрационный режим. Попытка ответить на этот вопрос была предпринята в работах [15, 16], где рассматривалось формирование во времени фильтрационного режима суглинистого грунта. Результаты решения нестационарной фильтрационной задачи применялись для определения порового давления в глинистом ядре высокой каменно-земляной плотины на примере плотины Нурекской ГЭС [15]. Задача решалась двумя методами: аналитическим и численным. При

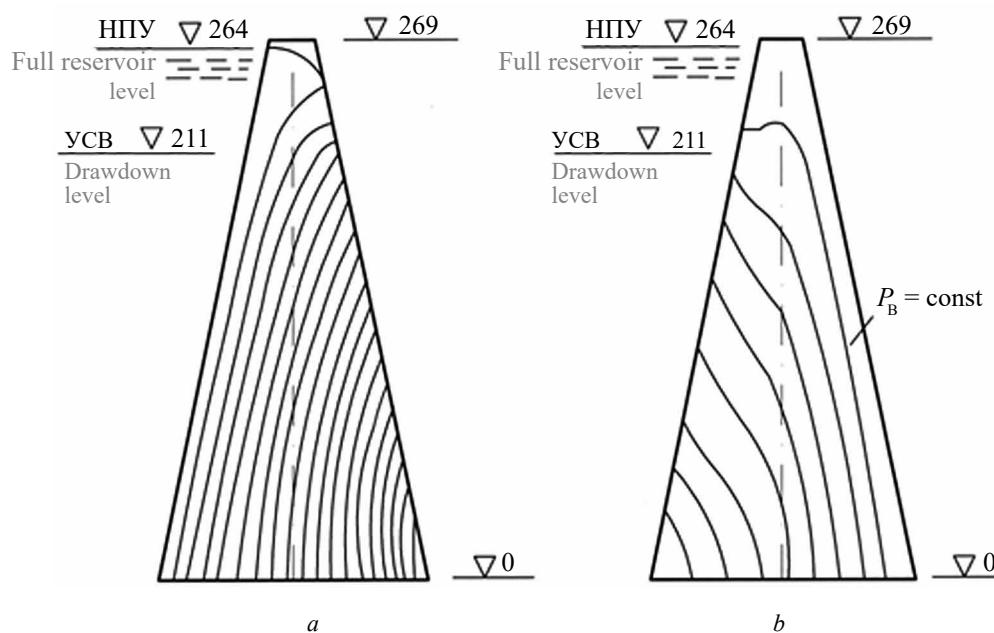


Рис. 3. Картина установившейся фильтрации в ядре: *a* — линии равных напоров гидродинамической сетки фильтрации; *b* — изолинии суммы фильтрационного и порового давления

Fig. 3. Steady-state filtration in the core: *a* — lines of equal pressures of the hydrodynamic filtration grid; *b* — isolines of the sum of filtration and pore pressure

аналитическом методе исследовалась одномерная задача (анизотропная задача с рассмотрением фильтрации только по горизонтальной оси с коэффициентом фильтрации $K_\phi^x = 1 \cdot 10^{-6}$ см/с $\approx 1 \cdot 10^{-3}$ м/сут с использованием средних гармонических и взвешенных значений). С помощью численного решения на основе МКЭ решена двумерная изотропная неустановившаяся фильтрационная задача (с коэффициентами фильтрации $K_\phi^x = K_\phi^y = 1 \cdot 10^{-6}$ см/с). Результаты исследований по обоим методам показали, что процесс проникновения фильтрационного потока в ядро по времени происходит достаточно медленно. На верхних отметках в зоне переменного уровня воды проникновение воды быстро замедляется и не достигает низовой грани ядра за рассмотренный временной интервал 30 лет. Проникновение воды до низовой грани по контакту с основанием происходит за 10–11 лет [15]. Аналогичные результаты получены и для другого объекта — глинистого ядра плотины Рогунского гидроузла [16].

Полученные в трудах [15, 16] результаты требуют подтверждения и уточнения, поскольку они получены с некоторыми допущениями. Так, одномерная задача решалась в предположении анизотропной фильтрации (учитывалась фильтрация только в горизонтальном направлении с достаточно большим для глинистых грунтов коэффициентом фильтрации $K_\phi^x = 1 \cdot 10^{-6}$ см/с $\approx 1 \cdot 10^{-3}$ м/сут). Данное значение было принято в соответствии с наблюдаемым в начале эксплуатации плотины [15]. Впоследствии величина коэффициента значительно понизилась в результате рассеивания порового давления и уплотнения грунта [15].

Следует отметить, что полученное ранее численное решение основано на приближенном определении области фильтрации и положении депрессионной поверхности. В работе [15] вычислительной программой FILTR положение свободной поверхности фильтрационного потока устанавливается пошагово в результате итерационного процесса.

В элементах сетки разбики производится проверка выполнения неравенства: $H_{ц,т}^i \geq z_{ц,т}^i$, где $H_{ц,т}^i$ — действующий в центре тяжести элемента фильтрационный напор; $z_{ц,т}^i$ — высотная отметка центра тяжести элемента (величины $H_{ц,т}^i$ и $z_{ц,т}^i$ определяются относительно плоскости сравнения). При невыполнении условия осуществляется корректировка области фильтрации путем приравнивания к нулю коэффициента фильтрации данного элемента. Корректировка проводится неоднократно в процессе итераций до получения квазиустановившегося для данного момента времени режима. Таким образом, в процессе решения получаются области грунта с полностью насыщенными водой порами (область движения фильтрационного потока) и абсолютно сухими порами. На самом деле, процесс формирования области фильтрации более сложный. Прежде чем достигнуть стадии полного насыщения пор грунта водой, происходит их постепенное заполнение с соответствующим изменением водопроницаемости грунта. Стремление достовернее представить этот процесс привел к созданию моделей Муалема и ван Генхутена [30, 31], последняя из которых заложена в блок фильтрационных расчетов комплекса Plaxis 2D. Данный программный комплекс был использован для решения задачи неустановившейся фильтрации в глинистом грунте. Конструкция ядра и постановка задачи принимались аналогично рассмотренным в работе [15].

В качестве начального условия исследовалось полностью возведенное сухое ядро с отсутствием воды в верхнем и нижнем бьефах. Далее моделировалось наполнение водохранилища на полную высоту с равномерной скоростью. После наполнения водохранилища во времени моделировался приближенный график изменения уровня водохранилища с постоянным годовым циклом наполнения-сработки (рис. 4). Расчеты проводились для временного интервала 30 лет с момента наполнения водохранилища.

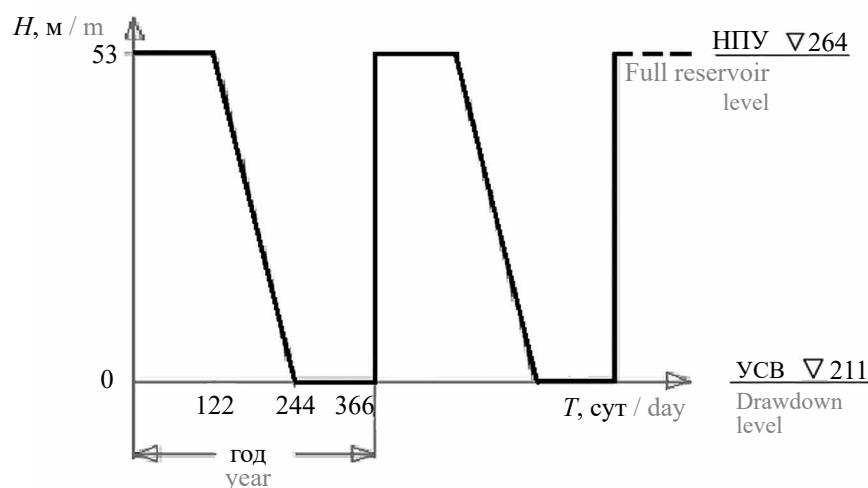


Рис. 4. График изменения во времени уровня водохранилища Нурекской ГЭС

Fig. 4. The time history in the reservoir water level at Nurek hydraulic power plant

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам расчетов получены картины проникновения воды в тело ядра на разные моменты времени. На рис. 5 представлены результаты на моменты времени 1; 5; 10 и 30 лет после начала эксплуатации. Качественно результаты подтверждают выводы, полученные в работах [15, 16]: процесс формирования квазиустановившегося фильтрационного режима в ядре проходит очень медленно.

Даже через 30 лет эксплуатационного периода верхняя зона ядра продолжает оставаться сухой.

За этот период точка высасывания фильтрационного потока на низовой грани располагается примерно на $\frac{1}{4}$ высоты плотины от основания (рис. 5, d). По контакту с основанием фильтрационный поток достигает низовой грани ядра через 4–5 лет (рис. 5, b), что быстрее в 2 раза, чем результаты, полученные в работе [15] (примерно 10–11 лет). Медленно проходит процесс насыщения в верхней части ядра, особенно в зоне переменного уровня водохранилища, где в периоды сработки водохранилища отмечается незначительный отток воды в верхний бьеф.

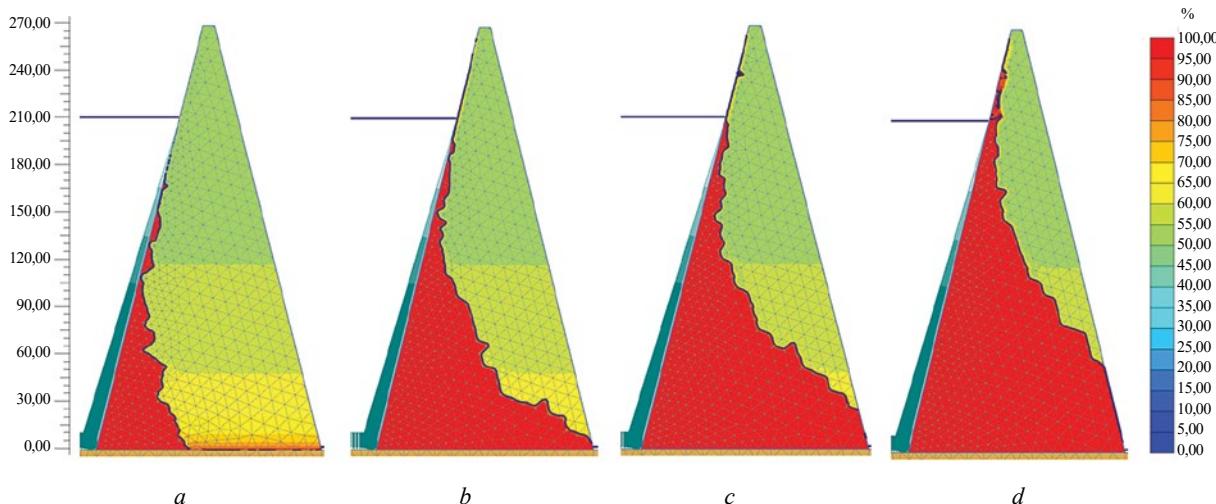


Рис. 5. Неустановившаяся фильтрация в глинистом ядре каменно-земляной плотины: процесс насыщения грунта ядра водой в процессе эксплуатации: a — 1-й год; b — 5-й год; c — 10-й год; d — 30-й год

Fig. 5. Unsteady filtration in the clay core of an earth-and-rockfill dam: the process of the core soil saturation with water during operation: a — 1st year; b — 5th year; c — 10th year; d — 30th year

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов неустановившейся фильтрации в глинистом ядре высокой каменно-земляной плотины подтвердили полученные ранее выводы о медленном процессе проникновения фильтрационного потока внутрь конструкции. За рассмотренный период эксплуатации 30 лет только нижняя часть ядра полностью насыщена водой.

Результаты расчетов неустановившейся фильтрации в ядре по программному комплексу

Plaxis показали несколько большую скорость насыщения глинистого грунта по сравнению с опубликованными ранее результатами, полученными с помощью приближенного аналитического и численного методов. Разница результатов объясняется принятыми ранее допущениями и более совершенной моделью фильтрации в комплексе Plaxis. Используемая в этом комплексе модель позволяет учитывать изменение водопроводимости грунта в зависимости от его водонасыщения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cedergren H.R. Seepage, drainage, and flow nets. 2nd ed. John Wiley & Sons, 1977.
2. Reddi L.N. Seepage in Soils: Principles and applications. Hoboken : John Wiley & Sons, 2003.
3. Полубаринова-Кочина П.Я. О неустановившихся движениях грунтовых вод // Доклады АН СССР. 1950. Т. 75. № 3.
4. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952. 676 с.
5. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР. М. : Наука, 1969. 545 с.
6. 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. Vol. 143. Issue 2. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001602
7. Reinius E. The stability of the upstream slope of earth dams. Stockholm, 1948.

8. Alonso E.E., Pinyol N.M. Numerical analysis of rapid drawdown: Applications in real cases // Water Science and Engineering. 2016. Vol. 9. Issue 3. Pp. 175–182. DOI: 10.1016/j.wse.2016.11.003
9. 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. Vol. 8. Issue 2. Pp. 115–123. DOI: 10.1007/s11709-014-0249-7
10. Berilgen M.M. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions // Computers and Geotechnics. 2007. Vol. 34. Issue 2. Pp. 81–91. DOI: 10.1016/j.compgeo.2006.10.004
11. Zomorodian A., Abodollahzadeh S.M. Effect of horizontal drains on upstream slope stability during rapid drawdown condition // International Journal of Geology. 2010. Vol. 4. Issue 4. Pp. 85–90.
12. Недрига В.П. Фильтрация в однородных насыщенных плотинах на проницаемом основании // Сб. науч. тр. ВНИИ ВОДГЕО. М., 1968. № 19. С. 311.
13. Шестаков В.М. Методика определения участка высасывания фильтрационного потока на откос // Изд. ВНИИ ВОДГЕО. 1955.
14. Биндеман Н.Н. Определение динамических запасов грунтовых вод по водоотдаче песков // Изд. ВНИИ ВОДГЕО. 1952.
15. Aniskin N.F., Rasskazov L.N., Yadgorov E.Kh. Seepage and pore pressure in the core of a earth-and-rockfill dam // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. Issue 4. Pp. 378–384. DOI: 10.1007/s10749-016-0717-4
16. Aniskin N.F., Rasskazov L.N. Yadgorov E.Kh. Filtration, pore pressure, and settling from consolidation of an ultra-high dam // Power Technology and Engineering. 2017. Vol. 50. Issue 6. Pp. 600–605. DOI: 10.1007/s10749-017-0757-4
17. Muskat M. The seepage of water through dams with vertical faces // Physics. 1935. Vol. 6. Issue 12. Pp. 402–415. DOI: 10.1063/1.1745284
18. Шестаков В.М. Фильтрационный расчет земляных плотин и перемычек при колебании бьефа // Гидротехническое строительство. 1953. № 7. С. 36–39.
19. Шестаков В.М. Расчет кривых депрессии в земляных плотинах и дамбах при понижении горизонта водохранилища // Гидротехническое строительство. 1954. № 4. С. 32–36.
20. Веригин Н.Н. О течениях грунтовых вод при местной усиленной инфильтрации // Докл. АН СССР. 1950. Т. 70. № 5. С. 777–780.
21. Домбровский В.М. Упрощенный расчет кривой депрессии при снижении горизонта верхнего бьефа // Гидротехническое строительство. 1947. № 2.
22. Каменский Г.Н. Уравнение неустановившегося движения грунтовых вод в конечных разностях и применения их к исследованию явлений подпора // Изв. АН СССР. 1940. № 4.
23. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М. ; Л. : Гостехиздат, 1947. С. 244.
24. Шестаков В.М. Определение гидродинамических сил в земляных сооружениях и откосах при падении уровней в бьефах // Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений : сб. ВОДГЕО, 1956. № 2.
25. Шестаков В.М. Некоторые вопросы моделирования неустановившейся фильтрации // Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений : сб. ВОДГЕО, 1956. № 2.
26. 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. Vol. 1079–1080. Pp. 198–201. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1079-1080.198
27. 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.
28. Терлеев В.В., Нарбут М.А., Топаж 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.
29. 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
30. 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
31. Van Genuchten M.Th. 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

Поступила в редакцию 21 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 11 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 11 ноября 2022 г.

О Б А Т О Р АХ: **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;

Станислав Алексеевич Сергеев — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 872871, Scopus: 57208495173, ResearcherID: AAC-4535-2022, ORCID: 0000-0002-4837-2722; SergeevSA@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Анискин Н.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание текста, доработка текста, итоговые выводы.

Сергеев С.А. — проведение расчетных исследований, написание текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Cedergren H.R. *Seepage, drainage, and flow nets*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 1977.
2. Reddi L.N. *Seepage in Soils: Principles and Applications*. Hoboken, John Wiley & Sons, 2003.
3. Polubarinova-Kochina P.Ya. On unsteady movements of groundwater. *Report Academy of Sciences of the USSR*. 1950; 75(3). (rus.).
4. Polubarinova-Kochina P.Ya. *The theory of groundwater movement*. Moscow, State Publishing house of technical and theoretical literature, 1952; 676. (rus.).
5. *Development of research on filtration theory in the USSR*. Moscow, Nauka, 1969. (rus.).
6. 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
7. Reinius E. *The stability of the upstream slope of earth dams*. Stockholm, 1948.
8. Alonso E.E., Pinyol N.M. Numerical analysis of rapid drawdown: Applications in real cases. *Water Science and Engineering*. 2016; 9(3):175-182. DOI: 10.1016/j.wse.2016.11.003
9. 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
10. Berilgen M.M. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Computers and Geotechnics*. 2007; 34(2):81-91. DOI: 10.1016/j.compgeo.2006.10.004
11. Zomorodian A., Abodollahzadeh S.M. Effect of Horizontal Drains on Upstream Slope Stability during Rapid Drawdown Condition. *International Journal of Geology*. 2010; 4(4):85-90.
12. Nedriga V.P. Filtration in homogeneous alluvial dams on a permeable base. *Collection of scientific papers VNII VODGEO*. Moscow, 1968; 19:311. (rus.).
13. Shestakov V.M. Methodology for determining the filtration flow seepage area on the slope. *VODGEO Research Institute*. 1955. (rus.).
14. Bindeman N.N. Determination of dynamic groundwater reserves by the water yield of sands. *VODGEO Research Institute*. 1952. (rus.).
15. Aniskin N.F., Rasskazov L.N., Yadgorov E.Kh. Seepage and pore pressure in the core of a earth-and-rockfill dam. *Power Technology and Engineering*. 2016; 50(4):378-384. DOI: 10.1007/s10749-016-0717-4
16. Aniskin N.F., Rasskazov L.N., Yadgorov E.Kh. Filtration, pore pressure, and settling from consolidation of an ultra-high dam. *Power Technology and Engineering*. 2017; 50(6):600-605. DOI: 10.1007/s10749-017-0757-4
17. Muskat M. The Seepage of Water Through Dams with Vertical Faces. *Physics*. 1935; 6(12):402-415. DOI: 10.1063/1.1745284
18. Shestakov V.M. Filtration calculation of earthen dams and cofferdam in case of fluctuations of the ponds. *Hydraulic Engineering*. 1953; 7:36-39. (rus.).
19. Shestakov V.M. Calculation of depression curves in earthen dams and dams with a decrease in the water level. *Hydraulic Engineering*. 1954; 4:32-36. (rus.).
20. Verigin N.N. On groundwater flows with local enhanced infiltration. *USSR Academy of Sciences*. 1950; 70(5):777-780. (rus.).
21. Dombrovskij V.M. Simplified calculation of the depression curve with a decrease in the upstream horizon. *Hydraulic Engineering*. 1947; 2.
22. Kamenskij G.N. Equations of unsteady movement of groundwater in finite differences and their application to the study of the phenomena of backup. *USSR Academy of Sciences*. 1940; 4. (rus.).
23. Lejbenzon L.S. *The movement of natural liquids and gases in a porous medium*. Moscow, Leningrad, Gostekhizdat, 1947; 244. (rus.).
24. Shestakov V.M. Determination of hydrodynamic forces in earthworks and slopes when levels fall in the streams. *Issues of filtration calculations of hydraulic structures : collection*. VODGEO, 1956; 2. (rus.).
25. Shestakov V.M. Some issues of modeling of transient seepage. *Issues of filtration calculations of hydraulic structures : collection*. VODGEO, 1956; 2. (rus.).

26. 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
27. 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.
28. 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.).
29. Kosugi K. General Model for Unsaturated Hydraulic Conductivity for Soils with Log-normal Pore-Size Distribution. *Soil Science Society of America Journal*. 1999; 63(2):270-277. DOI: 10.2136/sssaj1999.03615995006300020003x
30. 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
31. Van Genuchten M.Th. 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

Received October 21, 2022.

Adopted in revised form on November 11, 2022.

Approved for publication on November 11, 2022.

BIO NOTES: **Nikolai A. Aniskin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Hydrotechnical 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;

Stanislav A. Sergeev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 872871, Scopus: 57208495173, ResearcherID: AAC-4535-2022, ORCID: 0000-0002-4837-2722; SergeevSA@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Nikolai A. Aniskin — conceptualization, methodology, writing of the article, scientific editing of the text, supervision.

Stanislav A. Sergeev — gathering and processing, writing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Использование электрических котлов с иерархическим управлением нагрузкой для поквартирного теплоснабжения

Алексей Леонидович Торопов

Инженерный центр «Апрель»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Теплоснабжение помещений электрической энергией с трансформацией ее в тепловую энергию не приветствуется в связи с низким коэффициентом полезного действия ее первичного использования. Считается, что электрическое теплоснабжение многоквартирных домов имеет более высокий углеродный след, чем при отоплении с применением газовых котлов. Если рассматривать весь процесс жизненного цикла инженерных систем теплоснабжения, а также процесс производства систем дымоудаления, воздухоснабжения, снабжения газом, эксплуатационные затраты, то итоговый результат сравнения углеродного следа при использовании электрических и газовых котлов не однозначен. Проблема использования электрических котлов для теплоснабжения апартаментов связана с лимитом выделяемой энергии, равным 15 кВт.

Материалы и методы. Исследовалась работа настенного электрического котла для поквартирного теплоснабжения с иерархическим управлением нагрузкой. Применен режим управления с приоритетом на реализацию первоочередных физиологических, социальных потребностей владельцев помещений.

Результаты. Получено сравнение работы электрических теплогенераторов с симисторным и релейным контролем в условиях ограничения выделенной электрической мощности. Определены границы комфорtnого применения электрических тепловых генераторов для поквартирного теплоснабжения.

Выводы. Электрические котлы с симисторным управлением и малым шагом изменения нагрузки обладают возможностью линейной модуляции во всем диапазоне изменения тепловых нагрузок автономных систем теплоснабжения. Структура потребления электрической энергии с использованием электрических котлов носит иерархический характер. Управление электрическим котлом должно быть подключено отдельной линией с реле приоритета и реле времени. Лимит в 15 кВт достаточен для комфорtnого пользования любыми стандартными электрическими приборами для помещений площадью до 80 м², расположенных в центральной части Российской Федерации.

Ключевые слова: электрический котел, приоритетное управление, поквартирное теплоснабжение, Ардения, потребление электроэнергии, электрическое отопление

Благодарности. Автор благодарит рецензентов за замечания и по стилю изложения, и по научно-технической сути, способствующие более глубокому раскрытию темы научной работы.

Для цитирования: Торопов А.Л. Использование электрических котлов с иерархическим управлением нагрузкой для поквартирного теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1488–1498. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1488-1498.

Автор, ответственный за переписку: Алексей Леонидович Торопов, toropov@aprilgroup.ru.

Using electric boilers with hierarchical load control systems to supply heat to apartments

Alexey L. Toropov

Engineering Center "April"; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Using electrical energy, transformed into thermal energy, to supply heat to premises is not a good idea due to its low efficiency. It is generally believed that the use of electricity to supply heat to multi-family buildings is considered to have a higher carbon footprint than gas-fired heating. If we consider the entire life cycle of heat supply systems, as well as the production of smoke exhaust systems, air supply, gas supply, operating expenses, the comparison between the carbon footprints of the above technologies is ambiguous. The use of electric boilers as sources of heat supply to apartments is limited due to the amount of energy, thus produced, which is equal to 15 kW.

Materials and methods. The author analyzed the operation of a wall-mounted electric boiler with a hierarchical load control system. Its mode of operation was focused on meeting the top-priority physiological and social needs of apartment residents.

Results. The operation of electric heat generators, having triac and relay control systems, was compared for the case of a limited amount of electricity supplied. The authors determined the boundaries of comfortable use of electric heat generators for apartment heat supply.

Conclusions. Electric boilers with a triac control system and a small load change step can demonstrate linear modulation in the entire range of changes in heat load values of independent heat supply systems. The structure of electrical energy consumption by electric boilers is hierarchical. An electric boiler control system must have an independent line equipped with priority and time relays. 15 kW is enough to ensure the comfortable use of any standard electrical appliances for premises up to 80 m² located in the central areas of the Russian Federation.

KEYWORDS: electric boiler, priority management, apartment heat supply, Arderia, electricity consumption, electric heating

Acknowledgements. The author thanks the reviewers for their comments, made both in terms of style and technical essence, since they contribute to a more profound understanding of the topic of this research undertaking.

FOR CITATION: Торопов А.Л. 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.).

Corresponding author: Alexey L. Торопов, toropov@aprilgroup.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Теплоснабжение помещений электрической энергией с непосредственной трансформацией ее в тепловую энергию не приветствуется действующей нормативной базой в связи с низким коэффициентом полезного действия (КПД) ее первичного использования. Считается, что электрическое теплоснабжение многоквартирных домов имеет более высокий углеродный след, чем при отоплении с применением газовых котлов. Электрический КПД газотурбинных электростанций составляет 30–35 % [1], а заявленный КПД конвекционных настенных котлов, используемых для поквартирного теплоснабжения, составляет по отношению к высшей теплотворной способности около 80 % [2]. Возможность применения электрической энергии для теплоснабжения квартиры в многоэтажном, многоквартирном доме с централизованным теплоснабжением имеет ряд административных проблем. Если потребление электрической энергии квартиры менее 15 кВт·ч, то не требуется разрешений на установку электрического теплового генератора, достаточно только обеспечить отдельный кабельный ввод для его питания¹. Однако, если дом подключен к централизованной системе отопления, то отказаться от оплаты коммуникаций и отопления общедомовых территорий не удастся². Поэтому установка электрического котла и автономной системы теплоснабжения в доме с централизованным теплоснабжением экономически не целесообразна. Придется платить и за электроэнергию для отопления, и за централизованное отопление. Выделенные лимиты на электроснабжение домов в дачных поселках иногда составляют до 5 кВт·ч, но эксплуатация данных помещений в зимний период времени обычно не предусматривается.

Все перечисленные выше факторы сформировали устойчивый в сознании не только потребителей, но и специалистов, категорический императив — безусловный принцип для всех систем: «отопление электричеством — самый дорогой способ теплоснаб-

жения индивидуальных помещений». При использовании настенных газовых котлов для автономного теплоснабжения помещений, независимо от районов размещения объектов, выбор делается в пользу газовой конденсационной техники [3–8]. Проблема использования конвекционных или конденсационных настенных газовых котлов для поквартирного теплоснабжения связана с тем, что один котел применяется и для отопления, и для горячего водоснабжения квартиры. Потребление тепловой энергии для обеспечения горячего проточного водоснабжения в соответствии с санитарными нормами требует 12–15 кВт·ч. А комфортный уровень потребления ГВС квартиры с двумя точками разбора требует наличия теплогенератора с тепловой мощностью не менее 24 кВт·ч. Расходы тепловой мощности для отопления маломерных квартир в многоэтажных домах, даже в экстремально холодные периоды отопительного сезона, не превышают 2,5 кВт·ч, а среднее значение составляет до 1,3 кВт·ч [9]. Таким образом, диапазон изменения тепловой мощности при использовании одного теплогенератора для отопления и горячего водоснабжения должен составлять более 20 раз. Конвекционные настенные котлы с атмосферными многофакельными горелками имеют диапазон непрерывной модуляции не более 2,5 раза [10, 11]. Конденсационные настенные котлы имеют диапазон устойчивой плавной модуляции не более 7 раз. Ни конденсационные настенные котлы, ни конвекционные котлы не способны обеспечить работу с плавной модуляцией мощности во всем диапазоне тепловой нагрузки системы теплоснабжения (отопление + ГВС) маломерной квартиры. При функционировании в режиме «отопление» их работа переходит в режим дискретной модуляции — постоянного чередования включения — выключения горелки котла со значительными выбросами продуктов сгорания, соответствующих неустановившимся режимам работы. Исследования показали, что при использовании настенных котлов при малых тепловых нагрузках происходит их переход в режим работы с постоянным включением и выключением газогорелочных узлов, с периодическим

¹ О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам совершенствования порядка технологического присоединения потребителей к электрическим сетям : Постановление Правительства РФ от 21.04.2009 № 334. URL: <https://base.garant.ru/12166684/>

² По делу о проверке конституционности абзаца третьего пункта 421, пунктов 44 и 45 Правил предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов, а также формулы 3 Приложения № 2 к данным Правилам в связи с жалобой гражданки В.Н. Шестериковой : Постановление Конституционного Суда Российской Федерации от 27.04.2021 № 16-П. URL: <https://rg.ru/2021/05/12/otoplenie-dok.html>

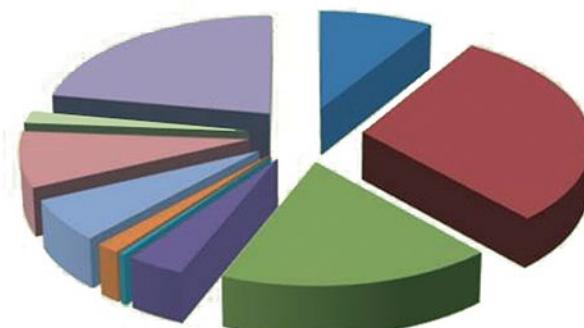
обдувом теплообменников холодным воздухом [12]. Реальный КПД при работе котлов в режиме «тактования» может снизиться до 50 % и ниже. Особенно при температурах окружающего воздуха в диапазоне температур атмосферного воздуха от +10 до –5 °C, которые составляют большую часть времени отопительного периода в западном регионе РФ, а в южных районах указанная температура характерна для практически всего отопительного периода.

Если рассматривать весь процесс жизненного цикла инженерных систем теплоснабжения индивидуального домохозяйства, а также процесс производства труб газовых сетей теплоснабжения, их укладки, изготовление и монтаж труб внутренних систем дымоудаления, воздухоснабжения, эксплуатационные затраты на их содержание и суммарные выбросы парниковых газов, связанные с этими процессами, то итоговый результат сравнения углеродного следа при использовании электрических и газовых котлов может оказаться не столь однозначным.

Наряду с безопасностью и простотой эксплуатации электрических котлов, важнейшим их преимуществом является возможность высокоеффективной работы устройств во всем диапазоне изменения производимой тепловой мощности. КПД преобразования электрической энергии в тепловую составляет 95–98 %. Управление мощностью электрических котлов с помощью симисторов — простое и эффективное. В отличие от релейного управления нагрузкой электрического теплогенератора, оно носит более плавный характер с возможностью модуляции мощности как для режима отопления помещения, так и для подготовки горячей воды.

Структура потребления электрической энергии домохозяйства в целом и квартиры в многоквартирном доме, в частности, зависит от множества факторов, в том числе временных, климатических, территориальных, исторических, социальных, возрастных, политических. На суммарное потребление энергии влияет также численный состав и пол членов семьи, их занятость в работе и общественной жизни, привычки, образ жизни. Основные приборы потребления электрической энергии — это телевизор, холодильник, освещение, электрические приборы для гигиены тела и среды обитания, техника для приготовления пищи, устройства коммуникаций, компьютеры. В России в 2014 г. на сто домохозяйств приходилось: 257 мобильных телефонов, 183 телевизора, 128 холодильников и морозильников, 103 стиральные машины, 113 персональных компьютеров, 96 электропылесосов, 20 кондиционеров, 8 посудомоечных машин [13]. В настоящий момент указанные показатели значительно выше. На рис. 1 представлена усредненная структура потребления электроэнергии в бытовых целях без учета затрат на подготовку горячей воды и отопления.

Абсолютные значения суммарного потребления и составных частей в месяц исследованы в работах [14, 15] и составляют в среднем около 300 кВт·ч в месяц, без учета затрат на отопление, горячее водоснабжение и кондиционирование помещений, но с затратами на приготовление пищи при использовании электрической плиты. Более 65 % всего потребления энергии населения приходится на цели централизованного и децентрализованного отопления, 13 % на нужды горячего водоснабжения³. Соответственно, усредненное суммарное месячное



- Освещение на светодиодных лампах / LED lighting
- Холодильник / Refrigerator
- Телевизор / TV
- Стиральная машина / Washing machine
- Микроволновая печь / Microwave
- Электрочайник / Electric kettle
- Вытяжка / Kitchen hood
- Утюг / Iron
- Пылесос / Vacuum cleaner
- Компьютер / Computer

Рис. 1. Структура усредненного потребления электрической энергии в бытовых целях без затрат на отопление и подготовку горячей воды

Fig. 1. The breakdown of average domestic consumption of electrical energy, net of the cost of heating and hot water preparation

³ Государственный доклад «О состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации» // Министерство экономического развития Российской Федерации. М., 2020. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c3901dba442f8e361d68bc019d7ee83f/Energyefficiency2020.pdf>

потребление электрической энергии для домохозяйства составляет 1350 кВт·ч.

Перспективы в изменениях потребления электроэнергии домохозяйствами будут зависеть от градостроительной политики, доходов населения, стоимости электроэнергии, развития применения бытовой техники, тарифов потребления электроэнергии для населения. В России обеспеченность жилой площадью составляет около $25 \text{ m}^2/\text{чел.}$, что ниже, чем в европейских развитых странах, Канаде и США в 2–2,5 раза⁴ [16], оснащенность электрическими приборами ниже, чем в перечисленных странах. Все это предполагает, что при развитии ВВП России душевое энергопотребление в домохозяйствах будет расти с ежегодными темпами 1,3 % [17]. Прогноз тенденций энергопотребления домохозяйств в мире, выполненный Энергетическим информационным агентством США (EIA),

с перспективой до 2040 г. предполагает, что на сектор домохозяйств будет приходиться 14 % общемирового потребления энергии⁵.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Характер потребления электрической энергии носит слабо предсказуемый характер, который имеет две ярко выраженные зоны — ночного и дневного потребления. Вид ситуационного графика потребления электрической энергии условной типовой квартиры площадью 46 m^2 представлен на рис. 2. В нижней части рисунка отдельно выделены графики приоритетных нагрузок. Это затраты энергии на освещение, средства коммуникации, телевизор, холодильник и бытовое оборудование приоритетного использования. Как видно из рисунка, максимальное суммарное значение всех приоритетных электриче-

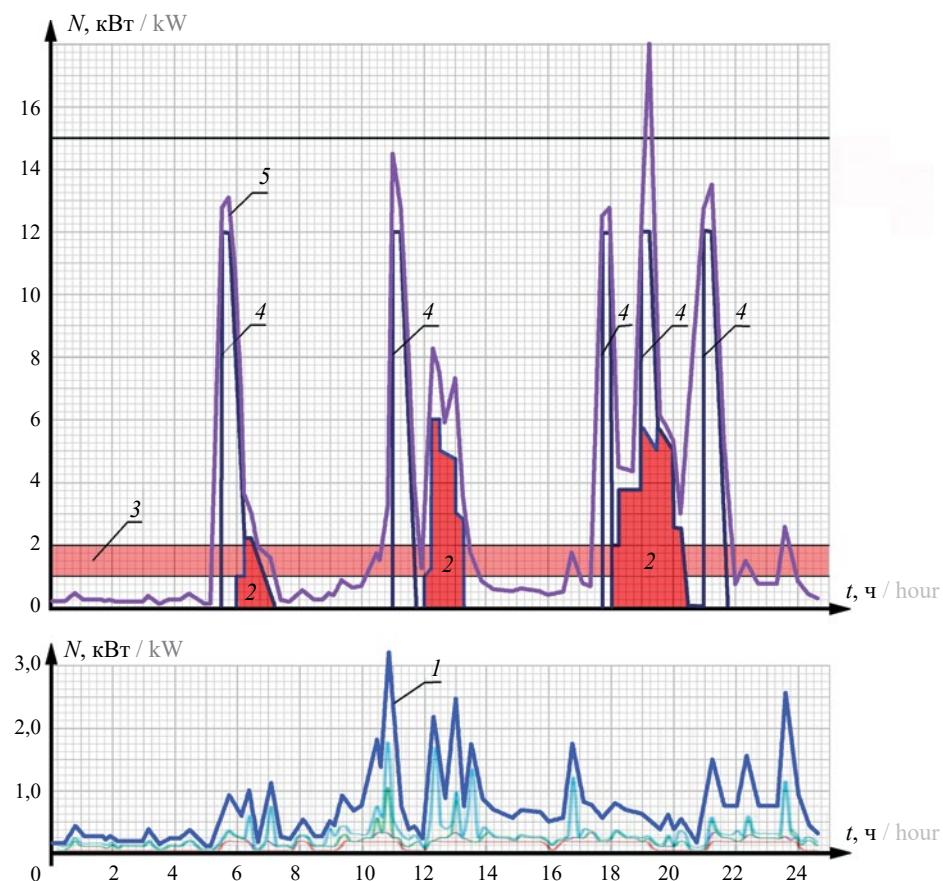


Рис. 2. Ситуационные графики потребления электрической энергии квартиры 46 m^2 , оборудованной системой электрического теплоснабжения в зимний период времени: 1 — суммарное потребление энергии приоритетными приборами; 2 — затраты энергии плитой приготовления пищи; 3 — зона изменения потребления энергии для отопления; 4 — энергия для подогрева бойлера косвенного нагрева; 5 — график суммарного потребления электрической энергии

Fig. 2. Situation-centered graphs of electricity consumption of an apartment of 46 m^2 , equipped with an electric heat supply system in winter: 1 — total energy consumption by priority appliances; 2 — energy consumption by the cooker; 3 — a range of changes in energy consumption for heating purposes; 4 — energy needed to heat an indirect heating boiler; 5 — the diagram of the total consumption of electrical energy

⁴ Energy Use Data Handbook 1990 to 2011 Canada. URL: tstatistics/handbook2011/handbook2011.pdf

⁵ International Energy Outlook 2016. URL: <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/>

ских приборов, за исключением электрической плиты, по мощности не превышает 3 кВт. В верхней части показаны графики потребления электроэнергии при подготовке горячей воды и использовании электрической плиты. Затраты электроэнергии на отопление взяты для условий г. Санкт Петербурга, для подготовки ГВС использован бойлер косвенного нагрева объемом 150 л с максимальной мощностью работы электрокотла в режиме ГВС — 12 кВт. Электроплиты — 4 конфорки по 1,5–2 кВт каждая.

Из графиков видно, что превышение выделяемого лимита потребления энергии в 15 кВт·ч произошло один раз в течение суток. Продолжительность суммарного периода превышения нагрузки в ситуационном графике составила менее 20 мин. На рисунках представлен качественный характер изменения нагрузок.

Потребление электрической энергии для бытовых нужд домохозяйства носит иерархический характер, который базируется на двух факторах: потребностях людей и тепловой инерционности технических устройств.

Потребности людей, с точки зрения использования электрических приборов (потребления энергии), можно разделить на безотлагательные — физиологические, наиболее важными из которых в рассматриваемой теме являются освещение, потребности в безопасности и защищенности, необходимости передачи информации. Их нельзя откладывать, их надо реализовывать безотлагательно. К потребностям следующего уровня можно отнести те, в которых сдвиг по времени реализации может быть в несколько десятков минут. Например, освещение в помещении, устройства передачи информации должны работать всегда или без задержки. Без них, в настоящий момент развития общества, существование невозможно. Вымыть посуду или приготовить чай, погладить белье можно и через некоторое время. Эти потребности важны, но сдвиг времени их реализации возможен. Инерционность — это способность сопротивляться чему-либо. Соблюдение необходимого температурного режима в помещении является важнейшей потребностью человека, но стены помещения имеют большую массу, и изменение температуры внутри помещения происходит медленно. При выключении отопления на некоторое время, измеряемое несколькими десятками минут, температура внутри помещения не изменится. Отопление можно отнести к нагрузкам с низшим приоритетом. Но поддержание температуры в помещении относится к первоочередным физиологическим потребностям, и при определенном уровне температуры в помещении происходит изменение структуры системы ценностей. Если в помещении холодно, то человек готов

не пользоваться, к примеру, стиральной машиной, а использовать энергию для отопления. Соответственно, возникает ситуация с изменением приоритетов пользования энергией и структуру управления электрической нагрузкой можно охарактеризовать как многоуровневую, иерархическую с плавающими диапазонами приоритетами.

Как было указано во введении, потребление электроэнергии в квартире не должно превышать 15 кВт·ч. Одновременное пользование всеми электрическими приборами в случае применения автономной системы теплоснабжения с электрическим котлом может превысить установленный лимит, в этом случае произойдет отключение всех приборов.

Для исключения этого необходимо выставить приоритеты потребления энергии, и тогда можно отключать питание части электрических приборов, если они не влияют на реализацию потребностей человека или обладают большой тепловой инерционностью.

В первую очередь, к приоритетным линиям питания электрических приборов в индивидуальном доме или квартире можно отнести линии питания освещения и внутренних электрических розеток верхнего уровня приоритета, по которому обеспечивается 100%-ная гарантия постоянного энергопитания. Для питания таких приборов должна быть выделена отдельная линия снабжения электрическим током. Вторым приоритетом является линия питания бытовых приборов, по которым допускается сдвиг временного использования. Данный уровень может быть разбит на два по индивидуальному приоритету пользователей. Низшими приоритетами обладают системы подготовки горячей воды и отопления. В большинстве случаев применения можно рассмотреть четырехуровневую систему приоритетного пользования электроприборами и электрической системой теплоснабжения. Однако в определенных ситуациях, при заданном лимите выделенной энергии для домохозяйства, нижние уровни являются условными (плавающими). Как правило, изменение уровней иерархии носит кратковременный характер и связано с экстремальными ситуациями, например со значительным увеличением обитателей домохозяйства или температуры окружающей среды. На рис. 3 представлена пирамида приоритетов в снабжении электричеством приборов домохозяйства.

В таблице приведены значения диапазонов потребляемой мощности бытовых электрических приборов⁶. По затратам электрической энергии для системы отопления расчет теплопотерь двухкомнатной квартиры площадью 46 м² в г. Санкт-Петербурге, проведенный в работе [9] при температуре окружающего

⁶ Сколько электроэнергии потребляют бытовые приборы — таблица и рекомендации по экономии. URL: <https://ledsshop.ru/potreblenie-elektroenergii-bytovymi-priborami/>



Рис. 3. Пирамида приоритетов в снабжении электричеством приборов домохозяйства

Fig. 3. A pyramid of priorities in supplying electricity to household appliances

воздуха минус 25 °С, показал, что максимальные теплопотери не превышают 2,5 кВт·ч, а средние за отопительный сезон теплопотери не превышают 1,3 кВт·ч. Для подготовки горячей воды предлагается использовать бойлер косвенного нагрева объемом 150 л с подключением к электрическому котлу через трехходовой кран. Для подготовки горячей воды в объеме 250 л/ч можно использовать электрический котел с максимальной мощностью 12 кВт·ч [18]. Данный объем горячей воды является комфортным для пользования автономной системой теплоснабжения индивидуального дома или квартиры с проживанием до 4 человек.

Среднесуточное энергопотребление бытовых приборов

Average daily consumption of household appliances

Потребитель Consumer	Мощность, Вт Power, W	Количество, шт. Quantity, pcs	Время работы за сутки Daily operating hours	Энергопотребление за сутки, Вт·ч Daily energy consumption, Wh
Микроволновая печь Microwave	1500	1	30 мин / min	750
Телевизор TV	60	1	3 ч / h	180
Электрочайник Electric kettle	1500	1	1 ч / h	1500
Холодильник Refrigerator	100	1	24 ч / h	2400
Утюг Iron	1500	1	30 мин / min	750
Компьютер Computer	350	1	4 ч / h	1400
Пылесос Vacuum cleaner	1500	1	20 мин / min	500
Обычная лампочка Light bulb	95	5	3 ч / h	1425
Энергосберегающая лампочка Energy saving light bulb	45	5	3 ч / h	675
Стиральная машина Washing machine	1500	1	1,5 ч / h	2250

Вопрос снижения энергетических затрат на отопление является важной задачей как с экономической точки зрения, так и с экологической.

В работах [19–21] представлены данные о влиянии разных факторов на повышение энергоэффективности зданий и снижение выбросов парниковых газов при использовании теплогенераторов на основе традиционных (углеводородных) видов топлива. Исследования проведены для Великобритании, Норвегии и Германии. Согласно представленным материалам, наиболее эффективной мерой по повышению энергоэффективности зданий с автономной

системой теплоснабжения является повышение теплоизоляции стен, снижающей годовое потребление газа на 10,5 % и годовое потребление электроэнергии на 8 %. Данные заключения можно распространить и на электрическое теплоснабжение.

В связи с тем, что суммарное потребление электрической энергии складывается из потребления энергии всеми одновременно включенными электрическими приборами, превышение лимита (15 кВт) произойдет практически всегда при включении подогрева ГВС, электрической плиты более двух конфорок и любого электрического прибора или освещения. Использование бойлеров косвенного нагрева для подготовки горячей воды с подключением электрического котла мощностью менее 12 кВт приведет к потере комфорта при потреблении горячей воды. Для оценки понятия необходимой мощности электрокотла для комфорtnого потребления горячей воды домохозяйством предлагается рассматривать работу бойлера в режиме длительной мощности, в этом случае объем бака не играет роли⁷. При перепаде температур 30 градусов и избыточной площади внутреннего теплообменника мощность в 12 кВт обеспечивает подготовку около 5,5 л/мин. Согласно СНиП 2.04.01-85*, норма расхода для душа составляет 5,4 л/мин. Рассматриваем данный параметр как минимальное требование для комфорtnого потребления горячей воды. Такое потребление горячей воды обеспечивается котлом с мощностью не менее 12 кВт. Характер графика суммарного потребления электрической энергии в быту непредсказуем. По весовой доли основные компоненты: нагрев горячей воды и приготовление пищи. Исходя из нормы 105 л горячей воды на человека в сутки, при 4 членах семьи время на подготовку указанного количества при мощности котла в 12 кВт нужно около 1,3 ч. Учитывая, что душ обычно принимают утром или вечером, совпадения с одновременным включением плиты на все конфорки — минимальны, но вероятность такого совпадения с одновременным использованием других электрических приборов есть. Основываясь на ситуационных графиках потребления электрической энергии, представленных на рис. 2, наличия приоритета подготовки горячей воды перед отоплением, заложен-

ного в алгоритмах работы электрических котлов, резервного объема нагретой воды в бойлере косвенного нагрева, промежутков между пользованием горячей воды жильцами квартиры или индивидуального дома, можно заявить, что лимит в 15 кВт в час на выделенную электрическую энергию домохозяйства с отапливаемой площадью до 80 м² достаточен.

Комфортность потребления электрической энергии обеспечивается установкой дополнительного реле приоритета линии питания электрического котла⁸. При установке данного реле вводится трехуровневая иерархия работы электрических приборов домохозяйства. Все приборы потребления относятся к приоритетному уровню, котел подключен через реле с низшим приоритетом. Алгоритм работы электрического котла функционирует в приоритете ГВС по отношению к режиму отопления. Реле приоритета — устройство электромеханического типа, надежность которого зависит от количества срабатываний. Для исключения постоянного срабатывания реле приоритета в цепь нагрузки необходимо добавить реле времени⁹. Установленная продолжительность периода работы реле времени определяется характером колебания потребления электрической энергии в помещении. Целесообразно рассматривать нагрузки периодического включения мощностью более 1 кВт. Это могут быть конфорки плиты приготовления пищи, утюг, чайник, стиральная машина. Интервал проверки одновременного использования данных устройств согласно графиков их работы не должен быть менее трех-пяти минут. Это и должно быть принято как минимальный интервал работы реле времени системы приоритетного управления системой электропитания домохозяйства.

В настоящее время на российском рынке существует много компаний, в линейке которых есть полноценные электрические котлы — микротельные, оснащенные циркуляционным насосом и расширительным баком^{10, 11, 12, 13, 14, 15}, большая часть из них обладает функцией работы с внешним трехходовым краном для работы с бойлером косвенного нагрева подготовки ГВС. С точки зрения примени-

⁷ Рекомендации «Баки косвенного нагрева Buderus Logalux». URL: https://www.buderus.com/ru/media/country-pool/professional/dokumentatsiya/logalux/____.pdf

⁸ АВВ. Приборы управления нагрузкой. URL: https://ep.ru/product/katalogs/ABB/03_System_pro_M_09.pdf

⁹ Реле времени. Назначение и принцип работы. URL: <https://www.asutpp.ru/chto-takoe-rele-vremeni-i-kak-ono-rabotaet.html>

¹⁰ Руководство по эксплуатации Vaillant eloBLOCK 0020264793_01. URL: <https://thermogaz.ru/upload/medialibrary/aea/rdg88xxgirs1hcrtiekwdd0y4e729a21.pdf>

¹¹ Руководство по эксплуатации PROTHERM RAY 12 KE. URL: http://thermomir.ru/files/it/840_1002.pdf

¹² Котлы электрические отопительные ZOTA «Lux»: паспорт и инструкция по эксплуатации. URL: http://tatic/uploaded/documentation/entries/files/ZOTA_LUX_3-48_30_08_2021.pdf

¹³ Электрический котел мгновенного нагрева. Руководство пользователя. NAVIEN EQB 12 HW. URL: <https://www.navien.ru/upload/docs/c1/6a/c16a5320fa475530d9583c34fd356ef5/23b29c287e3dd6de4b786eba9958c343/rukovodstvo-polzovatelya-eqb-y2020-pdf.pdf>

¹⁴ Руководство по эксплуатации BAXI Ampera 12. URL: https://ampera.baxi.ru/upload/Ampera_Инструкция.pdf

¹⁵ Руководство по эксплуатации THERMEX TESLA 12. URL: https://thermex-boiler.ru/manuals/rukovodstvo_kotel_tesla.pdf

ности к работе в режиме приоритетного управления важны два фактора. Первый — это тип коммутационного устройства управления нагрузкой. Современные системы управления базируются на электронных (полупроводниковых) элементах — симисторах. Они более компактны, надежны по сравнению с устаревшими электромеханическими (релейными). Второй важный параметр — шаг регулирования нагрузкой. В системах с релейным регулированием возможно только включение и выключение одного из ТЭНов. Обычно в электрических котлах бытового назначения применяют нагревательный блок из 3–6 ТЭНов, каждый из которых имеет мощность 2,0–4 кВт. Соответственно, в системах с релейным управлением нагрузкой шаг регулирования кратен мощности ТЭНа. В системах с переменным током и симисторной системой коммутации нагрузки возможно включение мощности каждого ТЭНа на 1–0,5–0,25... доли мощности. То есть шаг регулирования может быть частью от мощности каждого ТЭНа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 4 показан вариант нагрузки электрической сети домохозяйства с ограничением потребляемой электрической мощности 15 кВт и суммарной приоритетной нагрузкой 6 кВт. Необходимая тепловая мощность на отопление 3 кВт. Представлен график изменения мощности котла ARDERIA E12¹⁶. В котле установлено 6 ТЭНов по 2 кВт с шагом изменения нагрузки 1 кВт. Сравнение происходит

с котлом суммарной мощности 12 кВт с ТЭНами по 2 кВт и релейной схемой управления. На обоих котлах установлен алгоритм плавного запуска с интервалом шага 10 с. Задержка реле времени на повторное включение неприоритетной нагрузки составляет 3 мин. Из графиков видно, что при установке реле приоритета на линию питания электрокотла в варианте с релейным переключением ТЭНов по 2 кВт каждый нагрев на «отопление» практически не происходит. Реле приоритета отключает котел при каждом повторном пуске при выходе котла на мощность 8 кВт через каждые 3 мин. Поскольку нагрев длится только 40 секунд с последующей паузой 3 мин, теплогенератор не успевает передать тепловую энергию отопительным приборам. В варианте котла с симисторным управлением и шагом изменения нагрузки 1 кВт нагрев происходит следующим образом. Объем теплоносителя в системе поквартирного отопления мал. Рост нагрузки происходит более медленно и в течение минуты нагретый котлом теплоноситель возвращается в котел, поскольку радиаторы отопления обладают тепловой инерцией и не успевают передать энергию помещению. Алгоритм работы котла имеет обратную связь в контроллере управления по разнице температур прямой и обратной магистрали. При уменьшении разницы температур происходит снижение мощности нагрева. В течение нескольких минут (зависит от инерционности приборов отопления и размера отапливаемого помещения) режим работы нагрева котла выходит на установившийся, равный тепло-

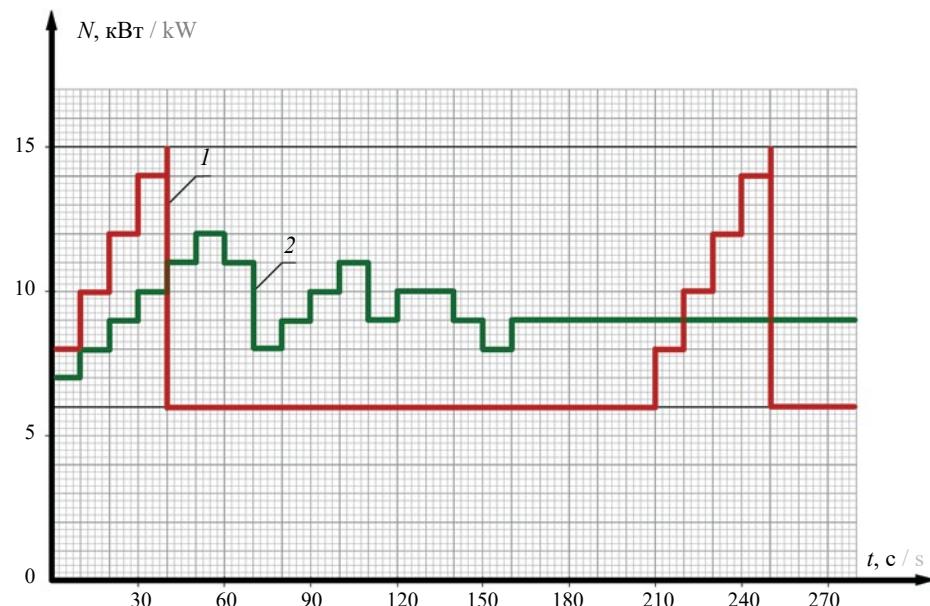


Рис. 4. Графики нагрузки электрической сети при лимите ограничения 15 кВт·ч и приоритетной нагрузке 6 кВт·ч при работе электрического котла в режиме «отопление»: 1 — котел с релейным управлением нагрузкой; 2 — котел с симисторным управлением нагрузкой

Fig. 4. Electrical network load schedules for the limit of 15 kWh and the priority load of 6 kWh if the electric boiler is operating in the “heating” mode: 1 — a boiler with a relay load control system; 2 — a boiler with a triac load control system

¹⁶ Руководство по эксплуатации ARDERIA E12. URL: https://teplogidroinvest.ru/downloads/passports/etc/pasport_arderia_E.pdf

потерям помещения. Превышение лимита в 15 кВт не происходит.

При работе электрического котла в режиме подготовки горячей воды вероятность его отключения по превышению общего лимита в 15 кВт большая. Установленный бойлер косвенного нагрева позволит компенсировать отсутствие нагрева в течение 20 мин. При более длительном времени дефицит горячей воды вызывает дискомфорт. Для исключения таких ситуаций из перечня составных нагрузок красного уровня, показанного на рис. 3, выбирается нагрузка питания всех конфорок плиты приготовления пищи. В приоритетном потреблении оставляется только две конфорки, а две временно, на момент экстремального сочетания нагрузок, переводятся в самый низкий уровень потребления. Система теплоснабжения получает временный дополнительный лимит нагрузки. Для обеспечения такой иерархической четырехуровневой системы управления с переменными низшими ступенями приоритета необходимо выполнить подключение плиты приготовления пищи или других электрических приборов данного уровня иерархии потребления электрической энергии через беспроводное реле дистанционного управления по радиоканалу или Wi-Fi и реле времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Электрические котлы с симисторным управлением и малым шагом изменения нагрузки обладают возможностью линейной модуляции мощности во всем диапазоне изменения тепловых нагрузок

индивидуальных автономных систем отопления и горячего водоснабжения.

Индивидуальные дома и квартиры многоэтажных домов с отапливаемой площадью до 80 м² могут эффективно использовать электрические котлы в качестве теплогенераторов для автономных систем теплоснабжения. В качестве оборудования для подготовки ГВС целесообразно использовать бойлеры косвенного нагрева объемом 150 л с управлением трехходовым краном с приоритетом по горячей воде.

Мощность электрического котла определяется возможностью комфортного объема подготовки горячей воды, составляет 12 кВт.

Структура потребления электрической энергии домохозяйства с отапливаемой площадью до 80 м² с использованием электрических котлов для автономного теплоснабжения носит четырехуровневый иерархический характер с ограничением приоритета по нижним ступеням. Приоритетное потребление касается всех приборов бытового потребления. Управление электрическим котлом должно быть подключено отдельной линией с реле приоритета. Алгоритм управления работой электрического котла должен иметь внутренний приоритет в подготовке ГВС.

Выделенный лимит в 15 кВт·ч вполне достаточен для комфортного пользования любыми существующими в настоящий момент электрическими приборами, а также автономной системой теплоснабжения для помещений площадью до 80 м², расположенных в центральной части Российской Федерации, и до 100 м² в южных и восточных ее районах РФ или квартир в многоэтажных многоквартирных домах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стерюков К.Г., Стародубцева О.А. Проблемы внедрения новых технологий и технических средств с целью увеличения КПД в энергетической отрасли // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 25. С. 58–73. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34861788>
2. Хаванов П.А., Харламова Н.А. Оценка теплотехнической эффективности применения настенных двухконтурных котлов в поквартирных системах теплоснабжения // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : мат. XVIII Междунар. науч.-конф. Москва, 25–29 сентября 2020 г. Волгоград : Изд-во ВолГМУ, 2020. С. 198–203.
3. Табунников Ю.А. Конденсационные котлы в автономном теплоснабжении // АВОК. 2016. № 4. С. 26–31. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6406
4. Хаванов П.А., Чуланев А.С. Климатические параметры и эффективность конденсационных котлов // АВОК. 2016. № 3. С. 56–64. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6375
5. Наумов Н.Р., Марьяндыев П.А., Попов А.Н., Любов В.К. Исследование работы газовых котлов малой мощности // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. № 4 (79). С. 27–33. DOI: 10.23859/1994-0637-2017-4-79-4
6. Хаванов П.А., Чуланев А.С. Результаты испытаний конденсационного котла при различных режимах эксплуатации // Научное обозрение. 2015. № 10. С. 45–49.
7. Andric I., Pina A., Ferrao P., Lacariere B., Le Corre O. On the performance of district heating systems in urban environment: an energy approach // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 142 (P1). Pp. 109–120. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.124
8. Vignal G. Environmental assessment of domestic boilers: A comparison of condensing and traditional technology using life cycle assessment methodology // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 142. Pp. 2493–2508. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.025

9. Пилипенко Н.В. Тепловые потери и энергетическая эффективность зданий и сооружений : учебное пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2016. 54 с.
10. Хаванов П.А. Атмосферные газовые горелки автономных генераторов // АВОК. 2003. № 1. С. 54. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=1914
11. Торопов А.Л. Исследование работы газовых клапанов конвекционных котлов малой мощности // АВОК. 2020. № 3. С. 58–61. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7505
12. Торопов А.Л. Вопросы эффективности работы конвекционных настенных газовых котлов при поквартирном теплоснабжении // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2021. № 6 (234). С. 42–45. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/voprosy-effektivnosti-raboty-konvekcionnyh-nastennyh-gazovyh-kotlov-pri-pokvartirnom-teplosnabzhenii>
13. Гальперова Е.В. Анализ долгосрочных тенденций потребления энергоресурсов домохозяйствами // Проблемы прогнозирования. 2019. № 2. С. 51–62. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39554862>
14. Егоров А.О., Люханов Е.А., Постелова М.В., Черепанова М.Д. Исследование режимов работы электроприемников бытовых потребителей // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург, 16–20 мая 2016 г. Екатеринбург : УрФУ, 2016. С. 146–149.
15. Антонов Н.В. Электросбережение в бытовом секторе: возможности применения зарубежного опыта в России // Электрика. 2010. № 7. С. 3–9. URL: http://www.kudrinbi.ru/public/30042/index.htm#_ftn1
16. Lapillonne B., Pollier K., Samci N. Energy efficiency trends for households in the EU. ODYSSEE MURE (May 2015). URL: <http://www.odyssee-mure.eu/publications/efpcency-by-sector/household/household-eu.pdf>
17. Прогноз развития энергетики мира и России 2016 / под ред. А.А. Макарова, Л.М. Григорьева, Т.А. Митровой. М. : ИНЭИ РАН — АЦ при Правительстве РФ, 2016. 200 с.
18. Расчет и подбор баков — водонагревателей. Документация для проектирования. BUDERUS Издание 07/2002 (A4.06.1). 164 с. URL: <https://www.c-o-k.ru/library/instructions/buderus/boyery-kosvennogo-nagрева/1469/15283.pdf>
19. Adan H., Fuerst F. Do energy efficiency measures really reduce household energy consumption? A difference-in-difference analysis // Energy Efficiency. 2016. Vol. 9. Pp. 1207–1219. DOI: 10.1007/s12053-015-9418-3
20. Rosenow J., Galvin R. Evaluating the evaluations: Evidence from energy efficiency programmes in Germany and the UK // Energy and Buildings. 2013. Vol. 62. Pp. 450–458. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.03.021
21. Nord N., Fjærli Sjøthun S. Success factors of energy efficiency measures in buildings in Norway // Energy and Buildings. 2014. Vol. 76. Pp. 476–487. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.010

Поступила в редакцию 22 мая 2022 г.

Принята в доработанном виде 17 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 19 октября 2022 г.

О Б А Т О Р Е: Алексей Леонидович Торопов — кандидат технических наук, генеральный директор — главный конструктор; Инженерный центр «Апрель»; 105122, г. Москва, Шелковское шоссе, д. 13; РИНЦ ID: 1030472, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

REFERENCES

1. Stertyukov K.G., Starodubtseva O.A. Problems of introduction of new technologies and technical tools to increase efficiency in the energy sector. *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems.* 2018; 25:58–73. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34861788> (rus.).
2. Havanov P.A., Harlamova N.A. Evaluation of the thermal efficiency of the use of wall-mounted double-circuit boilers in apartment heating systems. *Quality of Indoor Air and Environment : materials of the XVIII International Scientific Conference. Moscow, September 25–29, 2020.* Volgograd, VolGMU Publishing House, 2020; 198–203. (rus.).
3. Tabunshchikov Yu.A. Condensation boilers in autonomous heat supply. *ABOK.* 2016; 4:26–31. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6406 (rus.).
4. Havanov P.A., Chulenev A.S. Climatic parameters and efficiency of condensation boilers. *AVOK.* 2016; 3:56–64. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6375 (rus.).
5. Naumov N.R., Maryandyshev P.A., Popov A.N., Lyubov V.K. Study on gas boilers of low capacities. *Cherepovets State University Bulletin.* 2017; 4(79): 27–33. DOI: 10.23859/1994-0637-2017-4-79-4 (rus.).
6. Havanov P.A., Chulenev A.S. Results of condensing boiler tests under different operational regimes. *Scientific review.* 2015; 10:45–49. (rus.).
7. Andric I., Pina A., Ferrao P., Lacariere B., Le Corre O. On the performance of district heating systems in urban environment: an energy approach. *Jour-*

nal of Cleaner Production. 2016; 142(P1):109-120. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.124

8. Vignali G. Environmental assessment of domestic boilers: A comparison of condensing and traditional technology using life cycle assessment methodology. *Journal of Cleaner Production.* 2017; 142:2493-2508. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.025

9. Pilipenko N.V. *Heat losses and energy efficiency of buildings and structures : a tutorial.* St. Petersburg, ITMO University, 2016; 54. (rus.).

10. Havanov P.A. Atmospheric gas burners of autonomous heat generators. *AVOK.* 2003; 1:54. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=1914 (rus.).

11. Toropov A.L. Analysis of operation of gas valves of low-power convection boilers. *AVOK.* 2020; 3:58-61. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7505 (rus.).

12. Toropov A.L. Issues of operating efficiency of convection wall gas boilers with apartment heat supply. *Plumbing, Heating, Air Conditioning.* 2021; 6(234):42-45. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/voprosy-effektivnosti-raboty-konvekcionnyh-nastennyh-gazovyh-kotlov-pri-pokvartirnom-teplosnabzhenii> (rus.).

13. Galperova E.V. Long-term analysis of energy consumption by household. *Studies on Russian Economic Development.* 2019; 30(2):146-153. DOI: 10.1134/S1075700719020060 URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38999842> (rus.).

14. Egorov A.O., Lyukhanov E.A., Pospelova M.V., Cherepanova M.D. Study of operating modes of electrical receivers of domestic consumers. *Proceedings of the first scientific and technical conference of young scientists of the Ural Energy Institute. Ekater-*

rinburg, May 16–20, 2016. Ekaterinburg, UrFU, 2016; 146-149. (rus.).

15. Antonov N.V. Electricity saving in the domestic sector: the possibility of applying foreign experience in Russia. *Elektrika.* 2010; 7:3-9. URL: http://www.kudrinbi.ru/public/30042/index.htm#_ftn1 (rus.).

16. Lapillonne B., Pollier K., Samci N. *Energy efficiency trends for households in the EU. ODYSSEE MURE (May 2015).* URL: <http://www.odyssee-mure.eu/publications/efpciciency-by-sector/household/household-eu.pdf>

17. *Forecast for the development of energy in the world and Russia 2016.* Makarova A.A., Grigorieva L.M., Mitrova T.A. (ed.). Moscow, ERI RAN — AC under the Government of the Russian Federation, 2016; 200. (rus.).

18. *Calculation and selection of tanks — water heaters. Documentation for design.* BUDERUS Edition 07/2002 (A4.06.1); 164. URL: <https://www.c-o-k.ru/library/instructions/buderus/boyleru-kosvennogo-nagрева/1469/15283.pdf> (rus.).

19. Adan H., Fuerst F. Do energy efficiency measures really reduce household energy consumption? A difference-in-difference analysis. *Energy Efficiency.* 2016; 9:1207-1219. DOI: 10.1007/s12053-015-9418-3

20. Rosenow J., Galvin R. Evaluating the evaluations: Evidence from energy efficiency programmes in Germany and the UK. *Energy and Buildings.* 2013; 62:450-458. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2013.03.021

21. Nord N., Fjærli Sjøthun S. Success factors of energy efficiency measures in buildings in Norway. *Energy and Buildings.* 2014; 76:476-487. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.010

Received May 22, 2022.

Adopted in revised form on October 17, 2022.

Approved for publication on October 19, 2022.

BIO NOTES: **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.

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER

УДК 628.1:69.032.22

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1499-1512

Особенности проектных решений внутренних систем водоснабжения высотных зданий

Юлия Александровна Рыльцева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Предметом исследования являются системы внутреннего холодного водоснабжения высотных зданий, отличающиеся особой сложностью устройства, обусловленной уникальностью архитектуры таких строений, необходимостью доставки воды на значительные высоты и соблюдения требований надежности эксплуатации инженерных систем. Высотные здания чаще всего имеют статус многофункциональных, что также отражается на процессе проектирования систем внутреннего водопровода: необходим учет различных классов функциональной пожарной опасности частей здания, оборудование отдельных помещений автоматическими установками водяного пожаротушения. Особую значимость имеет вопрос энергетической эффективности систем водоснабжения, наибольшее влияние на которую оказывает принятые в проекте насосное оборудование и режим его работы. Проект внутреннего водоснабжения любого высотного здания — это всегда некое компромиссное решение между интересами инвесторов (застройщиков) и нормативной базой. Цель исследования — выявление современных тенденций проектирования внутренних систем холодного водоснабжения высотных зданий (комплексов).

Материалы и методы. Проведен обзор действующей нормативно-технической документации в сфере высотного строительства, опубликованных научных трудов по исследованию опыта проектирования инженерных систем высотных зданий. Выполнен анализ проектов систем внутреннего водоснабжения многофункциональных высотных зданий (построенных за последние пять лет или находящихся на стадии строительства), получивших положительное заключение экспертных организаций.

Результаты. Установлено, что наибольшее распространение в современных проектах систем внутреннего водопровода высотных зданий имеют зонные схемы параллельного типа с нижней разводкой. Каждая зона водопровода может обслуживать от 11 до 18 этажей, причем увеличение числа этажей в пределах одной зоны снижает энергетическую эффективность системы в целом. Неотъемлемым элементом систем водяного пожаротушения многофункциональных высотных зданий являются автоматические установки пожаротушения, при проектировании которых следует стремиться к минимизации ущерба от ложного срабатывания оросителей.

Выводы. Выполнена классификация возможных схем систем холодного водоснабжения высотных зданий, описан принцип их устройства, обозначены преимущества и недостатки, границы применимости. Представлен анализ современных проектов внутренних систем холодного водоснабжения высотных многофункциональных зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: внутренний водопровод, автоматические установки пожаротушения, высотное здание, зонные схемы водоснабжения, спринклерный ороситель, пожаротушение тонкораспыленной водой, насосная установка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рыльцева Ю.А. Особенности проектных решений внутренних систем водоснабжения высотных зданий // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1499–1512. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1499-1512

Автор, ответственный за переписку: Юлия Александровна Рыльцева, ryiltsevayua@mgsu.ru.

Special aspects of design solutions for indoor water supply systems of high-rise buildings

Yuliya A. Ryltseva

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

ABSTRACT

Introduction. The subject of research is indoor cold water supply systems of high-rise buildings. They have a complex structure due to unique architectural features, the need to pump water to higher floors and compliance with reliability requirements applicable to engineering systems. High-rise buildings are often multi-functional, and this characteristic is implemented in the process of designing indoor water supply systems: it is necessary to take into account various classes of functional fire hazards typical for different areas inside a building, and equip individual rooms with automatic water extinguishing units. Of special importance is the energy efficiency of a water supply system, since pumping equipment and its mode of operation have the greatest influence on the system. The design of an indoor water supply system for any high-rise structure is always a compromise between the interests of investors (developers) and the regulations. The purpose of the study is to identify current trends in the design of indoor cold water supply systems for high-rise buildings (or complexes).

Materials and methods. The overview is based on current regulatory and engineering documentation governing high-rise construction, as well as the research papers focused on the design of engineering systems of high-rise buildings. The author

analyzed several designs of indoor water supply systems for multi-functional high-rise buildings, in respect of which positive opinions had been issued by the expert organizations.

Results. It is established that up-feed parallel water supply systems, broken down into zones, are most widely used in the present-day projects of indoor water supply systems designed for high-rise buildings. Each water supply zone can serve 11 to 18 floors, and an increase in the number of floors within one zone reduces the energy efficiency of the system. Automatic fire extinguishing systems are an integral element of water fire extinguishing systems in multi-functional high-rise buildings. Any damage, inflicted by the false triggering of sprinklers, should be minimized at the stage of design.

Conclusions. The author classified potential cold water supply systems for high-rise buildings, described their principle of operation, strengths, weaknesses, and applicability limits. The research project also encompasses the analysis of present-day designs of indoor cold water supply systems for multi-functional high-rise buildings.

KEYWORDS: indoor water supply, automatic fire extinguishing units, high-rise building, zone-focused water supply systems, sprinkler, thin spray water fire extinguishing, pump

FOR CITATION: Ryltseva Yu.A. Special aspects of design solutions for indoor water supply systems of high-rise buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1499-1512. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1499-1512 (rus.).

Corresponding author: Yuliya A. Ryltseva, ryiltsevayua@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Нормативными документами — СП 253.1325800.2016¹, СТО НОСТРОЙ/НП 2.15.71-2012² закреплено определение термина «высотное здание», согласно которому к таковым можно отнести домостроения высотой (от нижней планировочной отметки до низа самого верхнего открывающегося проема или окна наружной стены) более 55 м в отношении общественных зданий и более 75 м в отношении жилых.

В настоящее время (согласно данным открытых источников³) в г. Москве уже построено 102 здания высотой от 100 до 373 м. Самыми старинными из них являются главное здание МГУ, здание Министерства иностранных дел России, здание на площади Красных ворот, гостиницы «Ленинградская» и «Украина», жилые дома на Котельнической набережной и Кудринской площади, построенные в 50-е гг. прошлого века. Еще 26 высотных зданий (высотой от 129 до 443 м) планируется возвести до окончания 2024 г.

Интерес застройщиков к высотному строительству продиктован высокой стоимостью земли в престижных районах городов-миллионников, высокой плотностью застройки такой местности. Высотные здания чаще всего имеют статус многофункциональных: это относится и к общественным, и к жилым зданиям. Высотное домостроение имеет как положительное, так и отрицательное влияние на жизнь населения города.

Положительные стороны:

- сокращение мигрантовых миграций населения в пределах города: в одном здании человек может быть обеспечен большинством необходимых товаров и услуг, и, кроме того, рабочим местом;

- развитие экономики города: бизнеса, туризма [1, 2];

- высотные здания являются украшением города, делают его облик значимым, отличительным ввиду уникальности их архитектуры [3];

- более низкая стоимость квадратного метра жилья (при сравнении домов одинакового класса).

Есть и отрицательные аспекты, к числу которых можно отнести:

- психологический дискомфорт людей, проживающих в высотных зданиях: зарубежными учеными доказано [4, 5], что у проживающих в высотных зданиях чаще наблюдаются невротические расстройства и фобии;

- эвакуация людей при пожаре из высотного здания представляется сложной задачей ввиду быстрого темпа распространения огня и, особенно, дыма по вертикали [6];

- сложности наружного пожаротушения высотных зданий с учетом имеющихся в распоряжении города передвижных средств тушения огня [7].

Рост строительных объектов в высоту, а не по горизонтали требует привлечения научно-технических технологий проектирования, строительства и эксплуатации таких объектов, в том числе его инженерных систем. Принципы проектирования инженерных систем высотных зданий имеют значительные отличия при сравнении с домами средней и повышенной этажности [8]. Нередко проектирование выполняется на основании специальных технических условий, согласованных в установленном порядке, ввиду сложности объемно-планировочных решений здания [9], недостаточности (отсутствия) нормативной базы в части отдельных вопросов. В настоящей статье будут рассмотрены особенности устройства, современные тенденции проектирования систем внутреннего холодного водоснабжения высотных зданий.

¹ СП 253.1325800.2016. Инженерные системы высотных зданий. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200139948>

² СТО НОСТРОЙ/НП 2.15.71-2012. Инженерные сети высотных зданий. Устройство систем водоснабжения, канализации и водяного пожаротушения. Правила проектирования и монтажа. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110310>

³ Список самых высоких зданий Москвы. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_самых_высоких_зданий_Москвы

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В целях систематизации и анализа информации об устройстве, о схемных решениях систем внутреннего водопровода высотных зданий выполнен обзор информационных источников: учебников, периодических изданий, сайтов компаний для проектировщиков, на которых представлены видеозаписи вебинаров, интервью специалистов архитектурно-строительной сферы. Формирование аналитической информации о проектах инженерных систем высотных домостроений выполнено на основании данных, размещенных на портале «Единая информационная система жилищного строительства» (URL: <https://наш.дом.рф/>). Достоверность сведений, представленных на портале, обеспечивается Федеральным законом от 30.12.2004 № 214-ФЗ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

К числу российской нормативно-технической документации, регулирующей вопросы устройства систем водоснабжения в высотных зданиях, можно отнести: СП 253.1325800.2016¹, СП 267.1325800.2016⁴, ТСН 31-332-2006⁵ (документ применяется на добровольной основе в г. Санкт-Петербурге), СТО НОСТРОЙ/НП 2.15.71-2012², СП 477.1325800.2020⁶. Во многих из перечисленных документах присутствуют ссылки на своды правил СП 30.13330⁷, СП 10.13130⁸ при обозначении требований в отношении отдельных элементов водопровода.

Согласно СП 253.1325800.2016¹, СТО НОСТРОЙ/НП 2.15.71-2012² системы хозяйствственно-питьевого и противопожарного водоснабжения высотного здания следует предусматривать раздельными. В действующей нормативной документации есть некоторые разногласия в отношении требований по количеству вводов водопровода в здание. Так, СП 253.1325800.2016¹ рекомендует устраивать не менее двух двухтрубных вводов для зданий высотой более 200 м, в то время как в СТО НОСТРОЙ/НП 2.15.71-2012² аналогичное требование распространяется в отношении зданий выше 150 м. Каждый ввод рассчитывается на 50%-ный суммарный расход воды. В целом на сегодняшний день следует отметить нехватку литературы, информационных источников, в которых изложен опыт проектирования, монтажа и эксплуатации систем водоснабжения высотных зданий. Комплексный анализ действующей нормативно-технической документации, учебных пособий и периодических изданий позволяет выделить следующие конструктивные раз-

новидности схем систем холодного водоснабжения высотных зданий.

По общему принципу подачи воды в зоны водопровода здания.

1. Параллельные схемы (рис. 1), подразделяемые, в свою очередь, в зависимости от способа повышения давления на [10]:

- системы прямого повышения давления: насосные установки подают воду потребителям непосредственно из питающей здание водопроводной сети. Подобным системам отдается предпочтение в случае достаточности расхода воды в точке подключения (источнике водоснабжения) в часы максимального водопотребления;
- системы повышения давления с разрывом струи: насосная установка подает воду потреби-

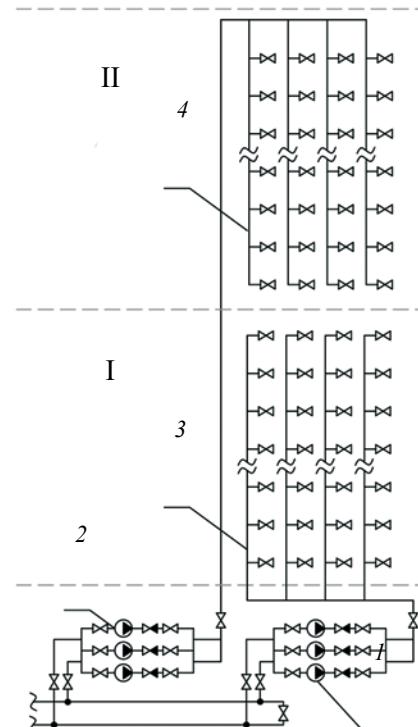


Рис. 1. Параллельная схема (принципиальная) внутреннего водопровода высотного здания: I, II — первая и вторая зона водопровода соответственно; 1, 2 — насосная установка первой и второй зоны соответственно; 3, 4 — водоразборный стояк первой и второй зоны соответственно

Fig. 1. The parallel indoor cold water supply system for a high-rise building: I, II — the first and second zones of water supply; 1, 2 — the pump serving the first and second zones; 3, 4 — the water intake riser of the first and second zones

⁴ СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044284>

⁵ ТСН 31-332-2006. Жилые и общественные высотные здания. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200043846>

⁶ СП 477.1325800.2020. Здания и комплексы высотные. Требования пожарной безопасности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564612859>

⁷ СП 30.13330.2020. Внутренний водопровод и канализация зданий. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573741260>

⁸ СП 10.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Внутренний противопожарный водопровод. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573741260>

тету из резервуара, располагающегося перед ним. Устройство резервуара (накопительного бака) позволяет решить вопрос нехватки расхода воды в часы максимального разбора, к тому же в нем может храниться объем воды для тушения пожара.

При параллельной схеме все насосные установки водопровода располагаются на нижнем техническом этаже здания (не ниже первого подземного этажа). Каждая установка обслуживает свою зону по высоте, следовательно, рассчитана на расход и требуемый напор только в пределах обслуживаемой зоны. У данной схемы много весомых преимуществ, к числу которых можно отнести отсутствие шума от насосных установок на промежуточных этажах здания, возможность отказа от накопительных баков между зонами здания, сокращение площадей здания, задействованных в размещении инженерной инфраструктуры. Кроме того, параллельные схемы более удобны в эксплуатации

ввиду того, что основное оборудование (насосные установки, шкафы управления ими, запасные и регулирующие емкости), как правило, располагается в одном месте. Недостатком схемы является ее низкая энергетическая эффективность в сравнении с альтернативой — последовательной схемой подачи воды, а также большая суммарная протяженность трубопроводов (что повышает риск протечек воды).

2. Последовательные схемы. Данная схема (рис. 2) требует устройства технических этажей с расположением на них баков, одновременно являющихся водонапорными для нижерасположенных водопотребителей и накопительными для расположенных выше. Как отмечается в работе [11], подобные схемы наибольшее распространение имеют в странах Азии, ввиду действия на их территориях норм безопасности, согласно которым высотное здание должно иметь так называемые эвакуационные зоны

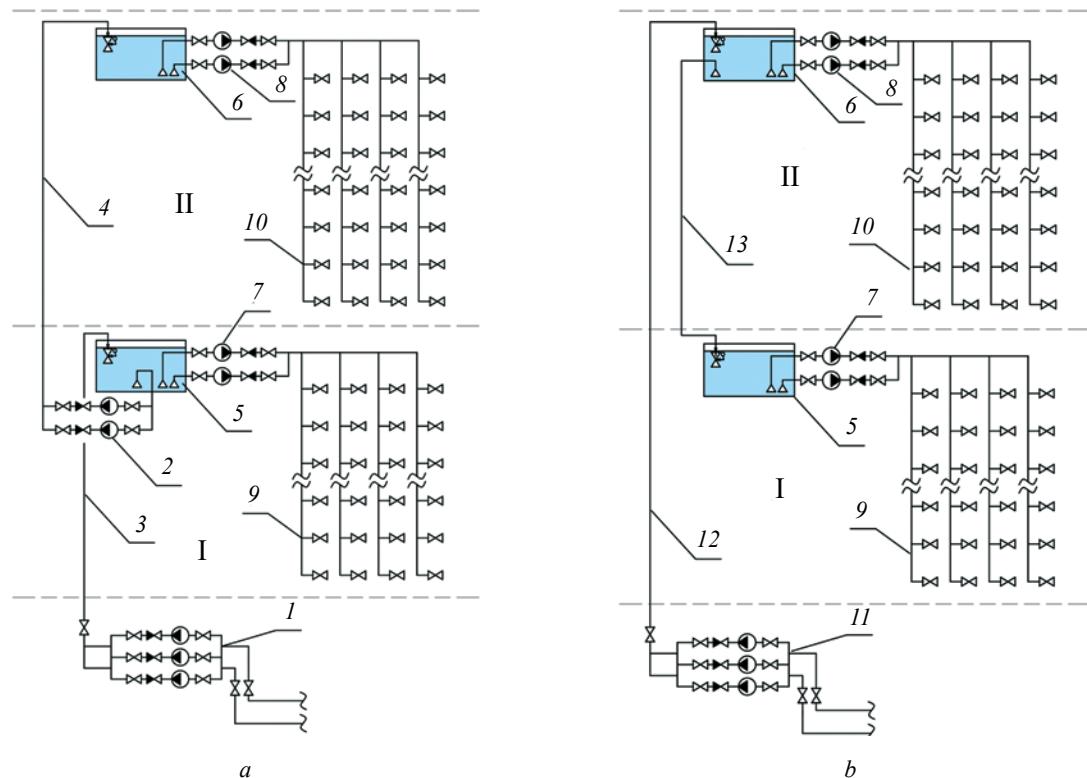


Рис. 2. Последовательная схема (принципиальная) внутреннего водопровода высотного здания: *a* — без устройства общего водоподающего стояка; *b* — с устройством общего водоподающего стояка; I, II — первая и вторая зона водопровода соответственно; 1, 2 — насосная установка для подачи воды в бак первой и второй зоны соответственно; 3, 4 — водоподающий стояк для заполнения накопительного бака первой и второй зоны соответственно; 5, 6 — накопительный бак первой и второй зоны соответственно; 7, 8 — насосная установка для подачи воды в первую и вторую зону соответственно; 9, 10 — водоразборный стояк первой и второй зоны соответственно; 11 — насосная установка для подачи воды в бак верхней зоны; 12 — общий водоподающий стояк для наполнения накопительных баков; 13 — трубопровод для подачи воды из бака первой зоны в бак второй зоны

Fig. 2. Sequential (basic) indoor water supply system for a high-rise building: *a* — the system that has no shared water supply riser; *b* — the system that has a shared water supply riser; I, II — first and second zones of water supply; 1, 2 — the pump that feeds water to the tank of the first and second zones; 3, 4 — the water supply riser that fills the storage tank of the first and second zones; 5, 6 — the storage tank of the first and second zones; 7, 8 — the pump feeding water to the first and second zones; 9, 10 — the water riser of the first and second zones; 11 — the pump supplying water to the tank of the upper zone; 12 — the shared water supply riser for storage tanks; 13 — the pipeline for water supply from the tank of the first zone to the tank of the second zone

через каждые 12–15 этажей. Достоинства схемы: возможность гравитационной подачи воды потребителю (при обеспечении необходимого напора перед водоразборной арматурой), что исключает избыточное давление, стабилизирует напор воды перед водоразборными точками; возможность деаэрации воды; большая энергоэффективность (насосные установки всегда работают в рабочей точке); непрерывность подачи воды при перебоях в электроснабжении; возможность хранения пожарного запаса воды. К недостаткам схемы можно отнести: шум, создаваемый насосными установками, расположенными на технических этажах; возможность ухудшения качества воды в баках-накопителях; потери площадей здания, которые могут быть проданы как жилые или коммерческие; более высокие капитальные затраты на строительство системы. Если подача воды из бака в зону водопровода предполагается без использования насосов, то, с учетом величины свободного напора воды, который необходимо обеспечить перед водоразборной точкой потребителя, вероятна необходимость расположения этого бака на несколько этажей выше обслуживаемой зоны. Наиболее целесообразный вариант — устройство нескольких магистральных трубопроводов от одного бака, один из которых будет работать под напором насосной установки для подачи воды на верхние 6–7 этажей зоны, обслуживающей баком, другие — под гидростатическим напором (рис. 3). Специалисты эксплуатирующих организаций отмечают, что баки запаса воды являются достаточно проблемным в использовании оборудованием: следует постоянно контролировать их санитарное состояние, не исключен риск попадания в питьевую воду посторонних веществ. В публикации [12] предлагаются технические этажи заменять техническими помещениями, а остальное пространство этажа отдавать под квартиры или коммерческие помещения. Однако и в этом случае вопрос подавления шума от насосных установок не теряет своей актуальности.

По способу наполнения баков последовательные схемы можно разделять на:

- схемы с устройством общего водоподающего стояка, посредством которого вода подается вначале в самую высокорасположенную емкость, а затем поступает в нижние;

- схемы без общего водоподающего стояка. Такие схемы предполагают заполнение водонапорного бака каждой зоны индивидуальным насосом из нижерасположенного бака.

По расположению магистральных трубопроводов:

- 1) схемы с нижней разводкой магистралей (см. рис. 1, зона I), при которых магистральные трубопроводы размещаются под обслуживаемой зоной потребителей воды;

- 2) схемы с верхней разводкой магистралей (см. рис. 2), при которых магистральные трубопроводы

размещаются над обслуживаемой зоной потребителей воды;

3) комбинированные схемы (рис. 1), при которых или отдельные зоны водопровода (в пределах одной секции здания) могут иметь различное расположение магистрали, или разные секции одного здания имеют различную разводку.

По расположению водоразборных стояков:

- 1) схемы с расположением стояков в пределах квартир (в санитарных узлах и кухнях);

- 2) схемы с расположением стояков вне пределов квартир (в лестнично-лифтовых холлах, в межквартирных коридорах); в этом случае водоразборные стояки могут быть тупиковыми или замкнутыми. Схему с размещением стояков вне квартир рекомендует СТО НОСТРОЙ/НП 2.15.71-2012². Весомым преимуществом схемы является возможность оперативного перекрытия аварийных участков трубопроводной сети (что особенно ценно при отсутствии владельца квартиры, в которой происходит утечка воды), а также возможность замены стояков без участия собственников квартир.

Выбор варианта схемы водоснабжения любого здания должен производиться при анализе ее энергетической эффективности. В случае с высотными зданиями, в отношении которых вопрос доставки воды на верхние отметки является особенно сложной задачей, энергосбережение имеет повышенную значимость [13–15]. В работе [16] предложено оценивать энергетическую эффективность внутреннего водопровода высотных зданий величиной коэффициента:

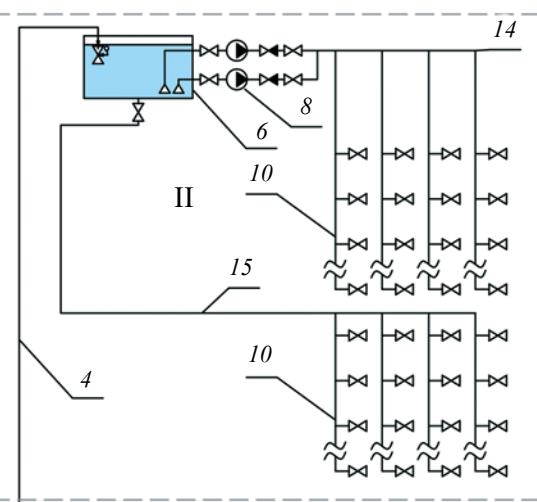


Рис. 3. Принципиальная схема подачи воды из бака: 14 — магистральный трубопровод, работающий под напором насосной установки; 15 — магистральный трубопровод, работающий под гидростатическим напором; остальные позиции аналогично рис. 2

Fig. 3. Schematic diagram of water supply from the tank: 14 — main pipeline operating under the pressure of the pump; 15 — main pipeline operating under hydrostatic pressure; the remaining positions are similar to Fig. 2

$$K_3 = \frac{\sum A_h}{\sum A_\Phi},$$

где $\sum A_h$ — затраты энергии, минимально необходимые для нормативного разбора воды через водоразборные приборы на всех этажах здания; $\sum A_\Phi$ — фактические затраты энергии.

В труде [10] представлена зависимость гидравлической мощности насосов от числа зон водоснабжения высотного здания (табл. 1).

Приведенные выше данные подтверждают, что с увеличением числа зон водоснабжения в здании снижаются затраты электроэнергии на работу насосных установок, однако, не следует забывать об увеличении общей протяженности трубопроводной сети и числа насосов, обслуживающих систему, что несомненно удорожает строительство.

На основании данных портала «Единая информационная система жилищного строительства» [URL: <https://наш.дом.рф/>] автором проведен обзор проектов систем водоснабжения высотных многофункциональных зданий России, введенных в эксплуатацию за последние пять лет, а также находящихся на стадии строительства. Выборка объектов строительства имела случайный характер. Краткая характеристика схем рассмотренных систем хозяйствственно-питьевого водопровода представлена в табл. 2.

Данные табл. 2 свидетельствуют, что зонирование внутреннего водопровода выполняется из расчета обеспечения водой каждой зоны с числом этажей от 11 до 18. Наибольшее применение находят параллельные схемы с нижней разводкой магистралей, что подтверждает «непривлекательность» водонапорных

Табл. 1. Зависимость энергосбережения при транспортировке воды от количества зон внутреннего водопровода

Table 1. Dependence of water energy saving on the number of zones in an indoor water supply system in the course of transportation

Количество зон водопровода Number of water supply zones	1	2	3	4	5	6	7	8
Снижение гидравлической мощности, % Hydraulic power reduction, %	0	25	33	37	40	42	43	44

Табл. 2. Характеристика систем внутреннего хозяйствственно-питьевого водоснабжения многофункциональных жилых зданий

Table 2. Characteristics of indoor drinking water supply systems of multi-functional residential buildings

Наименование жилого комплекса (ЖК), расположение Name of a residential complex, location	Количество этажей Number of floors	Количество зон водопровода Number of water supply zones	Дополнительная характеристика системы водоснабжения Additional characteristics of the water supply system	Суточный расход воды, м ³ /сут Daily water consumption, m ³ /day
ЖК «Voxhall» (г. Москва, ЦАО, ул. Летниковская) Voxhall Residential complex (Moscow, Central Administrative District, Letnikovskaya St.)	27	2	<ul style="list-style-type: none"> первая зона предусмотрена с нижней разводкой, вторая — с верхней the first zone has an up-feed water supply system; the second one has a down-feed system 	193,59
ЖК «Discovery Residence» (г. Екатеринбург, ул. Гагарина/ Академическая) Discovery Residence Residential complex (Ekaterinburg, Gagarina/Academicheskaya St.)	31	2	<ul style="list-style-type: none"> для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка; подающие стояки водопровода располагаются в зоне межквартирного коридора each zone has an individual pump; water supply risers are in the inter-flat corridor 	254,104
ЖК «Южные сады» (г. Москва, ЮЗАО) Southern Gardens Residential complex (Moscow, South-western Administrative District)	32	2	<ul style="list-style-type: none"> для обеих зон принята нижняя кольцевая разводка; подающие стояки водопровода располагаются в зоне межквартирного коридора both zones have up-feed water supply systems; water supply risers are in the inter-flat corridor 	368,01

Продолжение табл. 2 / Continue of the Table 2

Наименование жилого комплекса (ЖК), расположение Name of a residential complex, location	Количество этажей Number of floors	Количество зон водопровода Number of water supply zones	Дополнительная характеристика системы водоснабжения Additional characteristics of the water supply system	Суточный расход воды, м ³ /сут Daily water consumption, m ³ /day
ЖК «Донской Арбат» (г. Ростов-на-Дону, пр-т Кировский) Donskoy Arbat Residential complex (Rostov-on-Don, Kirovsky Avenue)	32	2	<ul style="list-style-type: none"> для обеих зон принята нижняя разводка; для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка; подающие стояки водопровода располагаются в лестничном холле both zones have up-feed water supply systems; each zone has an individual pump; water supply risers are in the staircase hall 	189,97
ЖК «Парк Победы» (г. Екатеринбург, Орджоникидзевский район) Victory Park Residential complex (Ekaterinburg, Ordzhonikidze District)	32	2	<ul style="list-style-type: none"> для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка; подающие стояки водопровода располагаются в зоне межквартирного коридора each zone has an individual pump; water supply risers are in the inter-flat corridor 	180,54
ЖК «Дмитровское небо» (г. Москва, САО, Ильменский пр.) Dmitrov Sky Residential complex (Moscow, Northern Administrative District, Ilmen passage)	33	2	<ul style="list-style-type: none"> для обеих зон принята нижняя разводка; подающие стояки водопровода располагаются в зоне межквартирного коридора both zones have up-feed water supply systems; water supply risers are in the inter-flat corridor 	501,0
ЖК «Дмитровский парк» (г. Москва, САО, ул. Лобненская) Dmitrov Park Residential complex (Moscow, Northern Administrative District, Lobnenskaya St.)	34	2	<ul style="list-style-type: none"> первая зона предусмотрена с нижней разводкой, вторая — с верхней; тупиковые магистрали; для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка; the first zone has an up-feed system, the second one has a down-feed system; dead-end water main; each zone has an individual pump 	135,26
ЖК «Кавказский бульвар» (г. Москва, ЮАО, Кавказский бульвар) Kavkaz Boulevard Residential complex (Moscow, South Administrative District, Kavkazsky Boulevard)	34	2	<ul style="list-style-type: none"> первая зона предусмотрена с нижней разводкой, вторая — с верхней; для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка; подающие стояки водопровода располагаются в зоне межквартирного коридора the first zone has an up-feed system, the second one has a down-feed system; each zone has an individual pump; water supply risers are in the inter-flat corridor 	407,6

Продолжение табл. 2 / Continue of the Table 2

Наименование жилого комплекса (ЖК), расположение Name of a residential complex, location	Количество этажей Number of floors	Количество зон водопровода Number of water supply zones	Дополнительная характеристика системы водоснабжения Additional characteristics of the water supply system	Суточный расход воды, м ³ /сут Daily water consumption, m ³ /day
ЖК «Форум сити» (г. Екатеринбург, Ленинский район, ул. Радищева) Forum City Residential complex (Ekaterinburg, Leninsky district, Radischev St.)	34	2	<ul style="list-style-type: none"> для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка each zone has an individual pump 	328,45
ЖК «Символ» (Республика Башкортостан, г. Уфа, Кировский район) Symbol Residential complex (Republic of Bashkortostan, Ufa, Kirovsky district)	35	2	<ul style="list-style-type: none"> для обеих зон принята нижняя разводка; тупиковые магистрали; подающие стояки водопровода располагаются в зоне межквартирного коридора both zones have up-feed water supply systems; dead-end water main; water supply risers are in the inter-flat corridor 	365,99
Многоквартирный ЖК (Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Шота Руставели) Residential complex (Republic of Bashkortostan, Ufa, Shota Rustaveli St.)	36	2	<ul style="list-style-type: none"> для обеих зон принята верхняя разводка; для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка; насосные установки обеих зон работают последовательно both zones have down-feed water supply systems; each zone has an individual pump; pumps of both zones operate sequentially 	88,83
ЖК «Репин парк» (г. Екатеринбург, ул. Заводская) Repin Park Residential complex (Ekaterinburg, Zavodskaya St.)	37	2	<ul style="list-style-type: none"> для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка; насосные установки обеих зон работают последовательно, расположены в техническом подполье; подающие стояки водопровода располагаются в зоне межквартирного коридора each zone has an individual pump; pumps of both zones operate sequentially; they are installed in the basement; water supply risers are in the inter-flat corridor 	Данные отсутствуют Information is not available
ЖК «Первый Дубровский» (г. Москва, ЮВАО, пр. 1-й Дубровский) First Dubrovsky Residential complex (Moscow, South-Eastern Administrative District, 1st Dubrovsky passage)	38	3	<ul style="list-style-type: none"> первая зона предусмотрена с нижней разводкой, вторая и третья — с верхней; для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка the first zone has an up-feed water supply system; the second and the third ones have down-feed systems; each zone has an individual pump 	498,69

Продолжение табл. 2 / Continue of the Table 2

Наименование жилого комплекса (ЖК), расположение Name of a residential complex, location	Количество этажей Number of floors	Количество зон водопровода Number of water supply zones	Дополнительная характеристика системы водоснабжения Additional characteristics of the water supply system	Суточный расход воды, м ³ /сут Daily water consumption, m ³ /day
ЖК «HIDE» (г. Москва, ЗАО, 1-й Сетуньский проезд) HIDE Residential complex (Moscow, Western Administrative District, 1st Setunsky Passage)	43	3	<ul style="list-style-type: none"> для всех зон принята нижняя разводка all zones have up-feed water supply systems 	373,72
ЖК «Prime park» (г. Москва, САО, Ленинградский проспект) Prime park Residential complex (Moscow, Northern Administrative District, Leningradsky avenue)	44	4	<ul style="list-style-type: none"> для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка each zone has an individual pump 	1968,25
ЖК «Eniteo» (г. Москва, ЮЗАО, ул. Черемушкинская) Eniteo Residential complex (Moscow, South-Western Administrative District, Cheremushkina St.)	46	3	<ul style="list-style-type: none"> для всех зон принята нижняя разводка; для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка all zones have up-feed water supply systems; each zone has an individual pump 	335,25
ЖК «Архитектор» (г. Москва, ЮЗАО, ул. Академика Волгина) Architect Residential complex (Moscow, South-Western Administrative District, Academician Volgin St.)	50	3	<ul style="list-style-type: none"> для всех зон принята нижняя разводка all zones have up-feed water supply systems 	990,60
ЖК «Wave» (г. Москва, ЮАО, ул. Борисовские пруды) Wave Residential complex (Moscow, Southern Administrative District, Borisov Ponds St.)	52	3	<ul style="list-style-type: none"> для всех зон принята нижняя разводка; для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка all zones have up-feed water supply systems; each zone has an individual pump 	664,03
ЖК «Небо» (г. Москва, ЗАО, Мичуринский проспект) Sky Residential complex (Moscow, Western Administrative District, Michurinsky Avenue)	53	4	<ul style="list-style-type: none"> четвертая зона снабжается водой по последовательной схеме (на 34-м этаже предусмотрена дополнительная насосная установка); подающие стояки водопровода располагаются в зоне межквартирного коридора the fourth zone has a sequential water supply system (a supplementary pump is installed on the 34th floor); water supply risers are in the inter-flat corridor 	674,2

Наименование жилого комплекса (ЖК), расположение Name of a residential complex, location	Количество этажей Number of floors	Количество зон водопровода Number of water supply zones	Дополнительная характеристика системы водоснабжения Additional characteristics of the water supply system	Суточный расход воды, м ³ /сут Daily water consumption, m ³ /day
ЖК «Symphony 34» (г. Москва, САО, ул. Хуторская 2-я) Symphony 34 Residential complex (Moscow, Northern Administrative District, 2nd Khutorskaya st.)	56	4	<ul style="list-style-type: none"> для всех зон принята нижняя разводка; для каждой зоны предусмотрена индивидуальная насосная установка all zones have up-feed water supply systems; each zone has an individual pump 	1175,52
ЖК «Дмитровский 1» (г. Москва, САО, шоссе Дмитровское) Dmitrovsky 1 Residential complex (Moscow, Northern Administrative District, Dmitrovskoe highway)	63	4	<ul style="list-style-type: none"> для всех зон принята нижняя разводка all zones have up-feed water supply systems 	791,60

Примечание: в колонках 2 и 3 приводятся сведения в отношении наиболее высокой секции (корпуса) ЖК.

Note: columns 2 and 3 have information on the tallest buildings of residential complexes.

баков ввиду сопутствующих потерь площадей здания и сложностей дальнейшей эксплуатации емкостей. Не встречены схемы, нижняя зона которых работает исключительно от напора внутриводопроводной сети, что объясняется современными требованиями в отношении величины свободного напора перед санитарным прибором (не менее 20 м вод. ст.). Внутренний противопожарный водопровод, как показывает практика, устраивается с количеством зон, аналогичным хозяйствственно-питьевому водоснабжению. С учетом многофункционального назначения высотных зданий (наличия встроенных, пристроенных автомобильных стоянок, общественных и административных помещений) дополнительно устраиваются системы автоматического пожаротушения согласно требованиям СП 485.1311500.2020⁹. В общественных зданиях также необходимы автоматические устройства пожаротушения, защищающие фасадное остекление. В ряде проектов, упомянутых в табл. 2, на основании специальных технических условий предусмотрены спринклерные оросители над входами в квартиры.

В связи с широким использованием в высотных зданиях автоматических установок пожаротушения, в частности спринклерных оросителей [17], актуальным вопросом является интеграция такого оборудования в интерьер помещения, к эстетическому облику которого предъявляются высокие требования. В этой связи представляют интерес современные модели аксессуаров к оросителям, выпускаемые отечественной промышленностью (рис. 4). По отношению

к потолку помещения спринклерные оросители могут быть открытыми и устанавливаться в комплекте с декоративным отражателем (рис. 4, а), полузащищеными в комплектации с патроном, размещаемым в технологическом отверстии (рис. 4, б), или скрытыми (рис. 4, в). В последнем случае спринклер располагается под декоративной крышкой, которая при повышении температуры в помещении до заданного предела самостоятельно отделяется от оросителя, не создавая преграды для выхода воды.

Большой проблемой является ущерб, наносимый имуществу владельца помещения в случае ложного срабатывания спринклеров. Для решения данной проблемы постепенное распространение в последние годы получает технология пожаротушения тонкораспыленной водой («water mist» — с англ. «водяной туман»). Механизм тушения пламени тонкораспыленной водой подробно описан в [18–20]. Введенный с марта 2021 г. СП 485.1311500.2020⁸ на смену СП 5.13130.2009 подразделяет автоматические установки пожаротушения тонкораспыленной водой на системы низкого (до 2 МПа включительно) и высокого давления (более 2 МПа). Широкая линейка спринклерных оросителей тонкораспыленной воды, предлагаемая российскими производителями, позволяет обеспечить требуемую интенсивность орошения в зависимости от высоты расположения спринклеров, их удаления друг от друга (рис. 5). К преимуществам использования технологии (в сравнении с автома-

⁹ СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573004280>

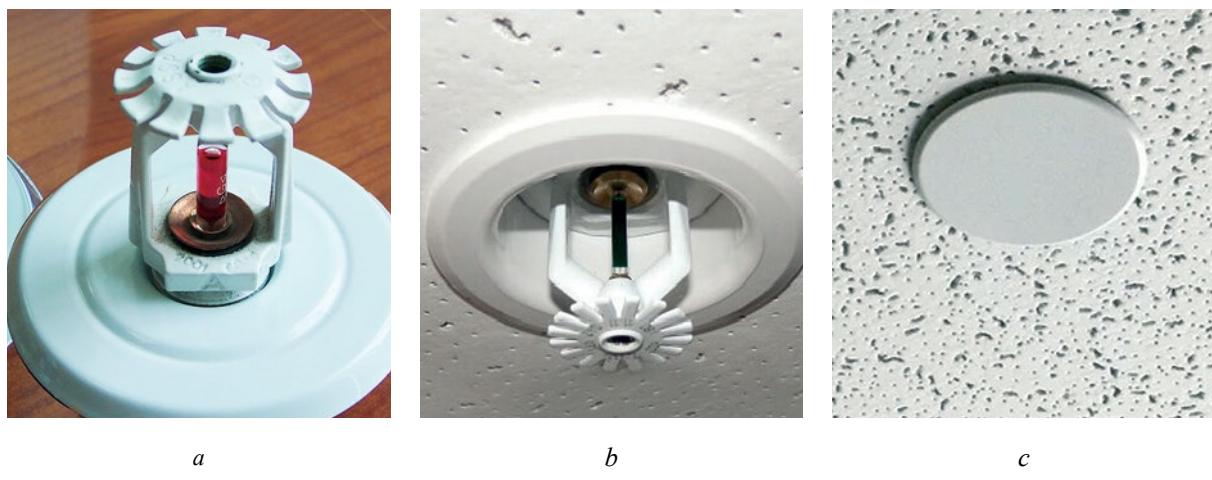


Рис. 4. Аксессуары для спринклерных оросителей (фото из открытых источников)

Fig. 4. Sprinkler accessories (open source images)

тическими установками пожаротушения низкого давления) специалисты относят: более эффективное подавление дыма, равномерное охлаждение нагретых поверхностей, меньший расход воды (всего 0,03 л/с на 1 м²) и, как результат, предотвращение затопления помещений и порчи материальных ценностей. В работе [21] отмечается особенная целесообразность применения технологии пожаротушения водяным туманом в высотных зданиях, основным материалом конструкции которых является бетон. Учеными доказана опасность резкого охлаждения нагретого бетона потоками холодной водой, подаваемой на пожаротушение. Это в значительной мере снижает прочность бетона, влечет дальнейшее образование трещин. Избежать таких негативных явлений можно применением тонкораспыленной воды с размером капель до 150 мкм. В странах Запада технологии пожаротушения тонкораспыленной водой применяются достаточно широко в зданиях различного назначения, чему способствует не только действующая нормативная документация в сфере пожаротушения, но и деятельность страховых компаний, преследующих цель сокращения своих рас-

ходов на компенсацию вторичного ущерба, возникшего в результате тушения огня системами водяного пожаротушения низкого давления с высоким расходом воды [22, 23]. В России технологии пожаротушения тонкораспыленной водой в общественных и жилых зданиях в настоящее время не распространены, чаще предпочтение им отдается в промышленных и складских зданиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ проектов систем внутреннего холодного водоснабжения высотных зданий, построенных в России за последние пять лет, а также находящихся на этапе возведения, показал, что:

- среди возможных схемных решений преобладают зонные схемы водопровода параллельного типа с нижней разводкой магистральных трубопроводов. Тенденция обусловлена в первую очередь экономической выгодой застройщиков (инвесторов): параллельные схемы позволяют сократить площади здания, задействованные в размещении инженерных коммуникаций. Кроме того, параллельные схемы более просты в эксплуатации ввиду отсутствия на технических этажах резервуаров, требующих особого санитарного контроля;

- преобладающее большинство проектов схем внутреннего хозяйствственно-питьевого водоснабжения высотных зданий не предполагает выделения отдельной (нижней) зоны водопровода, работающей исключительно под напором, гарантированным точкой подключения к внутриквартальной сети;

- подавляющее большинство высотных зданий предполагает наличие автоматических установок пожаротушения (чаще — оборудованных спринклерными оросителями). Спринклерные оросители размещаются не только в общественных, административных помещениях и автостоянках, но и в межквартирных коридорах для защиты жилых помещений;

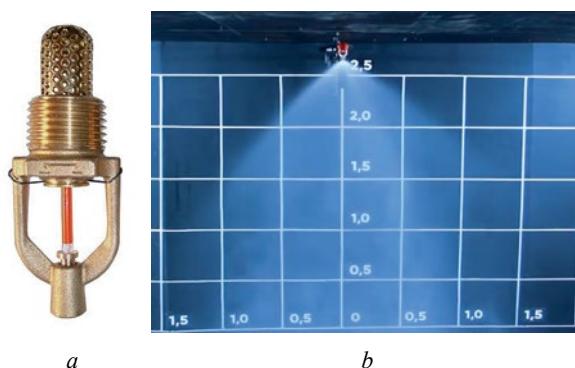


Рис. 5. Ороситель спринклерный тонкораспыленной воды: а — общий вид; б — в работе (URL: <https://sa-biysk.ru/>)

Fig. 5. Thin-spray water sprinkler: a — general view; b — sprinkler in operation (URL: <https://sa-biysk.ru/>)

• в целях минимизации ущерба имуществу многофункциональных зданий и снижения расчетных расходов воды в них целесообразно применение

технологии тушения огня тонкораспыленной водой (водяным туманом) в проектах автоматических установок пожаротушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chiquetto J.B., Leichsenring A.R., Ribeiro F.N.D., Ribeiro W.C. Work, housing, and urban mobility in the megacity of São Paulo, Brazil // *Socio-Economic Planning Sciences*. 2022. Vol. 81. P. 101184. DOI: 10.1016/j.seps.2021.101184
2. Раевская А.А., Быков А.О., Моторкин И.А., Гарипока М.И., Даудыко Т.В. Высотное домостроение в Российской Федерации и за рубежом // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика : сб. ст. XII Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. 2018. С. 36–39.
3. Джасанибекова З.Н. Современные тенденции комплексных решений в архитектурном проектировании высотных зданий // *Перспективы науки*. 2019. № 8 (119). С. 106–109.
4. Акопян Г.О., Кожевникова А.А. Основные аспекты при возведении высотных зданий // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Волгоград : Волгоградский государственный технический университет. 2020. С. 133–138.
5. Barros P., Fat L., Garcia L.M.T., Dorothee Slovic A., Thomopoulos N., Herick de Sá T., Moraes P., Mindell J.S. Social consequences and mental health outcomes of living in high-rise residential buildings and the influence of planning, urban design and architectural decisions // *A systematic review*. 2019. Vol. 93. Pp. 263–272. DOI: 10.1016/j.cities.2019.05.015
6. Rismanian M., Zarghami E. Evaluation of crowd evacuation in high-rise residential buildings with mixed-ability population: combining an architectural solution with management strategies // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2022. Vol. 77. P. 103068. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2022.103068
7. Перминов Е.М. Обеспечение пожарной безопасности высотных зданий // Инженерные исследования. 2021. № 3 (3). С. 15–21.
8. Салагор И.Р., Хохлов А.А. Особенности подготовки высококвалифицированных специалистов по уникальным зданиям и сооружениям // Образование. Наука. Карьера : сб. науч. ст. 2-й Междунар. науч.-метод. конф. 2019. С. 235–239.
9. Ezech C.I., Hong Y., Deng W., Zhao H. High rise office building makeovers — Exploiting architectural and engineering factors in designing sustainable buildings in different climate zones // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Pp. 6396–6410. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.04.075
10. Сайриоддинов С.Ш. Гидравлическое и технологическое обеспечение эффективности подачи и распределения воды в системе водоснабжения высотных зданий // Градостроительство и архитектура. 2020. № 3 (40). С. 35–44.
11. Бородач М.М. Инженерное оборудование высотных зданий / под общ. ред. М.М. Бородач. 2-е изд., испр. и доп. М. : АВОК-ПРЕСС, 2011. 458 с.
12. Дудченко М.И., Ткаченко А.З., Путько А.В. Оценка эффективности зонных схем водоснабжения высотных зданий Хабаровска // Новые идеи нового века : мат. Междунар. научн. конф. ФАД ТОГУ. Т. 2. 2011. С. 33–37.
13. He Q., Hossain U., Ng T., Augenbroe G. Identifying practical sustainable retrofit measures for existing high-rise residential buildings in various climate zones through an integrated energy-cost model // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 151. P. 111578. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111578
14. Joe J., Min S., Oh S., Jung B., Kim Yu.M., Kim D.W., Lee S.E., Yi D.H. Development of simplified building energy prediction model to support policymaking in South Korea-case study for office buildings // *Case Study for Office Buildings*. 2022. Vol. 14. P. 6000. DOI: 10.3390/su14106000
15. Eloranta V., Gronman A., Woszczeck A. Case study and feasibility analysis of multi-objective life cycle energy system optimization in a nordic campus building // *Energies*. 2021. Vol. 14 (22). P. 7742. DOI: 10.3390/en14227742
16. Казанцев И.М., Путько А.В. Оценка эффективности проекта водоснабжения группы высотных жилых зданий // Новые идеи нового века : мат. Междунар. научн. конф. ФАД ТОГУ. Т. 3. 2014. С. 283–286.
17. Moinuddin K.A.M., Thomas I.R. Reliability of sprinkler system in Australian high rise office buildings // *Fire Safety Journal*. 2014. Vol. 63. Pp. 52–68. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.11.009
18. Корольченко Д.А., Громовой В.Ю., Ворогушин О.О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Пожаро-взрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2011. № 9. С. 54–57.
19. Dombrovsky L.A., Dembele S., Wen J.X. A simplified model for the shielding of fire thermal radiation by water mists // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 96. Pp. 199–209. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.028

20. *Yan Cui Yu., Liu J.* Research progress of water mist fire extinguishing technology and its application in battery fires // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 149. Pp. 559–574. DOI: 10.1016/j.psep.2021.03.003
21. *Динь Конг Хынг, Корольченко А.Я., Охороменко А.С.* Пожаротушение тонкораспыленной водой в отсеках высотного здания // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2013. № 3. Т. 22. С. 63–66.
22. *Гергель В.И., Мешалкин В.А.* Пожаротушение тонкораспыленной водой // Тезисы докладов XXIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию ФГБОУ ВНИИПО МЧС России. 2017. С. 369–372.
23. *Hopkin D., Spearpoint M., Arnott M., Coile R.V.* Cost-benefit analysis of residential sprinklers — Application of a judgement value method // *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 106. Pp. 61–71. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.04.003

Поступила в редакцию 19 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 25 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 25 октября 2022 г.

О Б А Т О Р Е: **Юлия Александровна Рыльцева** — кандидат технических наук, преподаватель кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 4138-6634, Scopus: 57214228101, ORCID: 0000-0002-1315-6907; ryiltsevayua@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Chiquetto J.B., Leichsenring A.R., Ribeiro F.N.D., Ribeiro W.C. Work, housing, and urban mobility in the megacity of São Paulo, Brazil. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2022; 81:101184. DOI: 10.1016/j.seps.2021.101184
2. Raevskaya A.A., Bykov A.O., Motorkin I.A., Garipova M.I., Dadyko T.V. High-rise housing construction in the Russian Federation and abroad. *Innovative scientific research: theory, methodology, practice : collection of articles of the XII International Scientific and Practical Conference*. 2018; 36-39. (rus.).
3. Janibekova Z.N. Modern trend of complex solutions in architectural design of high-rise buildings. *Prospects of Science*. 2019; 8(117):106-109. (rus.).
4. Akopyan G.O., Kozhevnikova A.A. The main aspects in the construction of high-rise buildings. *Actual Problems and Prospects of Development of the Construction Complex*. Volgograd, 2020; 133-138. (rus.).
5. Barros P., Fat L., Garcia L.M.T., Dorothée Slovic A., Thomopoulos N., Herick de Sá T., Morais P., Mindell J.S. Social consequences and mental health outcomes of living in high-rise residential buildings and the influence of planning, urban design and architectural decisions. *A Systematic Review*. 2019; 93:263-272. DOI: 10.1016/j.cities.2019.05.015
6. Rismanian M., Zarghami E. Evaluation of crowd evacuation in high-rise residential buildings with mixed-ability population: combining an architectural solution with management strategies. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2022; 77:103068. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2022.103068
7. Perminov E. Ensuring fire safety of high-rise buildings. *Engineering Research*. 2021; 3(3):133-138. (rus.).
8. Salagor I.R., Hohlov A.A. Features of training highly qualified specialists in unique buildings and structures. *Education. The Science. Career*. 2019; 235-239. (rus.).
9. Ezeh C.I., Hong Y., Deng W., Zhao H. High rise office building makeovers — Exploiting architectural and engineering factors in designing sustainable buildings in different climate zones. *Energy Reports*. 2022; 8:6396-6410. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.04.075
10. Sajriddinov S.Sh. Hydraulic and technological support of the efficiency of water supply and distribution in the water supply system of high-rise buildings. *Urban planning and architecture*. 2020; 3(40):35-44. (rus.).
11. Borodach M.M. *Engineering equipment of high-rise buildings*. Moscow, AVOK-PRESS, 2011; 458. (rus.).
12. Dudchenko M.I., Tkachenko A.Z., Put'ko A.V. Evaluation of the effectiveness of zone water supply schemes for high-rise buildings in Khabarovsk. *New ideas of the new century*. 2011; 2:33-37. (rus.).
13. He Q., Hossain U., Ng T., Augenbroe G. Identifying practical sustainable retrofit measures for existing high-rise residential buildings in various climate zones through an integrated energy-cost model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021; 151:111578. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111578
14. Joe J., Min S., Oh S., Jung B., Kim Yu.M., Kim D.W., Lee S.E., Yi D.H. Development of simplified building energy prediction model to support policymaking in South Korea-case study for office buildings. *Case Study for Office Buildings*. 2022; 14:6000. DOI: 10.3390/su14106000
15. Eloranta V., Gronman A., Woszczeck A. Case study and feasibility analysis of multi-objective life cycle energy system optimization in a Nordic campus building. *Energies*. 2021; 14(22):7742. DOI: 10.3390/en14227742

16. Kazancev I.M., Put'ko A.V. Evaluation of the effectiveness of the water supply project of a group of high-rise residential buildings. *New Ideas of the New Century*. 2014; 3:283-286.
17. Moinuddin K.A.M., Thomas I.R. Reliability of sprinkler system in Australian high rise office buildings. *Fire Safety Journal*. 2014; 63:52-68. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.11.009
18. Korol'chenko D.A., Gromovoj V.Yu., Vorogushin O.O. The use of finely sprayed water for extinguishing fires in high-rise buildings. *Fire and Explosion safety*. 2011; 9:54-57. (rus.).
19. Dombrovsky L.A., Dembele S., Wen J.X. A simplified model for the shielding of fire thermal radiation by water mists. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 96:199-209. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.028
20. Yan Cui Yu., Liu J. Research progress of water mist fire extinguishing technology and its application in battery fires. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 149:559-574. DOI: 10.1016/j.psep.2021.03.003
21. Din' Kong Hyng, Korol'chenko A.Ya., Ohromenko A.S. Fire extinguishing with thinly sprayed water in the compartments of a high-rise building. *Fire and explosion safety*. 2013; 22(3):63-66. (rus.).
22. Gergel' V.I., Meshalkin V.A. Fire extinguishing with thinly sprayed water. *Abstracts of reports at the XXIX International Scientific and Practical Conference*. 2017; 369-372. (rus.).
23. Hopkin D., Spearpoint M., Arnott M., Coile R.V. Cost-benefit analysis of residential sprinklers — Application of a judgement value method. *Fire Safety Journal*. 2019; 106:61-71. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.04.003

Received September 19, 2022.

Adopted in revised form on October 25, 2022.

Approved for publication on October 25, 2022.

BIO NOTES: **Юлия А. Рыльцева** — Candidate of Technical Sciences, teacher of the Department of Water Supply and Water Removal; **Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет) (МГСУ)**; 26 Ярославское шоссе, Москва, 129337, Российская Федерация; ID RISC: 4138-6634, Scopus: 57214228101, ORCID: 0000-0002-1315-6907; ryiltsevaya@mgsu.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1513-1527

Практические инструменты комплексной системы управления стоимостью строительства

Дмитрий Станиславович Мошкалёв

НИИ Транснефть; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Стоимость строительства — важнейшая характеристика любого инвестиционно-строительного проекта. Проблема эффективного управления стоимостью строительства на протяжении жизненного цикла (ЖЦ) объекта приобретает особую актуальность в условиях нестабильности экономической ситуации. Успешное решение задач, связанных с планированием, оценкой и определением достоверной стоимости строительства, а также эффективным контролем ее изменения в процессе строительства, играет ключевую роль для всех участников инвестиционно-строительного процесса. Процесс управления стоимостью строительства объекта складывается из взаимосвязанных подпроцессов, реализуемых на разных стадиях ЖЦ объекта капитального строительства (ОКС): определения достоверной стоимости строительства на стадиях разработки предпроектной и проектной документации (ПД), контроля и удержания стоимости строительства на последующих стадиях разработки рабочей документации (РД), строительства и ввода объекта в эксплуатацию. Объектом исследования является система взаимосвязанных практических (организационных, методологических и технологических) инструментов, применяющихся для решения задач управления стоимостью строительства на всех стадиях ЖЦ ОКС.

Материалы и методы. Выполнены сбор, систематизация и анализ данных о существующих процессах, методах и инструментах определения стоимости строительства на всех стадиях ЖЦ ОКС. Использованы методы системного подхода к исследованию, методы анализа и синтеза, экспертных и сравнительных оценок.

Результаты. Предложены основные принципы методологического подхода и система практических инструментов, составляющих комплексную систему управления стоимостью строительства ОКС.

Выводы. Предложенные методологические подходы и практические инструменты управления стоимостью строительства могут быть использованы при реализации инвестиционно-строительных проектов любой сложности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: планирование, управление, ценообразование в строительстве, стоимость строительства, проектная документация, рабочая документация, строительство

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мошкалёв Д.С. Практические инструменты комплексной системы управления стоимостью строительства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1513–1527. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1513-1527

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Станиславович Мошкалёв, moshkalev@yandex.ru.

Practical tools of an integrated construction cost management system

Dmitrii S. Moshkalev

Transneft R&D; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The problem of effective construction cost management can arise at any stage of a construction project, and it becomes particularly relevant amid economic instability. Solving problems of accurate assessment and control of construction costs is vital for all participants in the investment and construction process. The construction cost management process encompasses the following interrelated sub-processes: identification of reliable construction costs at stages of preliminary and working design; construction cost control at further stages, including the drafting of working design documentation and facility construction. The subject of research is a set of practical tools that solve construction cost management problems throughout the lifecycle of a construction facility.

Materials and methods. Data on cost analysis processes, methods and tools were collected, systematized and analyzed in the course of the study. A systematic approach, analysis and synthesis methods, expert and comparative assessment methods were applied.

Results. The main principles, underlying the author's approach, as well as a set of practical tools designed to manage the cost of construction of a capital construction facility were proposed in reliance on the analysis, conducted by the author.

Conclusions. The author proposes construction cost management methods and practical tools that can be applied in the course of implementation of investment and construction projects that have different degrees of complexity.

KEYWORDS: planning, management, pricing in construction, construction cost, design documentation, working design, construction

FOR CITATION: Moshkalev D.S. Practical tools of an integrated construction cost management system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1513-1527. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1513-1527 (rus.).

Corresponding author: Dmitrii S. Moshkalev, moshkalev@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Стоимость строительства¹ — одна из важнейших характеристик объекта капитального строительства. В общепринятом понимании стоимость строительства объекта — это выраженные в денежной форме затраты на строительство производственных и непроизводственных основных фондов.

Стоимость строительства, как правило, не является постоянной величиной, неизменной на всем протяжении жизненного цикла объекта капитального строительства — периода существования объекта капитального строительства, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование, строительство, техническое перевооружение, реконструкция линейных объектов, реконструкция объектов капитального строительства, капитальный ремонт объектов капитального строительства, капитальный ремонт линейных объектов, ликвидация объекта². На величину стоимости строительства влияет множество факторов как внутренних, так и внешних, изменяющихся в зависимости от стадии реализации проекта.

Достоверное определение стоимости строительства объекта, наряду с обеспечением безопасности и высокого уровня качества, — ключевая задача всех участников инвестиционно-строительного процесса, особенно для строек, финансируемых за счет средств государственных бюджетов различных уровней. При этом важно не только корректно рассчитать стоимость строительства при разработке проектной документации (ПД) и получить положительное заключение экспертизы по итогам проверки достоверности определения сметной стоимости, но и обеспечить необходимые для успешного поиска и выбора подрядчика и приемлемые для инвестора (технического заказчика) значения технико-экономических показателей проекта, и обеспечить удержание стоимости

в ранее определенных лимитах в ходе строительства и ввода объекта в эксплуатацию.

Целью данной статьи является разработка комплексной системы организационных, методологических и технологических инструментов управления стоимостью строительства объектов на всех стадиях жизненного цикла.

Для достижения указанной цели выполнены сбор, систематизация и анализ данных о текущем состоянии и методологических основах процесса определения стоимости строительства объектов на разных стадиях жизненного цикла, а также сведений о применяемых различными участниками инвестиционно-строительного процесса методах и инструментах определения и контроля стоимости строительства. С применением метода системного подхода определены наиболее эффективные из существующих, а также предложены новые инструменты управления стоимостью строительства объекта, которые интегрированы в комплексную систему управления стоимостью строительства, решающую задачи своевременной и точной оценки, проверки достоверности и контроля изменения стоимости строительства на разных стадиях жизненного цикла объекта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В соответствии со сложившейся системой ценообразования в строительстве в Российской Федерации, процесс определения стоимости строительства объекта можно разделить на следующие основные этапы (рис. 1, табл. 1).

На различных этапах процесса определения стоимости строительства применяются различные методологические подходы к ценообразованию, предполагающие поэтапное повышение точности расчетов [1]. На предпроектной стадии стоимость строительства определяется с применением системы



Рис. 1. Этапы определения стоимости

Fig. 1. Cost determination stages

¹ Здесь и далее под термином «Строительство» понимается как новое строительство, так и реконструкция, техническое перевооружение и расширение предприятий, зданий и сооружений.

² ГОСТ Р 58535-2019. Стоимостной инжиниринг. Термины и определения (введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12.09.2019 № 677-ст).

Табл. 1. Этапы процесса определения стоимости строительства
Table 1. Stages of construction cost determination

Процессы Processes	Планирование Capital planning, разработка предпроектной документации (обоснование инвестиций) Capital expenditure planning, Preliminary design	Разработка ПД Working design development	Прохождение экспертизы, Утверждение ПД Working design examination, documentation approval	Расчет начальной (максимальной) цены контракта (НМЦК), конкурсные процедуры (при необходимости), заключение контракта Initial (maximum) contract price calculation, bargaining, contract execution	Разработка рабочей документации (РД), строительство, корректировка ПД и РД по несоответствиям, выявленным в ходе строительства Development of working design documentation, design revision due to discrepancies identified during construction
Вид стоимости Type of cost	Предельная (предполагаемая) сметная стоимость строительства по сводному сметному расчету в составе обоснования инвестиций The estimated construction cost according to the summary estimate made as part of a feasibility study	Сметная стоимость строительства по сводному сметному расчету в составе ПД The estimated construction cost according to the summary estimate made as part of the technical working design	Сметная стоимость строительства по сводному сметному расчету в составе ПД The estimated construction cost according to the summary estimate made as part of the technical working design	Сметная стоимость установленная в НМЦК. Цена контракта, определенная по итогам проведения торгов Construction contract cost	Сметная стоимость, по разработанной РД. Фактическая стоимость объекта после завершения строительства Construction cost estimate according to the working design documentation. Actual facility cost after construction completion
Основные методы определения стоимости Principal cost calculation methods	Укрупненные нормативы цены строительства; • данные по стоимости объектов-аналогов и их отдельных составляющих; • расчеты с применением сметных норм и расценок; • расчеты на отдельные виды работ и затрат	расчеты с применением сметных норм и расценок; • расчеты на отдельные виды работ и затрат	расчеты с применением сметных норм и расценок; • расчеты на отдельные виды работ и затрат	<ul style="list-style-type: none">• расчеты с применением сметных норм и расценок;• расчеты на отдельные виды работ и затрат• calculation made using estimated norms and rates;• calculation of certain items of work and costs	<ul style="list-style-type: none">• распределение сметной стоимости строительства по конструктивным решениям (элементам) и комплексам (видам) работ и затрат с учетом тендерного снижения• breakdown of estimated construction costs by design solutions (elements) and work packages with account taken of reduction through tendering

укрупненных показателей цены строительства, а также данных по стоимости строительства объектов-аналогов. На стадиях разработки ПД и РД сметная стоимость определяется, как правило, с применением федеральных, территориальных или отраслевых сметных нормативов — сметных норм, единичных расценок и их отдельных составляющих³. В рамках реформы государственной системы ценообразования в строительстве осуществляется постепенный переход от применения базисно-индексного к ресурсно-индексному и ресурсному методу определения сметной стоимости строительства, призванному повысить точность сметных расчетов. Кроме этого, несомненным достоинством действующей системы ценообразования является ее изученность и практическое применение, а также постоянное совершенствование, включающее разработку и поддержание в актуальном состоянии отдельных нормативно-методических документов и сметных норм.

Основным недостатком действующей отечественной системы ценообразования в строительстве является отсутствие общепринятого системного подхода к управлению стоимостью строительства объекта на всем протяжении жизненного цикла. Применяемые на различных стадиях жизненного цикла объекта методы и инструменты планирования, оценки и контроля стоимости не связаны между собой и решают локальные задачи, характерные

для конкретной стадии. Отсутствует общепринятая и понятная методология «сквозного» управления стоимостью строительства, в рамках которой решение задач, стоящих перед участниками инвестиционно-строительного процесса на разных стадиях жизненного цикла объекта капитального строительства, было бы подчинено общей цели — определению «справедливой» цены строительства объектов различного назначения и уровня сложности.

В настоящее время для разных стадий жизненного цикла объекта, как правило, характерно отсутствие достоверных данных о планируемой, фактической и прогнозируемой стоимости строительства объекта, а стоимость строительства подвержена значительным и неконтролируемым изменениям вследствие влияния множества факторов, не учтываемых действующей системой ценообразования в строительстве. На практике задачи определения достоверной стоимости строительства на этапе планирования капитальных вложений и эффективного управления стоимостью строительства в процессе реализации инвестиционно-строительного проекта часто оказываются невыполнимыми для большинства его участников [2].

Характерная для текущей системы ценообразования в строительстве динамика изменения стоимости строительства (на примере объектов, финансируемых за счет бюджетных средств) представлена на рис. 2.

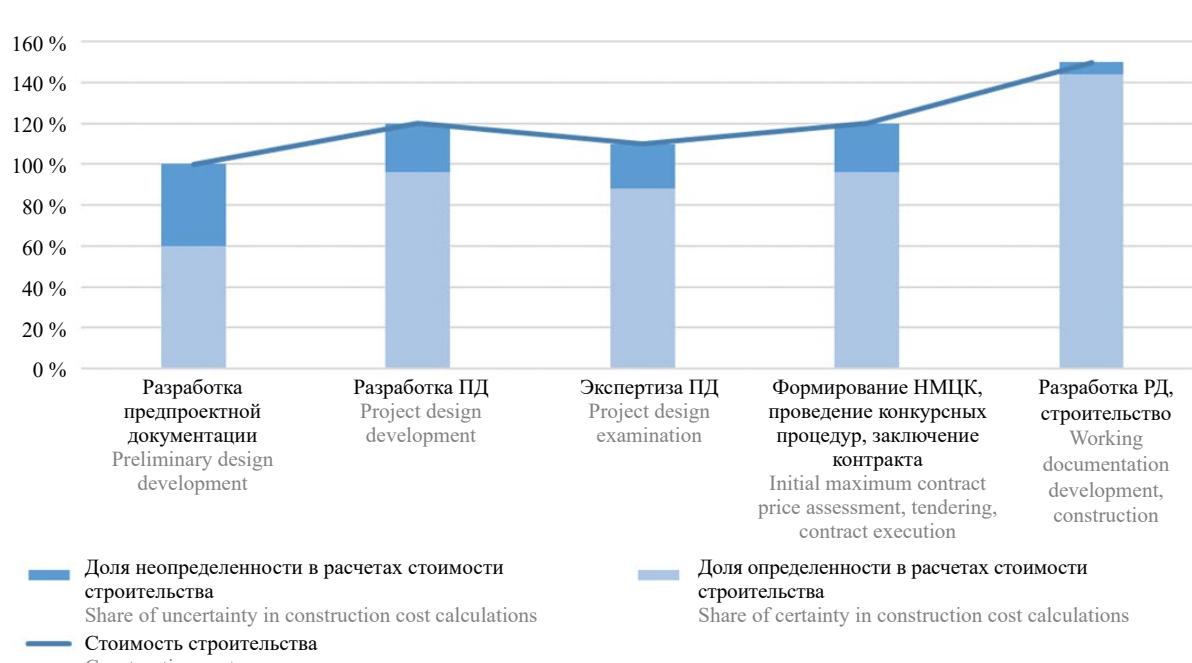


Рис. 2. Динамика изменения стоимости строительства

Fig. 2. Construction cost dynamics

³ Методика определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 04.08.2020 № 421/пр.

На предпроектной стадии, ввиду отсутствия необходимых для проектирования объекта исходных данных и сжатых сроков, оценка стоимости проводится без глубокой проработки проекта. Технико-экономические показатели (ТЭП) проектируемого объекта определяются с низкой степенью точности. Соответственно, подбираются не всегда сопоставимые по ТЭП объекты-аналоги.

Полученная в результате таких расчетов стоимость учитывается в разрабатываемом на предпроектной стадии обосновании инвестиций (ОБИН), утверждается заказчиком как целевой ориентир, и используется в дальнейшем для обоснования и подтверждения требуемых лимитов финансирования на строительство объекта, и фиксируется в задании на проектирование (ЗНП) как предельная стоимость строительства объекта. Зачастую лимит стоимости определяется директивно заказчиком перед началом предпроектной стадии исходя из выделенных лимитов финансирования. При этом полный комплекс работ и затрат, связанных с реализацией проекта, подлежащий учету при оценке сметной стоимости на предпроектной стадии для повышения ее достоверности [3], не учитывается.

Проектная организация разрабатывает ПД на основании утвержденного заказчиком ЗНП. В процессе разработки ПД, в связи с уточнением исходных данных об объекте проектирования, основные проектные решения, принятые на предпроектной стадии, уточняются, иногда пересматриваются частично или даже полностью. Это неизбежно оказывает влияние на сметную стоимость строительства и, как правило, приводит к превышению предельной стоимости. Заказчик либо отказывается от реализации проекта в связи с отсутствием необходимого финансирования, либо заставляет проектную организацию исключать из ПД «лишние», на его взгляд, объемы работ и затрат, влияющие на сметную стоимость, с целью уложитьсь в рамки предельной стоимости, либо, в редких случаях, корректирует ЗНП в части увеличения предельной стоимости строительства.

При прохождении экспертизы сметная стоимость корректируется по результатам устранения замечаний, как правило в сторону уменьшения⁴. Комплект ПД, в том числе сводный сметный расчет стоимости строительства, содержащий сведения о сметной стоимости строительства, утверждается заказчиком.

В дальнейшем, на стадии строительства, вследствие недостаточной степени проработки проектных решений на стадии ПД возникает значительное количество несоответствий и «белых пятен», требующих корректировки ПД, РД и, соответственно,

сметной стоимости. Зачастую такие изменения бесконтрольны, что приводит к дальнейшему увеличению сметной стоимости строительства объекта.

В результате сметная стоимость на стадии строительства может расти непредсказуемо и в итоге может значительно отличаться от определенной ранее предельной стоимости строительства объекта. В условиях нестабильной экономической ситуации существенное влияние на стоимость строительства оказывает неконтролируемое изменение стоимости материально-технических ресурсов и оборудования (МТР), используемых в строительстве. Для строительства объектов, финансируемых за счет бюджетных средств, эта проблема стоит наиболее остро, так как внедряемая государственная система сбора и мониторинга информации о ценах строительных ресурсов не решает всех поставленных перед ней задач [4].

В качестве основных факторов изменения стоимости строительства в рамках сложившейся системы ценообразования в строительстве можно выделить следующие:

- некачественное планирование проекта;
- отсутствие, недостаточность или изменение исходных данных для проектирования;
- недостаточное качество и глубина проработки проектно-сметной документации;
- отсутствие эффективного механизма мониторинга и сбора данных о стоимости строительных ресурсов;
- недостаточная квалификация персонала;
- несовершенство действующей нормативно-технической и сметно-нормативной базы;
- несоответствие стоимости работ и затрат, определенной в сметной документации, принятым в ПД проектным решениям;
- искусственное занижение стоимости строительства (на этапах государственной экспертизы ПД и проведения конкурсных процедур по заключению контрактов на строительство);
- незэффективное управление и организация строительного производства;
- прочие внешние факторы, не зависящие от участников процесса (инфляционные и валютные риски, изменение законодательных и нормативных требований, налоговые риски, климатические изменения и т.п.).

Для уменьшения негативного влияния указанных факторов на процесс определения и изменения стоимости строительства участникам инвестиционно-строительного процесса необходимо на каждой стадии жизненного цикла объекта предпринимать определенные действия с применением соответствующих методов и инструментов.

⁴ Аналитический отчет об итогах деятельности ФАУ «Главгосэкспертиза России» в 2020 году. URL: <https://gge.ru/upload/iblock/e0d/%D0%93%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%202020.pdf>.

Таким образом, разработка комплексной системы взаимосвязанных методов и инструментов управления стоимостью строительства (КСУСС), позволяющей минимизировать риски непрогнозируемого и неконтролируемого изменения стоимости строительства на всем протяжении жизненного цикла объекта, представляет определенный научно-практический интерес [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проанализировав отечественный и зарубежный опыт организации инвестиционно-строительной деятельности [6–8], можно сделать вывод, что процесс управления стоимостью строительства с точки зрения КСУСС условно делится на две стадии: стадию планирования и определения достоверной стоимости строительства и стадию контроля и удержания стоимости в ранее определенных пределах.

Основная задача первой стадии (в нее входят этапы планирования, разработки предпроектной и ПД, прохождение государственной экспертизы, заключение контракта на СМР) — определение стоимости строительства с максимально возможной и доступной степенью достоверности, с учетом имеющихся данных и ограничений, оценки рисков и неопределенности.

Задачи второй стадии (в нее входят этапы разработки РД, строительства и ввода объекта в эксплуатацию) — контроль хода реализации проекта и стоимости строительства и принятие мер по удержанию стоимости в пределах, определенных на первой стадии.

В комплексной системе управления стоимостью строительства на каждой стадии применяются взаимосвязанные инструменты, которые могут быть разделены на следующие группы:

- организационные инструменты (система процессов, процедур и операций, formalизованных в виде организационно-распорядительных документов);
- методологические инструменты (система нормативно-методических документов);
- технологические инструменты (единое информационное пространство, информационно-справочные и аналитические системы, обеспечивающие хранение и обмен информацией) [1].

Данные методы и практические инструменты КСУСС, в зависимости от решаемых задач и стадии жизненного цикла объекта, применяются различными участниками инвестиционно-строительного проекта — застройщиком (инвестором), техническим заказчиком, генеральным проектировщиком, генеральным подрядчиком, субподрядными проектными и строительными организациями. Применение данных инструментов особенно эффективно при реализации комплексных контрактов с инжиниринговой схемой управления проектами (при которых проектирование, строительство и комплектация объекта

осуществляется «под ключ» одной и той же организацией, оказывающей услуги строительного инжиниринга), востребованных и активно применяющихся в отечественной и международных практиках [9–11].

Основные практические инструменты комплексной системы управления стоимостью строительства объектов капитального строительства (на примере объектов, строительство которых финансируется за счет бюджетных средств) представлены на рис. 3 и далее по тексту.

1. Планирование капитальных вложений.

1.1. Организационные инструменты.

1.1.1. Сбор и согласование предварительных исходных данных для проектирования объекта.

1.1.2. Разработка, согласование и утверждение ОБИН, включающего:

- основные проектные решения и основные технико-экономические показатели (целевые);
- формирование предполагаемой структуры сметной стоимости работ и затрат и предварительный расчет предельной (целевой) стоимости строительства объекта;
- укрупненный «сквозной» график проектирования, строительства и ввода объекта с указанием ключевых вех и взаимосвязей между ними («сквозной» КСГ проекта или целевой график реализации проекта);
- оценку экономической эффективности проекта и анализа чувствительности;
- оценку рисков и неопределенностей.

1.1.3. Разработка проекта ЗНП с указанием целевых ТЭП объекта и предельной (целевой) стоимости строительства.

1.2. Методологические инструменты.

1.2.1. Порядок организации сбора и согласования исходных данных для проектирования.

1.2.2. Форма перечня исходных данных для проектирования.

1.2.3. Требования к составу и содержанию ОБИН.

1.2.4. Методика проведения оценки экономической эффективности, анализа чувствительности, оценки и анализа рисков и неопределенностей.

1.2.5. Методика расчета предельной (предполагаемой) сметной стоимости строительства на основании:

- укрупненных показателей стоимости;
- данных объектов-аналогов;
- экспертных оценок;
- данных о стоимости основного технологического оборудования и его аналогов;
- предельных значений ТЭП, обеспечивающих экономическую целесообразность и эффективность проекта.

1.2.6. Форма сбора исходных данных для расчета стоимости строительства объекта на основании укрупненных показателей стоимости и данных объектов-аналогов.

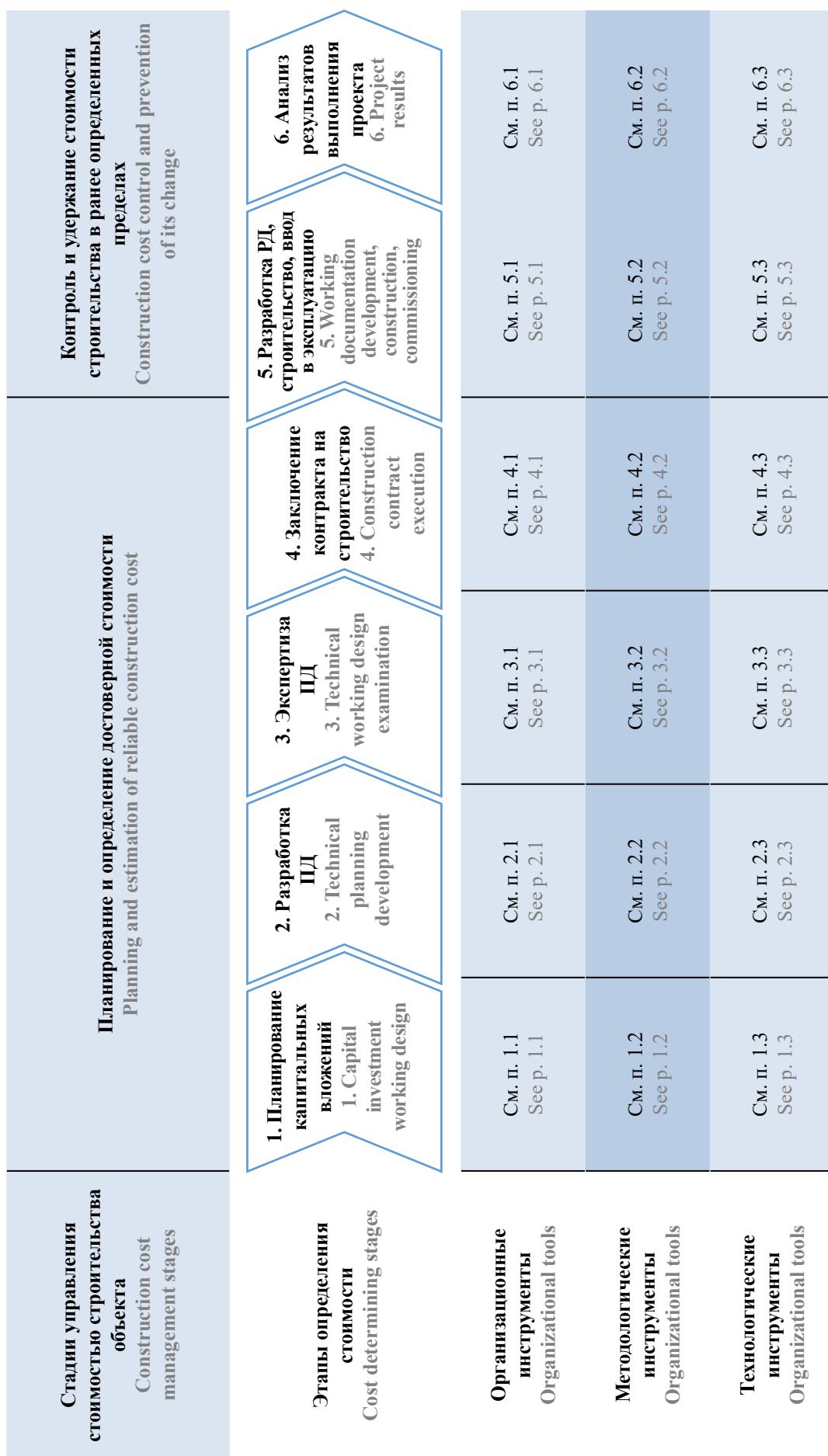


Рис. 3. Практические инструменты комплексной системы управления стоимостью строительства объектов
Fig. 3. Practical tools of an integrated construction cost management system

1.2.7. Перечень прочих работ и затрат, включаемых в сводный сметный расчет стоимости строительства (ССР).

1.2.8. Методика формирования, требования к составу и содержанию «сквозного» КСГ строительства объекта.

1.2.9. Формы задания на проектирование и технического задания.

1.2.10. Перечень ТЭП проектируемого объекта (чек-лист).

1.3. Технологические инструменты.

1.3.1. База данных объектов-аналогов.

1.3.2. База данных укрупненных показателей стоимости строительства.

1.3.3. База данных типовых элементов КСГ.

1.3.4. ПО и автоматизированные формы для расчета денежных потоков и оценки экономической эффективности проектов.

1.3.5. ПО для проектирования (включая проектирование с применением технологий информационного моделирования), сметное ПО.

1.3.6. Информационно-аналитическая система планирования и управления строительством.

2. Разработка ПД.

2.1. Организационные инструменты.

2.1.1. Утверждение:

- ЗНП на разработку ПД;
- уточненного перечня исходных данных;
- целевых ТЭП (включая предельную стоимость строительства).

2.1.2. Формирование уточненной структуры сметной стоимости работ и затрат:

- уточнение перечня объектов (зданий и сооружений);
- уточнение состава работ и затрат по объектам (конструктивные элементы, комплексы работ, виды работ и затрат).

2.1.3. Периодический контроль хода разработки разделов ПД (анализ «план-факт»):

- контроль сроков выполнения этапов работ;
- попозиционный контроль выполнения требований ЗНП в части состава и объемов работ, влияющих на сметную стоимость.

2.1.4. Итоговая проверка технической части ПД на соответствие требованиям ЗНП с точки зрения учета объемов работ и затрат, влияющих на сметную стоимость.

2.1.5. Разработка сметной части ПД (включая раздел ПОС, ведомости объемов работ и спецификации МТР) в соответствии со структурой сметной стоимости и «сквозного» КСГ проекта.

2.1.6. Выполнение конъюнктурного анализа цен (КА) на МТР, учтенных в ПД, согласование результатов КА с Заказчиком, анализ и проверка со стороны Заказчика результатов КА с целью исключения необоснованного увеличения стоимости.

2.1.7. Определение перечня прочих работ и затрат, учитываемых в ССР.

2.1.8. Детализация «сквозного» КСГ с учетом:

- структуры сметной стоимости работ и затрат;
- распределения объемов работ и затрат в соответствии с технологической последовательностью и взаимосвязями;
- привязки объемов и стоимости строительных ресурсов к элементам КСГ (комплексу, виду работ, конструктивному или технологическому элементу).

2.1.9. Выходной технический совет по рассмотрению ПД («внутренняя экспертиза» ПД с участием Заказчика).

2.1.10. Расчет, проверка и утверждение значений контрольных показателей стоимости строительства.

2.2. Методологические инструменты.

2.2.1. Приказ о разработке ПД (наименование и описание объекта, основания для разработки, основные ТЭП, ответственные лица, сроки выполнения работ, требования к результатам и т.д.).

2.2.2. График выполнения проектных работ, форма сбора данных о ходе выполнения проектных работ.

2.2.3. Требования к составу и содержанию разделов ПД.

2.2.4. Состав и форма ведомостей объемов основных конструктивных решений (элементов), комплексов (видов) работ.

2.2.5. Методика расчета сметной стоимости строительства на основании:

- структуры объемов работ и затрат по объекту, ресурсно-технологических моделей;
- данных об объемах и стоимости ресурсов (оплата труда, эксплуатация машин и механизмов, стоимость МТР и оборудования);
- расчетов стоимости прочих работ и затрат, включаемых в стоимость строительства;
- корректирующих коэффициентов и индексов пересчета сметной стоимости;
- иных сметных нормативов.

2.2.6. Форма контроля стоимостных показателей проекта.

2.2.7. Заключение о соответствии ПД требованиям ЗНП и ТЗ.

2.3. Технологические инструменты.

2.3.1. Шаблоны ВОР и спецификаций, включая сопоставительные (при внесении изменений в ПД), шаблоны локальных смет (сметных расчетов).

2.3.2. Типовые элементы сметных расчетов (разделы локальных сметных расчетов на определенные виды работ).

2.3.3. База данных МТР.

2.3.4. ПО для календарно-сетевого планирования, контроля и прогнозирования проектных работ.

2.3.5. ПО для проектирования (включая проектирование с применением технологий информационного моделирования), сметное ПО.

2.3.6. Информационно-аналитическая система планирования и управления проектированием.

3. Прохождение экспертизы ПД.

3.1. Организационные инструменты.

3.1.1. Прохождение экспертизы ПД и проверки сметной документации на предмет достоверности определения сметной стоимости (при необходимости) с контролем вносимых изменений по замечаниям и влияния изменений на стоимость строительства объекта.

3.1.2. Утверждение ПД, определение окончательных ТЭП объекта.

3.2. Методологические инструменты.**3.2.1. График прохождения экспертизы.**

3.2.2. Реестр замечаний экспертизы и корректирующих мероприятий для их устранения.

3.2.3. Ведомость изменения сметной стоимости по результатам прохождения экспертизы.

3.2.4. Приказ об утверждении ПД.**3.3. Технологические инструменты.**

3.3.1. Шаблоны ВОР и спецификаций, включая сопоставительные (при внесении изменений в ПД), шаблоны локальных смет (сметных расчетов).

3.3.2. ПО для календарно-сетевого планирования, контроля и прогнозирования проектных работ.

3.3.3. ПО для проектирования (включая проектирование с применением технологий информационного моделирования), сметное ПО.

3.3.4. Информационно-аналитическая система планирования и управления проектированием.

4. Заключение контракта на строительство.**4.1. Организационные инструменты.****4.1.1. Формирование НМЦК (сметы контракта):**

- распределение объемов и стоимости по периодам в соответствии со структурой сметной стоимости, «сквозного» календарно-сетевого графика (КСГ) проекта и графика выполнения подрядных работ;

- расчет прогнозной стоимости строительства объекта с учетом индексов изменения сметной стоимости и индексов-дефляторов;

- детализация позиций сметы контракта (при необходимости) для обеспечения удобства приемки и оплаты выполненных работ.

4.1.2. Оценка экономической целесообразности участия в проекте (для генподрядной организации):

- оценка соответствия объемов работ и затрат, учтенных в технической и сметной частях ПД;

- оценка возможности изменения цены контракта в ходе его реализации;

- учет особенностей закрытия выполненных работ по контракту;

- проверка корректности составления ВОР, комплексов работ и конструктивных элементов в проекте сметы контракта (технологическая последовательность выполнения отдельных этапов работ, сроки начала и окончания, содержание и объемы работ, учет сопутствующих и вспомогательных работ, необходимых для сдачи этапа);

- проверка соответствия графика выполнения работ, графика оплаты выполненных работ и сметы контракта;

- проверка способа учета стоимости лимитированных затрат по ССР.

4.1.3. Формирование бюджета строительства (реестр планируемых расходов с распределением по статьям (видам работ) в соответствии с графиком выполнения работ), анализ и оценка рисков и неопределенностей, разработка плана мероприятий по управлению рисками.

4.2. Методологические инструменты.

4.2.1. Методика формирования НМЦК (сметы контракта).

4.2.2. Перечень основных конструктивных решений (элементов), комплексов (видов) работ.

4.2.3. Методика оценки целесообразности участия в инвестиционно-строительном проекте (чек-лист для экспресс-оценки, методика проведения входного контроля, контрольные показатели стоимости по видам работ и затрат).

4.2.4. Чек лист проверки соответствия и качества ПД.

4.2.5. Методика формирования планового бюджета строительства на основе структуры сметной стоимости работ и затрат, «сквозного» КСГ проекта, сметы контракта и резервов на управление рисками.

4.3. Технологические инструменты.**4.3.1. Сметное ПО.**

4.3.2. Информационно-аналитическая система планирования и управления строительством.

5. Разработка РД, строительство, ввод в эксплуатацию.**5.1. Организационные инструменты.**

5.1.1. Разработка состава и графика разработки РД:

- формирование состава и РД (перечня комплектов РД) в соответствии с сквозным КСГ проекта, графиком выполнения подрядных работ, сметой контракта;

- привязка сроков разработки каждого комплекта РД к соответствующим позициям «сквозного» КСГ.

5.1.2. Контроль и управление несоответствиями (изменениями), выявленными на стадии строительства, при разработке РД:

- оформление изменений в виде технических решений с расчетом стоимости изменений и трехсторонним согласованием (технический заказчик, проектная и подрядная организации);

- ведение реестра принятых технических решений с оценкой стоимости изменений;

- периодическое внесение необходимых изменений в ПД на основании принятых технических решений;

- корректировка «сквозного» КСГ проекта, графика разработки РД в соответствии с внесенными в ПД изменениями.

5.1.3. Мониторинг и контроль соответствия затрат (попозиционное сравнение затрат ПД-РД в раз-

резе позиций «сквозного» КСГ строительства и сметы контракта).

5.1.4. Выходной технический контроль РД (оценка соответствия разработанного комплекта РД утвержденной ПД и РД по смежным специальностям с применением чек-листов).

5.1.5. Детализация КСГ проекта с учетом:

- сроков и объема выполнения подготовительных и обеспечивающих работ и мероприятий (для каждой позиции КСГ должны быть указаны предшествующие события, без которых выполнение работы в срок невозможно (разработка и выдача «в производство работ» комплекта РД, закупка и поставка материально-технических ресурсов и оборудования (МТР));
- привлечение субподрядчика (при необходимости).

5.1.6. Актуализация планового бюджета строительства (при необходимости). Формирование графика движения трудовых и нетрудовых ресурсов. Формирование графика закупки МТР, строительной техники.

5.1.7. Определение перечня работ, для выполнения которых целесообразно привлечение субподрядных организаций с точки зрения экономической целесообразности.

5.1.8. Определение перечня МТР, закупку которых целесообразно осуществлять генподрядной организации и передавать субподрядчикам в качестве давальческих материалов.

5.1.9. Формирование месячно-суточных графиков выполнения работ, в том числе для субподрядчиков.

5.1.10. Мониторинг исполнения планового бюджета строительства, включая анализ использования резервов на управление рисками, ведение фактического бюджета строительства.

5.1.11. Контроль работ и затрат по объекту:

- раздельный учет затрат по различным объектам;
- позиционный контроль соответствия затрат в разрезе позиций сметы контракта (сравнение план-факт) с разбивкой на элементы затрат (материалы, эксплуатация машин и механизмов, заработка плата);
- определение ответственных за контроль и обеспечение соответствия затрат.

5.1.12. Контроль ценообразования при закупках МТР, сравнение фактической стоимости материалов со сметной и рыночной, обеспечение постоянного мониторинга рынка МТР.

5.1.13. Еженедельный (при наличии проблем — ежедневный) контроль и анализ выполнения месячных и общего графиков (сравнение «план-факт»), выявление причин отставания и возможных убытков, прогнозирование сроков завершения отдельных этапов работ и строительства в целом.

5.1.14. Мониторинг и выявление несоответствий ПД, оформление выявленных несоответствий

в виде технических решений с расчетом стоимости изменений, согласование технических решений.

5.1.15. Обеспечение корректировки ПД в случае необходимости в соответствии с принятыми техническими решениями, корректировка КСГ строительства и сметы контракта.

5.1.16. Контроль выполнения графика закупок и поставок МТР.

5.1.17. Составление и ведение сводной сметы строительства по фактическим затратам.

5.1.18. Проведение еженедельного мониторинга и анализа затрат (сравнение «план-факт» по позициям КСГ строительства и сметы контракта). В случае выявления превышения фактических затрат над плановыми или повышенного расхода ресурсов — детальный анализ по элементам затрат с целью выявления источника повышенных затрат.

5.1.19. Составление и ведение сметы неучтенных затрат (учет затрат, компенсируемых заказчиком в счет резерва на непредвиденные расходы и затраты).

5.1.20. Выявление и внесение в специальный реестр необеспеченных финансированием работ и затрат, которые не были предусмотрены проектом.

5.1.21. Детализация («разукрупнение») КСГ и корректировка сметы контракта при необходимости закрытия мелких объемов выполненных работ.

5.2. Методологические инструменты.

5.2.1. Приказ о разработке РД, состав и график разработки РД, соответствующие позициям «сквозного» КСГ проекта, графику выполнения подрядных работ, смете контракта.

5.2.2. Методика расчета сметной стоимости строительства на основании:

- структуры объемов работ и затрат по объекту, ресурсно-технологических моделей;
- данных об объемах и стоимости ресурсов (оплата труда, эксплуатация машин и механизмов, стоимость МТР и оборудования);
- расчетов стоимости прочих работ и затрат, включаемых в стоимость строительства;
- корректирующих коэффициентов и индексов пересчета сметной стоимости;
- иных сметных нормативов.

5.2.3. Регламент управления несоответствиями (изменениями), выявленными при разработке РД.

5.2.4. Форма технического решения и расчета изменения стоимости, реестр принятых технических решений.

5.2.5. Форма сопоставительной ведомости изменения сметной стоимости на стадии РД по сравнению с ПД.

5.2.6. Регламент корректировки ПД по несоответствиям, выявленным в ходе разработки РД и строительства.

5.2.7. Методика идентификации и оценки рисков, разработки мероприятий по управлению и контролю рисков.

5.2.8. КСГ выполнения подрядных работ, график движения трудовых и нетрудовых ресурсов, график закупки МТР, строительной техники.

5.2.9. Методика оценки экономической целесообразности привлечения субподрядных организаций.

5.2.10. Методика формирования месячно-суточных графиков и сбора информации о ходе выполнения работ.

5.2.11. Приказ о контроле и учете затрат по объекту (регламент учета и контроля затрат).

5.2.12. Регламент управления несоответствиями (изменениями) в ПД и РД, выявленными в ходе строительства, форма и реестр принятых технических решений.

5.2.13. Форма сводной сметы строительства по фактическим затратам.

5.2.14. Форма сопоставительной ведомости изменения сметной стоимости на стадии строительства.

5.2.15. Реестр необеспеченных финансированием работ и затрат, которые не были предусмотрены при составлении ТЗ на ПИР и СМР.

5.2.16. Методика расчета стоимости МТР с учетом условий приобретения и поставки, сравнения фактической стоимости МТР со сметной и рыночной.

5.3. Технологические инструменты.

5.3.1. Типовые элементы сметных расчетов (разделы локальных сметных расчетов на определенные виды работ).

5.3.2. База данных МТР, включающая транспортные схемы доставки.

5.3.3. ПО для календарно-сетевого планирования, контроля и прогнозирования сроков выполнения подрядных работ.

5.3.4. ПО для проектирования (включая проектирование с применением технологий информационного моделирования), сметное ПО, учетное ПО.

5.3.5. Информационно-аналитическая система планирования и управления проектированием и строительством.

6. Анализ результатов выполнения проекта.

6.1. Организационные инструменты.

6.1.1. Формирование и актуализация типовых перечней исходных данных для проектирования, с разбивкой по типам объектов.

6.1.2. Формирование и актуализация справочников сметной и фактической стоимости ресурсов:

- затраты на оплату труда;
- затраты на эксплуатацию машин и механизмов;
- МТР;
- оборудования.

6.1.3. Актуализация базы данных технических и стоимостных характеристик МТР (накопление обосновывающих материалов по стоимости ресурсов, обеспечение возможности оперативного подбора аналогов МТР).

6.1.4. Анализ и оптимизация транспортных схем доставки МТР.

6.1.5. Формирование и актуализация базы данных ресурсно-технологических моделей выполнения СМР (набор строительных ресурсов, оборудования и прочих составляющих в натуральном и стоимостном выражении, необходимых для выполнения конструктивного элемента, комплекса (вида) работ или для возведения объекта в целом по принятой технологии, в базовых и в текущих ценах).

6.1.6. Формирование и актуализация базы данных укрупненных нормативов цены строительства и ТЭП объектов-аналогов, формирование калькуляций затрат на единичный показатель по видам работ (тыс. руб. на 1 м³, 1 м², п.м. и т.п.).

6.1.7. Внесение в специальный реестр (классификатор) типовых ошибок или недоработок проекта, приводящих к превышению предельной стоимости строительства.

6.2. Методологические инструменты.

6.2.1. Формирование и актуализация методических рекомендаций по разработке сметной документации («база знаний инженера-сметчика», учитывающая накопленный коллективный опыт по вопросам ценообразования и сметного нормирования в проектировании и строительстве):

- учет особенностей ценообразования;
- решения по спорным вопросам;
- типовые расчеты и т.п.

6.2.2. Формирование и актуализация методических рекомендаций по идентификации и оценке рисков, разработке мероприятий по контролю и управлению рисками.

6.2.3. Актуализация чек-листов по проверке качества и полноты ПД и РД.

6.2.4. Актуализация регламента учета затрат по проекту с последующей корректировкой преддоговорной, договорной, закупочной и производственной деятельности.

6.2.5. Уточнение требований к составу и содержанию разделов ПД и РД (в том числе ПОС) с целью минимизации необеспеченных финансированием затрат на стадии строительства объекта.

6.2.6. Актуализация шаблонов ВОР и спецификаций МТР и методических рекомендаций по их заполнению.

6.2.7. Формирование и актуализация перечня прочих работ и затрат, включаемых в сводный сметный расчет стоимости строительства.

6.2.8. Формирование предложений по разработке новых и актуализации существующих сметных нормативов.

6.3. Технологические инструменты.

6.3.1. База данных МТР, включающая транспортные схемы доставки, справочники сметной и фактической стоимости ресурсов.

6.3.2. База данных ресурсно-технологических моделей СМР.

6.3.3. База данных укрупненных показателей стоимости строительства и ТЭП объектов-аналогов.

6.3.4. Реестр типовых ошибок проектирования.

6.3.5. «База знаний инженера-сметчика».

6.3.6. ПО для календарно-сетевого планирования, контроля и прогнозирования подрядных работ.

6.3.7. ПО для проектирования (включая проектирование с применением технологий информационного моделирования), сметное ПО, учетное ПО.

6.3.8. Информационно-аналитическая система планирования и управления проектированием и строительством.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный методический подход и система методологических, организационных и технологических практических инструментов по его реализации основаны на действующих нормативно-правовых актах в области архитектурно-строительного проектирования и строительства, а также на «лучших практиках» и опыте выполнения работ по проектированию и строительству объектов различной степени сложности.

Элементы комплексной системы управления стоимостью строительства могут применяться отдельно для решения частных задач, связанных со стоимостью строительства объекта, однако наибольший эффект достигается за счет их системного применения. Системное применение практических инструментов управления стоимостью обеспечивает возможность определения стоимости строительства с высокой степенью достоверности на предпроектной и проектной стадиях, эффективного контроля и удержания стоимости в ранее определенных пределах на стадиях строительства и ввода объекта в эксплуатацию.

С внедрением КСУСС среди участников инвестиционно-строительного процесса создается единое методологическое и информационное поле для взаимодействия, в рамках которого появляется возможность своевременно получать информацию, оперативно реагировать на изменения и принимать соответствующие управленческие решения.

Применение на практике предложенных практических КСУСС приведет к ряду существенных количественных и качественных эффектов для всех участников инвестиционно-строительного процесса:

- обеспечению «сквозного» планирования реализации инвестиционно-строительного проекта с предварительной оценкой объемов работ, затрат ресурсов и стоимости строительства объекта в целом и отдельных его элементов, с последующей оценкой фактического и прогнозного уровня контролируемых показателей;

- повышению достоверности определения предполагаемой (предельной) стоимости строи-

тельства объекта на этапах планирования капитальных вложений и разработки предпроектной документации за счет формирования и постоянной актуализации базы данных ТЭП объектов-аналогов и укрупненных нормативов цены строительства, формирования и согласования исходных данных для проектирования, оценки рисков и границ изменения предполагаемой (предельной) стоимости строительства на последующих этапах;

- обеспечению обоснованного определения целевых ТЭП и удельных показателей стоимости строительства проектируемого объекта на стадии разработки ПД за счет более глубокой проработки предпроектной документации;

- минимизации случаев несоответствия объемов и стоимости работ и затрат, учтенных в технической и сметной частях ПД;

- минимизации отклонений стоимости строительства объекта на этапе проектирования и в процессе строительства объекта;

- постоянному накоплению и актуализации данных о ТЭП реализованных объектов, фактической стоимости строительства объекта и отдельных его составляющих, стоимости использованных материально-технических, трудовых и других ресурсов;

- постоянному повышению качества планирования и оценки капитальных вложений в реализацию будущих объектов.

Главными заинтересованными во внедрении и применении КСУСС при реализации инвестиционно-строительных проектов сторонами представляются застройщик (инвестор) и технический заказчик. На техническом заказчике лежит ответственность, в том числе, за проверку сроков выполнения работ и их стоимости, а также принятие мер по эффективному использованию выделяемых заказчиком-застройщиком (инвестором) денежных средств⁵.

Проектной организацией для выполнения целей внедрения КСУСС необходимо реорганизовать процесс проектирования таким образом, чтобы инженеры-проектировщики принимали не просто проектные технические решения, а экономически обоснованные проектные технические решения, основанные на предварительном анализе и проработке альтернативных вариантов. В современных условиях для инженеров-проектировщиков критически важным становится умение понимать взаимосвязь объемов работ и их стоимости. В рамках КСУСС в процессе выработки проектных решений необходима параллельная работа инженеров-проектировщиков и инженеров-сметчиков с целью обеспечения возможности оперативного расчета стоимости возможных вариантов проектных решений и повышения степени точности оценки стоимости. Решение дан-

⁵ Методика определения затрат на осуществление функций технического заказчика: утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 02.06.2020 года № 297/пр.

ной задачи значительно облегчается при применении технологий информационного моделирования при проектировании объектов, позволяющих осуществлять сбор, хранение и комплексную обработку в процессе проектирования всей технической, экономической и иной информации о проектируемом объекте со всеми взаимосвязями и зависимостями [12, 13].

Таким образом, инженеры-проектировщики и инженеры-сметчики должны совместно определять возможные варианты и стоимость проектных решений, оценивать их приоритетность с точки зрения технической реализуемости и экономической эффективности для формирования стоимости строительства с высокой степенью точности. Системное применение элементов КСУСС позволит всем участникам перейти к ресурсному методу определения стоимости строительства, обеспечит более высокую точность оценки стоимости [14].

Задачей подрядной организации в рамках КСУСС является внимательное рассмотрение проектно-сметной документации на стадии проведения конкурсных процедур и подготовки к заключению контракта на выполнение работ, анализ контрактного графика с точки зрения его реалистичности и оптимальности с точки зрения объемов, их распределения по времени, сроков и стоимости выполнения работ, и последующее исполнение заключенного контракта с постоянным мониторингом и анализом себестоимости выполнения работ.

Для обеспечения успешного функционирования КСУСС и повышения конкурентоспособности

подрядных и инжиниринговых компаний требуется наличие в организациях, участвующих в процессе строительства объектов капитального строительства, персонала высокой квалификации, мотивация участников процесса на решение задач соблюдения качества, сроков и стоимости строительства, а также перенастройка привычных процессов и методов управления инвестиционно-строительными проектами [15–17]. В условиях непрерывного увеличения количества и скорости обмена информацией, связанной с реализацией ИСП, важнейшую роль играют инструменты систематизации и оптимизации потоков информации с широким внедрением технологий информационного моделирования на стадиях проектирования и строительства [18, 19–21], календарно-сетевого планирования и прогнозирования, а также управления проектами.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о необходимости дальнейшей проработки методических подходов, организационных и технологических инструментов системы управления стоимостью строительства объектов различного назначения и уровня сложности на всем протяжении их жизненного цикла с целью повышения уровня достоверности определения сметной стоимости, повышения эффективности капитальных вложений, а также минимизации отклонений между запланированной, договорной и фактической стоимостью строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Лягин А.В., Лягин В.Ю.* Анализ требований к системе ценообразования в строительстве // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 254–259. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.6.697-708 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17994425>
2. *Колосова Е.В., Сухачев К.А.* Анализ проблем реализации строительных проектов // PRoAtom.ru. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?file=print&name=News&sid=3743>.
3. *Журавлев П.А., Марукян А.М.* Обоснование планируемой стоимости инвестиционно-строительных проектов // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 12. С. 1693–1707. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1693-1707 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44896391>
4. *Силка Д.Н.* Новые технологии повышения достоверности стоимостных расчетов строительных проектов // Научное обозрение. 2017. № 20. С. 84–89.
5. *Мухаррамова Э.Р., Файзуллин И.Э., Ажимова Л.И.* Стоимостной инжиниринг: формирование стоимости строительства // Российское предпринимательство. 2017. Т. 18. № 16. С. 2317–2336. DOI: 10.18334/tr.18.16.38234
6. *Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В., Жаров Я.В.* Математическое описание информационного взаимодействия в инвестиционно-строительной деятельности // Вестник МГСУ. 2014. № 5. С. 170–175. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21495103>
7. *Королевский К.Ю.* О техническом регулировании в строительстве // БСТ: бюллетень строительной техники. 2011. № 1. С. 15–16.
8. *Aziz N.D., Nawawi A.H., Ariff R.M.* ICT evolution in facilities Management (FM): Building information modelling (BIM) as the latest technology // Procedia — Social and Behavioral Sciences. 2016. Vol. 234. Pp. 363–371. DOI: 10.1016/j.sbspro.2016.10.253
9. *Гинзбург А.В.* Информационная модель жизненного цикла строительного объекта // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 9. С. 61–65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27158900>
10. *Гусакова Е.А.* Информационное моделирование жизненного цикла проектов высотного строительства // Вестник МГСУ. 2020. № 5. С. 170–175. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44896391>

- тельства // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 1 (112). С. 14–22. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.14-22 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32358161>
11. Dulaimi M.F., Ling F.Y., Bajracharya A. Organizational motivation and inter-organizational interaction in construction innovation in Singapore // Construction Management and Economics. 2003. Vol. 21. Issue 3. Pp. 307–318. DOI: 10.1080/0144619032000056144
12. Румянцева Е.В., Манухина Л.А. BIM-технологии: подход к проектированию строительного объекта как единого целого // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2015. № 5 (18). С. 33–36. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.6.697-708
13. Кузина О.Н. Информационное моделирование стоимости объекта строительства на каждом этапе жизненного цикла // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 1. С. 107–111. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36971441>
14. Куцыгина О.А., Галицын Г.Н. Развитие ценообразования в строительной отрасли и управление жизненным циклом зданий // Экономика строительства. 2017. № 6 (48). С. 12–25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30558829>
15. Прохорова Ю.С. Комплексный подход к управлению стоимостью строительства объекта в условиях государственного инвестирования // Экономика и управление: научно-практический журнал.
- Поступила в редакцию 12 июля 2022 г.
Принята в доработанном виде 28 октября 2022 г.
Одобрена для публикации 28 октября 2022 г.
- ОБ АВТОРЕ: Дмитрий Станиславович Мошкалёв — кандидат экономических наук, начальник отдела оценки экономической эффективности проектов; Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта (НИИ Транснефть); 117186, г. Москва, Севастопольский пр-т, д. 47А; SPIN-код: 8552-3345; moshkalev@yandex.ru.

REFERENCES

1. Lyapin A.V., Lyapin V.Y. Analysis of requirements applicable to the pricing system in the construction industry. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 10:254-259. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.6.697-708 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17994425> (rus.).
2. Kolosova E.V., Suhachyov K.A. Analysis of problems in the implementation of construction projects. *PRoAtom.ru*. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?file=print&name=News&sid=3743> (rus.).
3. Zhuravlev P.A., Marukyan A.M. Substantiation of projected costs of investment and construction projects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2020; 12:1693-1707. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1693-1707 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44896391> (rus.).
4. Silka D.N. New technologies of increasing the reliability of calculating construction project costs. *Scientific Review*. 2017; 20:84-89. (rus.).
5. Muhamarranova E.R., Fajzullin I.E., Azhimova L.I. Cost engineering: construction price formation. *Russian Entrepreneurship*. 2017; 18(16):2317-2336. DOI: 10.18334/rp.18.16.38234 (rus.).
6. Sborshchikov S.B., Lazareva N.V., Zharov Ya.V. Mathematical description of information interaction in investment and construction activities. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 5:170-175. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21495103> (rus.).
7. Korolevskiy K.Yu. On technical regulation in construction. *Bulletin of construction equipment*. 2011; 1:15-16.
8. Morozenko A.A., Voronkov I.E. Современные подходы к оценке надежности предприятий, участвующих в реализации инвестиционно-строительных проектов // Научное обозрение. 2017. № 12. С. 123–128.
9. Синенко С.А., Иванов В.А., Ефимов В.В. Особенности организации и проведения конкурсных подрядных торгов при реализации инвестиционно-строительных проектов // Научное обозрение. 2017. № 13. С. 104–107.
10. Каллаур Г.Ю. Обоснование инвестиций в технологии информационного моделирования // Экономика строительства. 2018. № 1 (49). С. 27–38. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32819622>
11. Alcínia Z.S. BIM as a computer-aided design methodology in civil engineering // *Journal of Software Engineering and Applications*. 2017. Issue 10. Pp. 194–210. DOI: 10.4236/jsea.2017.102012
12. Jaap Groen. 10 BIM Trends in the MEP Industry for 2018 // Constructible. URL: <https://fieldtech.trimble.com/resources/construction-industry-2/10-bim-trends-in-the-mep-industry-for-2018-2>
13. Zou Y., Kiviniemi A., Jones S.W. A review of risk management through BIM and BIM-related technologies // *Safety Science*. 2017. Vol. 97. Pp. 88–98. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.12.027

8. Aziz N.D., Nawawi A.H., Ariff R.M. ICT evolution in facilities Management (FM): Building information modelling (bim) as the latest technology. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2016; 234:363-371. DOI: 10.1016/j.sbspro.2016.10.253 (rus.).
9. Ginzburg A.V. Building life cycle information modelling. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 9:61-65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27158900> (rus.).
10. Gusakova E.A. Information modeling of life cycle of high-rise construction projects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(1):14-22. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.14-2 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32358161> (rus.).
11. Dulaimi M.F., Ling F.Y., Bajracharya A. Organizational motivation and inter-organizational interaction in construction innovation in Singapore. *Construction Management and Economics*. 2003; 21(3):307-318. DOI: 10.1080/0144619032000056144
12. Rumyanceva E.V., Manuhina L.A. BIM-technology: an approach to the design of the construction site as a whole. *Modern Science: Actual Problems and Ways to Solve Them*. 2015; 5(18):33-36. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.6.697-708 (rus.).
13. Kuzina O.N. Information modeling of construction object cost at each stage of lifecycle. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2019; 1:107-111. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36971441> (rus.).
14. Kucygina O.A., Galicyn O.A. Development of pricing in the construction industry and building life-cycle management. *Construction Economics*.
- 2017; 6(48):12-25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30558829> (rus.).
15. Prohorova Yu.S. A comprehensive approach to construction cost management in the context of public investment. *Economics and Management: Scientific and Practical Journal*. 2020; 26(8):861-872. DOI: 10.35854/1998-1627-2020-8-861-872 (rus.).
16. Morozenko A.A., Voronkov I.E. Modern approaches to assessing the reliability of enterprises involved in the implementation of investment and construction projects. *Scientific Review*. 2017; 12:123-128. (rus.).
17. Sinenko S.A., Ivanov V.A., Efimov V.V. Specific features of organizing and conducting tender contract auctions in the course of implementing investment-construction projects. *Scientific Review*. 2017; 13: 104-107. (rus.).
18. Kallaur G.Yu. Feasibility study on information modeling technologies. *Construction economics*. 2018; 1(49):27-38. (rus.).
19. Alcínia Z.S. BIM as a computer-aided design methodology in civil engineering. *Journal of Software Engineering and Applications*. 2017; 10:194-210. DOI: 10.4236/jsea.2017.102012
20. Jaap Groen. 10 BIM Trends in the MEP Industry for 2018. *Constructible*. URL: <https://fieldtech.trimble.com/resources/construction-industry-2/10-bim-trends-in-the-mep-industry-for-2018-2>
21. Zou Y., Kiviniemi A., Jones S.W. A review of risk management through BIM and BIM-related technologies. *Safety Science*. 2017; 97:88-98. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.12.027.

Received July 12, 2022.

Adopted in revised form on October 28, 2022.

Approved for publication on October 28, 2022.

BIO NOTES: **Dmitrii S. Moshkalev** — Candidate of Economic Sciences, Head of the project economic evaluation department; **The Pipeline Transport Institute (Transneft R&D)**; 47a Sevastopol'skiy prospect, Moscow, 117186, Russian Federation; SPIN-code: 8552-3345; moshkalev@yandex.ru.

Оптимизация технологических решений при устройстве подземного пространства существующих зданий

Лейсан Идрисовна Зигангирова, Ильяс Халимович Галиев,

Руслан Абдирашитович Ибрагимов, Фарид Рашитович Шакирзянов

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются вопросы оптимизации технологических решений при устройстве дополнительных подземных пространств в существующих зданиях. Актуальность выполненных работ продиктована все меньшим количеством свободных мест в центральной части развивающихся городов, а также тем, что расширение подземного пространства под существующей застройкой дает возможность городу эффективно и органично развивать свои территории.

Материалы и методы. Применен центральный композиционный план Бокса, который используется для построения полиномов второго порядка. Тип плана: двухфакторный композиционный (ротатабельный) эксперимент с квадратичной моделью. Для решения данной задачи использовались программы: Gradient 3.1; Mathematica. Объектом для выполнения численных расчетов выступает бескаркасное 3-этажное здание. Конструкциями для расчета трудоемкости выполняемых работ выступали сваи, рандбалки, ростверки. Исследуемыми параметрами являлись: вес металлических конструкций и трудоемкость.

Результаты. Разработана математическая модель и получены функции зависимости исследуемых параметров, влияющих на усиление существующего здания при разработке его подземного пространства. Установлены оптимальные значения веса металлических конструкций и трудоемкости, снижающие общую стоимость предлагаемой технологии. С использованием программного комплекса Mathematica определено, что оптимальный шаг расположения балок колеблется в интервале от 1,2 до 1,5 м.

Выводы. Получена функция, описывающая кривую зависимости двух параметров: веса металлических конструкций, используемых для усиления здания, и трудоемкости монтажа конструкций. Выявлены оптимальные точки исследуемых параметров, при которых вес и трудоемкость будут минимальными. Это способствует снижению общего веса используемых металлических конструкций для усиления существующего здания и снижению общей стоимости предлагаемой технологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подземное пространство, экономический эффект, оптимизация, технологические решения, трудоемкость, параметры

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зигангирова Л.И., Галиев И.Х., Ибрагимов Р.А., Шакирзянов Ф.Р. Оптимизация технологических решений при устройстве подземного пространства существующих зданий // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1528–1536. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1528-1536

Автор, ответственный за переписку: Руслан Абдирашитович Ибрагимов, rusmag007@yandex.ru.

Optimization of engineering solutions used to develop the underground spaces of existing buildings

Leysan I. Zigangirova, Ilyas Kh. Galiev, Ruslan A. Ibragimov, Farid R. Shakirzyanov

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article deals with the optimization of engineering solutions applied in the course of arrangement of additional underground spaces under existing buildings. The decreasing number of unoccupied spaces in the central areas of developing cities and the fact that the expansion of spaces under existing buildings allows the city to effectively and organically develop its territories explain the relevance of this research.

Materials and methods. The authors apply the central composite Box design, that is used to construct second order polynomials to make a plan of a two-factor composite (rotatable) experiment with a quadratic model. To solve this problem, the following software programmes were used: Gradient 3.1; Mathematica. The object of numerical calculations is a frameless 3-storey building. The structures, used to calculate the labour intensity of the work performed, included piles, ground beams, and foundation grillages. The weight of metal structures and the labour intensity were the parameters to be studied.

Results. A mathematical model was developed and dependence functions of the studied parameters, affecting the reinforcement of an existing building during the redevelopment of its underground space, were obtained. Optimal values of (1) weight of metal structures and (2) the labour intensity, reducing the total cost of the proposed technology, were identified. The Mathematica software package was applied to identify the optimal beam spacing that varied from 1.2 to 1.5 m.

Conclusions. The function, obtained by the authors, describes the curve showing dependence between the following two parameters: the weight of metal structures, used to reinforce the building, and the labour intensity of installation work. Optimal values of the studied parameters, ensuring minimal weight and labour intensity, are identified to reduce the total weight of metal structures, used to reinforce the existing building and reduce the overall cost of the proposed technology.

KEYWORDS: underground space, economic effect, optimization, engineering solutions, labour intensity, parameters

FOR CITATION: Zigangirova L.I., Galiev I.Kh., Ibragimov R.A., Shakiryanov F.R. Optimization of engineering solutions used to develop the underground spaces of existing buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1528-1536. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1528-1536 (rus.).

Corresponding author: Ruslan A. Ibragimov, rusmag007@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие подземного пространства является важным направлением в строительстве новых объектов и в реконструкции уже существующих. Освоение подземного пространства освобождает пространство над землей, повышает экономическую эффективность зданий, сохраняет исторические объекты. Освоение подземного пространства в крупных мегаполисах стало неотъемлемой частью строительной сферы для эффективного использования и модернизации городского пространства [1, 2]. Предпосылками комплексного освоения подземного пространства служит система создания комфортных пешеходных пространств и транспортно-пересадочных коммуникаций, нехватка парковочных мест, климатические условия (продолжительное межсезонье), освобождение наземной территории, новое качество общественных пространств, сохранение сложившейся застройки, высокая стоимость земли в центре, градостроительный потенциал территории [3, 4].

При строительстве подземных объектов требуется тщательное изучение геологических, гидрогеологических условий местности, также зачастую при реконструкции существующих объектов необходимо усилить конструкции оснований и фундаментов зданий или при необходимости пересаживать сооружения на новые фундаменты. Без данного этапа строительство дополнительных подземных этажей в существующих зданиях невозможно, как правило, такие здания находятся в состоянии значительного физического износа и не рассчитаны на усилия, которые возникают при выполнении строительных работ, направленных на развитие подземного пространства.

Именно расширение подземного пространства под существующей застройкой дает возможность городу эффективно и органично развивать свои территории. Причины использования подземного пространства под существующими зданиями представлены на рис. 1.

В настоящее время существует несколько технологий развития подземного пространства.

1. Стена в грунте. Технология предполагает устройство форшахты, которая является направляющей для будущей траншеи и для укрепления ее стенок, затем разрабатывается грунт на принятую необходимую глубину с помощью гидравлического грейфера и осуществляется выемка грунта под защитой гли-

нистого раствора, где устраиваются заранее изготовленные арматурные каркасы, после бетонирования которых образуется сплошная монолитная стена [5].

2. Опускные колодца. Представляет полую фигуру различной формы, которая под собственным весом, также с помощью работы домкратов опускается в грунт. Подобные конструкции опускных колодцев служат одновременно и фундаментом глубокого заложения для надземных строений конструкции, также стеной для подземной части здания [6].

3. «TOP-DOWN». Данная технология дает возможность поясного развития подземного пространства вблизи имеющейся застройки. Технология предполагает устройство шпунтового ограждения с изготовлением свай по периметру или устройства «стены в грунте». Далее ведется поясная разработка грунта с поочередным бетонированием плит перекрытий. Данная технология дает возможность ведения строительных работ одновременно как в подземной части, так и в надземной [7–10].

Выбор той или иной технологии по расширению подземного пространства связан с категорией состояния здания, с возможными рисками [11–13]. Основополагающими факторами являются состояние несущих конструкций, грунта, дальность близлежащих объектов, условия залегания подземных вод.

Авторами [14–16] разработана технология проектирования и возведения пространства под существующими зданиями. Но в данных исследованиях отсутствует оптимизационный подход технологических решений, при котором предлагаемая технология при своей реализации будет наиболее экономичной и наименее трудоемкой [17–21]. Целью данной статьи является разработка методов оптимизации технологических решений, при которых стоимость выполняемых работ и трудозатраты будут минимальными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Многофакторный эксперимент позволяет решить задачи оптимизации с высокой точностью с помощью выбора минимального количества условий проведения эксперимента. Все параметры, которые влияют на условие поставленной задачи, меняются с определенным шагом, который задается предварительно. При этом получаются результаты оптимизации для многофакторного эксперимента в виде математической модели.



Рис. 1. Причины использования подземного пространства существующих зданий

Fig. 1. Reasons for using the underground space of existing buildings

Для того чтобы получить функцию, описывающую кривую в результате проведения эксперимента, необходимо правильно поставить условия задачи: выбрать факторы, изменяющиеся с определенным шагом, выбрать критерии оптимальности и план эксперимента.

Табл. 1. Матрица планирования эксперимента

Table 1. Experiment planning matrix

Номер состава Composition No.	Матрица планирования Planning matrix		Натуральные значения переменных Natural values of variables	
	X1	X2	X1	X2
1	-1	-1	1	100
2	1	-1	2	100
3	-1	1	1	200
4	1	1	2	200
5	-1,4142	0	0,79289	150
6	1,4142	0	2,2071	150
7	0	-1,4142	1,5	79,289
8	0	1,4142	1,5	220,71
9	0	0	1,5	150

Главными факторами для решения данной задачи являются: шаг расположения балок, нагрузка, передающаяся со всех конструкций существующего здания на усиливающие элементы. Уровни варьирования указанных независимых переменных и матрица планирования приведены в табл. 1, 2.

Табл. 2. Уровни варьирования факторов

Table 2. Factor value range

Факторы Factors	Название факторов Name of factors	Уровни варьирования Value range		
		-1	0	+1
X1	Шаг расположения балок усиления, м Reinforcement beam spacing, m	1	1,5	2
X2	Нагрузка, кН/м ² Load, kN/m ²	100	150	200

В работе применен центральный композиционный план Бокса, который используется для построения полиномов второго порядка. Тип плана: двухфакторный композиционный (ротатабельный) эксперимент с квадратичной моделью. Для решения данной задачи использовалась программа Gradient 3.1.

Объектом для выполнения численных расчетов выступает 3-этажное здание с размерами в плане 18,0 × 6,0 м. Конструктивная схема принятого реконструируемого здания — бескаркасная. Имеются диафрагмы жесткости в виде лестничных маршей. Фундаменты мелкого заложения — ленточные, выполнены из керамического кирпича. Стены сложены из полнотелого керамического кирпича различных размеров 250 × 120 × 65 мм на известковом растворе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Составлена табл. 3 на базе девяти ключевых сочетаний факторов, полученных в программе Gradient 3.1.

На основе полученных расчетов и сопоставления различных комбинаций сочетаний шага балок и нагрузки выведена формула нахождения общего

веса металлических конструкций усиления здания для выявления оптимального шага балок:

$$W = 2 \cdot W_{\text{ранд}} + n \cdot l \cdot W_{\text{рб}} + 2 \cdot W_{\text{рост}}, \quad (1)$$

где W — общий вес металла; $W_{\text{ранд}}$ — вес рандбалки; $n = (L/m + 1)$; L — длина участка (здания); m — шаг расстановки балок; l — длина поперечной балки; $W_{\text{рб}}$ — вес поперечных (главных) балок; $W_{\text{рост}}$ — вес ростверка.

С целью определения оптимальных параметров веса металлических конструкций и трудоемкости, соответствующей минимальному шагу, зависящей от расположения шага балок и нагрузки, были проведены численные расчеты по заданным исходным данным табл. 1. Результаты расчетов приведены в табл. 4 и 5.

Для построения поверхностей зависимости ведущих факторов от получаемых откликов (вес и трудоемкость конструкций) и получения оптимальных значений использовалась программа Mathematica, позволяющая проводить математические расчеты и получать результаты в виде графиков с функцией F_1 , F_2 , которая описывает их поведение.

Табл. 3. Трудоемкость выполняемых работ и масса используемых металлоконструкций

Table 3. The labour intensity of the work performed and the weight of metal structures used

Номер Number	Трудоемкость, чел/ч Labour intensity, man/hour					Вес, кН (на 12 м длины конструкции) Weight, kN (per 12 m of length)
	Сваи Piles	Рандбалка Groundbeam	Балка Beam	Ростверк Grillage	Сумма Total	
1	58,50	57,75	274,72	3,08	394,07	20,97
2	96,93	130,05	214,29	5,99	447,27	23,34
3	117,01	86,39	412,09	4,46	619,96	31,32
4	121,16	196,72	330,61	8,90	657,41	35,56
5	207,71	57,75	392,70	3,08	661,25	27,73
6	91,39	196,72	262,21	8,90	559,23	31,64
7	155,78	81,69	213,50	4,46	455,45	19,7
8	124,62	149,30	375,41	6,84	656,19	34,19
9	87,23	112,68	280,22	5,99	486,14	26,24

Табл. 4. Результаты расчетов по отклику — вес

Table 4. Response analysis results (weight)

Номер Number	Факторы влияния Factors of influence		Отклик Response
	Шаг расположения балок, м Beam spacing, m	Нагрузка от вышележащих конструкций, кН/м ² Load due to upper structures, kN/m ²	
1	1	100	20,97
2	2	100	23,34
3	1	200	31,32
4	2	200	35,56
5	0,79289	150	27,73
6	2,2071	150	31,64
7	1,5	79,289	19,7
8	1,5	220,71	34,19
9	1,5	150	26,24

Табл. 5. Результаты расчетов по отклику — трудоемкость

Table 5. Response analysis results (labour intensity)

Номер Number	Шаг расположения балок, м Beam spacing, m	Нагрузка от вышележащих конструкций, кН/м ² Load due to upper structures, kN/m ²	Трудоемкость, чел/ч Labour intensity, man/hour
1	1	100	394,07
2	2	100	447,27
3	1	200	619,96
4	2	200	657,41
5	0,79289	150	661,25
6	2,2071	150	559,23
7	1,5	79,289	455,45
8	1,5	220,71	656,19
9	1,5	150	486,14

Коэффициенты квадратичной функции находили путем минимизации невязки между численными расчетами и значениями, полученными по предложенной модели.

По результатам расчетов получены функции в виде математической зависимости от независимых переменных X_1, X_2 :

$$F_1 = 26,09 - 18,88 X_1 + 0,053 X_2 + 6,37 X_1^2 + 0,000089 X_2^2 + 0,0187 X_1 X_2; \quad (2)$$

$$F_2 = 832,78 - 574,33 X_1 + 0,544 X_2 + 194,85 X_1^2 + 0,0086 X_2^2 - 0,1575 X_1 X_2. \quad (3)$$

По результатам вычислений построены поверхности зависимостей ведущих факторов от веса металлических конструкций и трудоемкости усиливающих элементов (рис. 2, 3).

На рис. 3 представлены оптимальные точки: A — веса металлических конструкций и B — трудоемкости, при которых предлагаемая технология

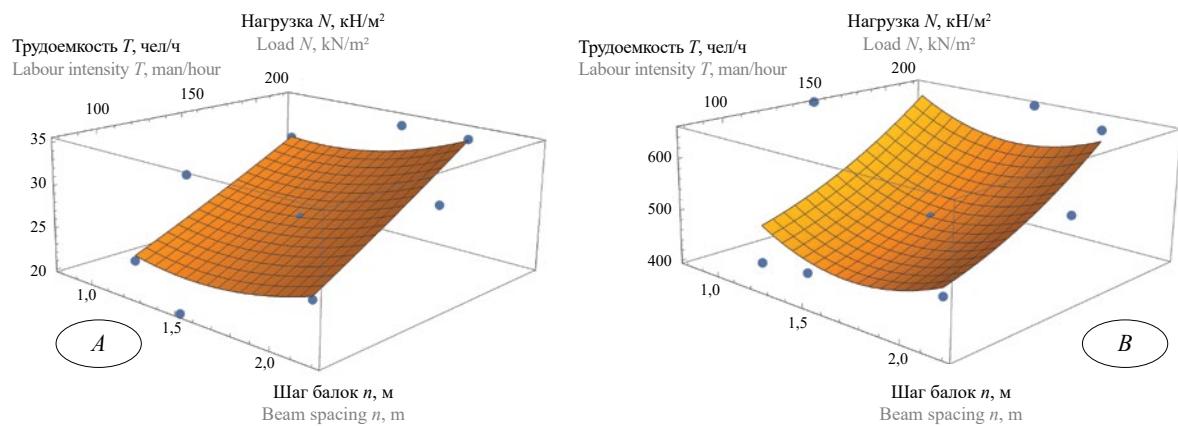


Рис. 2. Поверхность интерпретации влияния ведущих факторов на: *A* — общий вес металлических конструкций; *B* — общую трудоемкость

Fig. 2. Surface interpretation of the influence of leading factors on: *A* — total weight of metal structures; *B* — total labour intensity

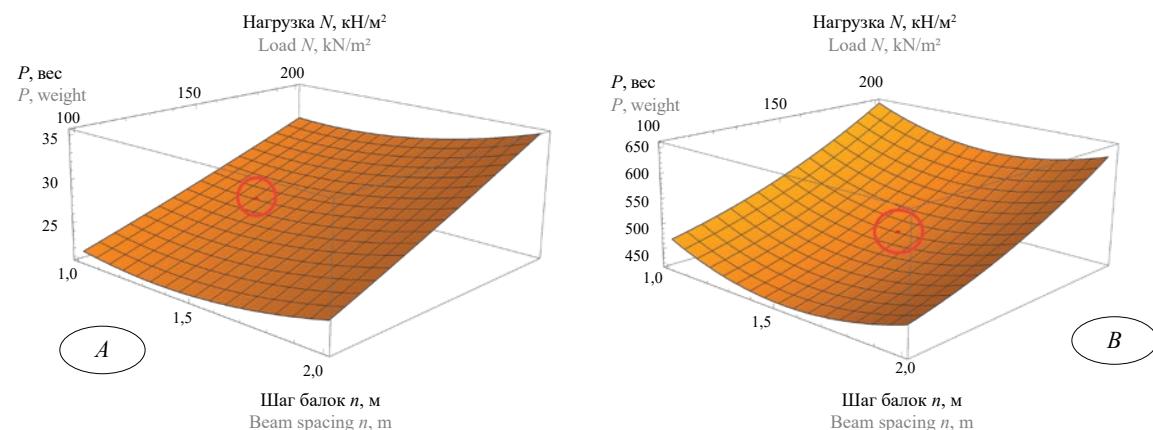


Рис. 3. Оптимальная точка в зависимости от шага расположения балок и прикладываемой нагрузки: *A* — вес металлических конструкций; *B* — точка трудоемкости

Fig. 3. Optimum point depending on beam spacing and applied load: *A* — weight of metal structures; *B* — labour intensity point

будет наиболее экономичной и наименее трудоемкой.

Оптимальная точка, равная шагу расположения балок при нагрузке $N = 150$ кН, $n = 1,26187$ м, при общем весе металлических конструкций $P = 25,8786$ кН/м.

Оптимальная точка, равная шагу расположения балок при нагрузке $N = 150$ кН, $n = 1,5344$ м, при общей трудоемкости $T = 485,9$ чел/ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Получена функция, описывающая кривую зависимости двух параметров: веса металлических

конструкций, используемых для усиления здания, трудоемкости монтажа конструкций.

Выявлены оптимальные точки исследуемых параметров, при которых вес и трудоемкость будут минимальными. Это способствует снижению общего веса используемых металлических конструкций для усиления существующего здания, что, соответственно, снизит общую стоимость предлагаемой технологии и приведет к положительному экономическому эффекту. Минимальный вес металлоконструкций для обследуемого здания наблюдается при шаге балок, равном 1,26 м, а минимальная трудоемкость выполненных работ — при шаге балок, равном 1,53 м.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bobylev N. Underground space as an urban indicator: Measuring use of subsurface // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 55. Pp. 40–51. DOI: 10.1016/j.tust.2015.10.024
2. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Efficient complex activation of Portland cement through processing it in the vortex layer machine // Structural Concrete. 2019. Vol. 20. Issue 2. Pp. 851–859. DOI: 10.1002/suco.201800008

3. Nelson P.P. A framework for the future of urban underground engineering // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 55. Pp. 32–39. DOI: 10.1016/j.tust.2015.10.023
4. Stroganov V., Sagadeev E., Ibragimov R., Potapova L. Mechanical activation effect on the biostability of modified cement compositions // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 246. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118506
5. Kadyrov A.S., Zhunusbekova Zh., Ganyukov A.A. Study and calculation of earth-moving machines for the construction by “wall in the ground” method // *Material and Mechanical Engineering Technology*. 2021. Vol. 1. Issue 1. Pp. 3–8. DOI: 10.52209/2706-977X_2021_1_3
6. Лугина К.А., Сегаев И.Н. Воздведение сооружений методом опускного колодца // Аллея науки. 2018. Т. 1. № 4 (20). С. 519–522. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34975142>
7. Tan Y., Huang R., Kang Z., Bin W. Covered semi-top-down excavation of subway station surrounded by closely spaced buildings in downtown Shanghai: Building response // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016. Vol. 30. Issue 6. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000892
8. Wong J.Y., Yip C.C., Mugumya K.L., Tan B.H., Anwa M.P. Effectiveness of top-down construction method in Malaysia // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019. Vol. 8 (6S4). Pp. 386–392. DOI: 10.35940/ijitee.f1078.0486s419
9. Jamsawang P., Voottiprue P., Tanseng P., Jongpradist P., Bergado D.T. Effectiveness of deep cement mixing walls with top-down construction for deep excavations in soft clay: case study and 3D simulation // *Acta Geotechnica*. 2019. Vol. 14. Issue 1. Pp. 225–246. DOI: 10.1007/s11440-018-0660-7
10. Дерина М.А. Использование подземного пространства общественных зданий в ходе их реконструкции // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. 2020. № 1 (26). С. 125–131. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41671097>
11. Khuziakhmetova K., Abdurakhmanova L., Nizamov R. Polymer mixtures based on polyvinyl chloride for the production of construction materials // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 169. Pp. 14–21. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_2
12. Ruslan I., Ruslan B., Evgenij K. The effect of metal and polypropylene fiber on technological and physical mechanical properties of activated cement compositions // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 16. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00882
13. Ибрагимов Р.А., Шаехов А.Ф., Кокиогина Л.А. Исследование влияния воздушных пото-ков на безопасность проведения грузоподъемных операций башенным краном // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. № 2 (56). С. 67–75. DOI: 10.52-409/20731523_2021_2_67
14. Галиев И.Х., Ашрапов А.Х., Ибрагимов Р.А. Научно-техническое сопровождение объекта культурного наследия дома купца Лисицына при проведении строительно-монтажных работ по его реставрации и реконструкции // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 1 (43). С. 211–218. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34915504>
15. Галиев И.Х., Ибрагимов Р.А. Мониторинг реконструируемых зданий с использованием 3D-сканеров // *Строительное производство*. 2021. № 3. С. 19–26. DOI: 10.54950/26585340_2021_3_3
16. Galeev R.R., Nizamov R.K., Abdurakhmanova L.A. Filling of epoxy polymers with chemically precipitated chalk from chemical water treatment sludge // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 147. Pp. 93–97. DOI: 10.1007/978-3-030-68984-1_14
17. Малкин А.С., Агафонов В.В., Ларин А.И., Лопушанская О.Я. Оптимизация технологических решений при использовании технологического подземного пространства // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № 9. С. 5–9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21956383>
18. Куликова Е.Ю. Выработка управленческих решений в сфере безопасности подземного строительства // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № 1. С. 79–82.
19. Куликова Е.Ю. Методические основы повышения эколого-технологической надежности городских подземных сооружений // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № 6–1. С. 176–185. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-176-185
20. Копосова А.Е. Анализ существующих методов устройства подземного пространства под зданиями при их реконструкции // *Colloquium-journal*. 2020. № 14–1(66). С. 61–64. DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11898
21. Мангушев Р.А., Лашкова Е.Б., Смоленков В.Ю., Зайцев М.А. Опыт сооружения подземных паркингов в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга // *Вестник гражданских инженеров*. 2015. № 5 (52). С. 91–100. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25061763>

О Б А В Т О Р АХ: **Лейсан Идрисовна Зигангирова** — аспирант; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; Scopus: 57879618100, ORCID: 0000-0001-9397-7328; zigangirova.98@mail.ru;

Ильяс Халимович Галиев — инженер отдела технических средств обучения; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; SPIN-код: 2286-8593, Scopus: 57218827689, ORCID: 0000-0002-8845-217X; galiev-ih@mail.ru;

Руслан Абдирашитович Ибрагимов — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии строительных процессов; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 619018, Scopus: 56504969400, ResearcherID: O-5968-2017, ORCID: 0000-0001-8879-1190; rusmag007@yandex.ru;

Фарид Рашитович Шакирзянов — кандидат технических наук, доцент кафедры механики; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 616679, Scopus: 57208861289, ResearcherID: L-2548-2018, ORCID: 0000-0002-6514-8335; faritbox@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bobylev N. Underground space as an urban indicator: Measuring use of subsurface. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016; 55:40-51. DOI: 10.1016/j.tust.2015.10.024
2. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Efficient complex activation of Portland cement through processing it in the vortex layer machine. *Structural Concrete*. 2019; 20(2):851-859. DOI: 10.1002/suco.201800008
3. Nelson P.P. A framework for the future of urban underground engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016; 55:32-39. DOI: 10.1016/j.tust.2015.10.023
4. Stroganov V., Sagadeev E., Ibragimov R., Potapova L. Mechanical activation effect on the bio-stability of modified cement compositions. *Construction and Building Materials*. 2020; 246. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118506
5. Kadyrov A.S., Zhunusbekova Zh., Ganyukov A.A. Study and calculation of earth-moving machines for the construction by “wall in the ground” method. *Material and Mechanical Engineering Technology*. 2021; 1(1):3-8. DOI: 10.52209/2706-977X_2021_1_3
6. Lugina K.A., Segaev I.N. Construction of structures by the method of a fall well. *Alley of Science*. 2018; 1(4):519-522. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34975142> (rus.).
7. Tan Y., Huang R., Kang Z., Bin W. Covered semi-top-down excavation of subway station surrounded by closely spaced buildings in downtown Shanghai: Building response. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016; 30(6). DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000892
8. Wong J.Y., Yip C.C., Mugumya K.L., Tan B.H., Anwar M.P. Effectiveness of top-down construction method in Malaysia. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019; 8(6S4):386-392. DOI: 10.35940/ijitee.f1078.0486s419
9. Jamsawang P., Voottipruex P., Tanseng P., Jongpradist P., Bergado D.T. Effectiveness of deep cement mixing walls with top-down construction for deep excavations in soft clay: case study and 3D simulation. *Acta Geotechnica*. 2019; 14(1):225-246. DOI: 10.1007/s11440-018-0660-7
10. Derina M.A. Use of underground space of public buildings during their reconstruction. *Education and science in the modern world. Innovation*. 2020; 1(26):125-131. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41671097> (rus.).
11. Khuziakhmetova K., Abdurakhmanova L., Nizamov R. Polymer mixtures based on polyvinyl chloride for the production of construction materials. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 169:14-21. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_2
12. Ruslan I., Ruslan B., Evgenij K. The effect of metal and polypropylene fiber on technological and physical mechanical properties of activated cement compositions. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; 16. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00882
13. Ibragimov R.A., Shaekhov A.F., Koklyugina L.A. Study of the influence of air flows on the safety of carrying out lifting operations by a tower crane. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2021; 2(56):67-75. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_67 (rus.).
14. Galiev I.Kh., Ashrapov A.Kh., Ibragimov R.A. Scientific and technical support of the cultural heritage object of the house of the merchant Lisitsyn during construction and installation work on its restoration and reconstruction. *News of the Kazan State*

- University of Architecture and Engineering. 2018; 1(43):211-218. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34915504> (rus.).
15. Galiev I.Kh., Ibragimov R.A. Monitoring of reconstructed buildings using 3D scanners. *Construction Production*. 2021; 3:19-26. DOI: 10.54950/26585340_2021_3_3 (rus.).
16. Galeev R.R., Nizamov R.K., Abdurakhmanova L.A. Filling of epoxy polymers with chemically precipitated chalk from chemical water treatment sludge. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 147:93-97. DOI: 10.1007/978-3-030-68984-1_14
17. Malkin A.S., Agafonov V.V., Larin A.I., Lopushanskaia O.I. Optimization of technological decisions at use of technological underground space. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 9:5-9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21956383> (rus.).
18. Kulikova E.I. Making of administrative decisions in the field of safety of underground building.
- Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2014; 1:79-82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21218263> (rus.).
19. Kulikova E.I. Methodical principles for improving the ecological and technological reliability of urban underground structures. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 6-1:176-185. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-176-185 (rus.).
20. Koposova A.E. Analysis of existing methods for device underground space under buildings during reconstruction. *Colloquium-journal*. 2020; 14-1(66): 61-64. DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11898 (rus.).
21. Mangushev R.A., Lashkova E.B., Smolenkov V.Iu., Zaitsev M.A. Experience of building underground parking lots in the conditions of weak soils of Saint-Petersburg. *Bulletin of Civil Engineers*. 2015; 5(52):91-100. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25061763> (rus.).

Received August 11, 2022.

Adopted in revised form on October 18, 2022.

Approved for publication on October 18, 2022.

BIO NOTES: **Leysan I. Zigangirova** — postgraduate; **Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; Scopus: 57879618100, ORCID: 0000-0001-9397-7328; zigangirova.98@mail.ru;

Ilyas Kh. Galiev — Engineer of the Department of Technical Educational Aids; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; SPIN-code: 2286-8593, Scopus: 57218827689, ORCID: 0000-0002-8845-217X; galiev-ih@mail.ru;

Ruslan A. Ibragimov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technology of building processes; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 619018, Scopus: 56504969400, ResearcherID: O-5968-2017, ORCID: 0000-0001-8879-1190; rusmag007@yandex.ru;

Farid R. Shakirzyanov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, senior lecturer of the Department of Mechanics; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 616679, Scopus: 57208861289, ResearcherID: L-2548-2018, ORCID: 0000-0002-6514-8335; faritbox@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.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 004.9:69

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1537-1550

Классификация строительной информации в BIM с использованием алгоритмов искусственного интеллекта

Марина Вячеславовна Петроченко, Павел Никитич Недвига,

Анна Алексеевна Кукина, Валерия Виталиевна Шерстюк

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);

г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительная отрасль активно развивается в части нормативного регулирования по информационному моделированию зданий. Одним из важных шагов эффективного перехода к цифровому строительству является создание классификатора строительной информации, который служит основой большого количества сценариев, начиная от простейшей навигации в модели и заканчивая получением различных практически ценных результатов в виде смет, ведомостей объемов работ, материалов. На практике классификация занимает длительное время и требует новых подходов для автоматизации процесса. Инновационным решением для данной проблемы выступают алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ), представляющие инструмент прогнозирования посредством автоматического метода внесения кода в информационную модель на основе обработанных исходных данных с использованием предобученных моделей ИИ.

Материалы и методы. Материалом исследования являются подготовленные данные для обучающей выборки модели, основанные на цифровых информационных моделях гражданских и промышленных объектов.

Результаты. Исследованы российский и зарубежные классификаторы строительной информации, рассмотрены модели машинного обучения, обработана и сформирована обучающая выборка на основе цифровых информационных моделей гражданских и промышленных объектов, а также произведена оценка моделей классификации на основе обработанных данных и выбрана наиболее качественная модель классификации по скорости предобработки, времени обучения/переобучения и F1-score.

Выводы. Модель машинного обучения, случайный лес, может применяться в качестве основного алгоритма искусственного интеллекта при классификации строительной информации. Данное решение позволит ускорить процесс классификации посредством автоматического внесения кодов в модель и повысит эффективность рабочих процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: классификация в строительстве, искусственный интеллект, классификатор, модель классификации, случайный лес, машинное обучение, BIM-технологии, классификатор строительной информации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Петроченко М.В., Недвига П.Н., Кукина А.А., Шерстюк В.В. Классификация строительной информации в BIM с использованием алгоритмов искусственного интеллекта // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1537–1550. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1537-1550

Автор, ответственный за переписку: Валерия Виталиевна Шерстюк, sherstyuk2.vv@yandex.ru.

Classification of information models in BIM using artificial intelligence algorithms

Marina V. Petrochenko, Pavel N. Nedviga, Anna A. Kukina, Valeriya V. Sherstyuk

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

ABSTRACT

Introduction. The regulatory framework of building information modelling is in the process of proactive development. The development of a construction information classifier is an important step towards effective transition to digital construction. The classifier can serve as the basis for a large number of scenarios, starting from the simplest model navigation and ending with various practically valuable results obtained in the form of project budgets, statements of work amounts, and materials. In practice, classification takes a long time and requires new approaches to process automation. An innovative solution to this problem is artificial intelligence algorithms, which are a forecasting tool employing an automatic method used to enter code into an information model using processed source data and pre-trained AI models.

Materials and methods. The material to be studied is the data prepared for a training set based on digital information models of civil and industrial facilities.

Results. Russian and foreign classifiers of construction information were studied; machine learning models were considered; a training set was made and processed using digital information models of civil and industrial facilities, and classification models were evaluated using the processed data. The highest quality classification model was selected using the criteria of preprocessing velocity, training/retraining time and the F1 score.

Conclusions. A random forest machine learning model can be used as the main artificial intelligence algorithm to classify construction information. This solution will accelerate the classification process due to the automatic code entry into the model and increase the efficiency of work processes.

KEYWORDS: classification in construction, artificial intelligence, classifier, classification model, random forest, machine learning, BIM technologies, classifier of construction information

FOR CITATION: Petrochenko M.V., Nedviga P.N., Kukina A.A., Sherstyuk V.V. Classification of information models in BIM using artificial intelligence algorithms. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11): 1537-1550. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1537-1550 (rus.).

Corresponding author: Valeriya V. Sherstyuk, sherstyuk2.vv@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Постановлению РФ от 15.09.2020 № 1431 и от 05.03.2021 № 331, ведение информационной модели является обязательным для объектов капитального строительства, финансируемых с привлечением средств бюджетной системы РФ. Для проведения государственной экспертизы формирование информационной модели объекта капитального строительства требует использования классификатора строительной информации (КСИ) для единой обработки цифровых моделей.

Впервые КСИ был опубликован 1 декабря 2020 г. на сайте Федерального центра нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве. Данная система классификации необходима не только для унификации цифровых данных, но и является единым инструментом коммуникации между всеми участниками строительства, что впоследствии обеспечит заметное снижение трудозатрат и исключение ошибок при проектировании. Исполь-

зование классификатора строительной информации станет основой для автоматизированной проверки цифровых моделей, что обеспечит переход к машинночитаемому формату проектной документации [1].

Классификатор строительной информации основан на международных стандартах ISO 12006, IEC 81346 и организован посредством системного подхода, образуя упорядоченное множество разрозненных объектов. Все классы строительной информации и соответствующие классификационные таблицы, согласно ISO 12006-2:2015, относятся к одной из четырех базовых категорий строительной информации: ресурс, процесс, результат и характеристика (рис. 1). Запись кодов производится путем комбинации цифр, букв [2, 3].

Мировая практика в области строительства демонстрирует опыт использования различных систем классификации, среди которых наиболее популярными в использовании являются: UniFormat, MasterFormat 2016, OmniClass, UniClass 2015, CoClass, системы классификации CCS и Talo.

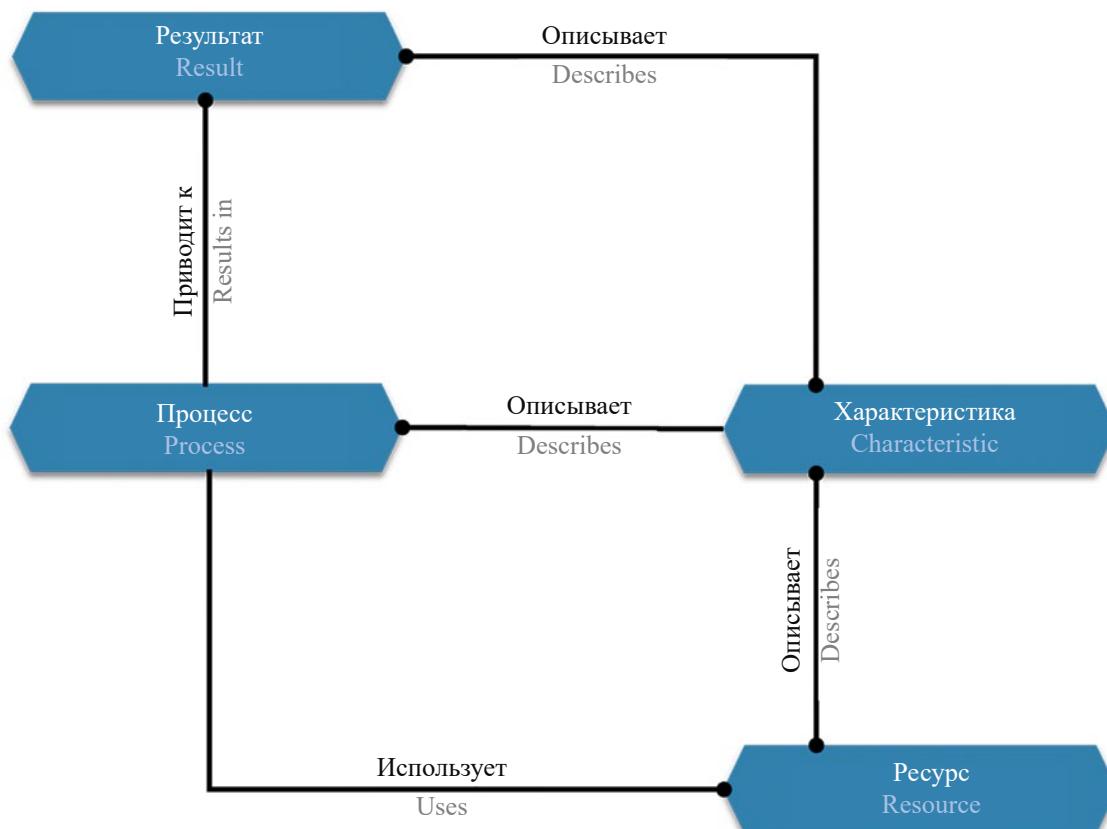


Рис. 1. Структура Классификатора строительной информации

Fig. 1. Structure of the Classifier of construction information

UniFormat — стандарт классификации строительных спецификаций, оценки стоимости и анализа затрат в США и Канаде, разработанный на основе консенсуса между промышленностью и правительством. Содержит сметные стоимости строительства, которые позволяют рассчитать смету на этапе эскизного проектирования. Поскольку UniFormat организует элементы по их составным элементам, его модифицированная версия использовалась при разработке таблицы 21 OmniClass. Стандарт основывается на функциональных элементах или частях, не учитывая материалы и методы, используемые для их выполнения. Система может использоваться для обеспечения согласованности в экономической оценке строительных проектов. UniFormat вмещает основные категории строительной информации, разделенные по их специальному назначению. Эти функции включают девять категорий на пяти иерархических уровнях. Он включает девять категорий на уровне 1: А — основание; В — оболочка; С — интерьеры; D — услуги; Е — оборудование и мебель; F — специальное строительство и снос; G — работы на стройплощадке и Z — общий [4].

MasterFormat 2016 — стандарт организации спецификаций и другой письменной информации для коммерческих и институциональных строительных проектов в США и Канаде. Основное использование стандарта заключалось в организации торгов и контрактных требований, спецификаций и информации о продукте. Его первоначальная цель заключалась в организации руководства по проекту, а затем его начали использовать для классификации моделей продуктов и другой технической информации. Каждый номер и название MasterFormat определяет «раздел», организованный по «уровням». Основные наборы связанных строительных продуктов и видов деятельности представляют собой заголовки или «подразделения» первого уровня. Каждый раздел состоит из номеров и названий второго, третьего и часто четвертого уровня, которые постепенно определяют более подробные области. Эти номера и названия намеренно структурированы для ожидаемого роста и расширения в будущем CSI, организованной в 50 подразделениях [4, 5].

OmniClass — аналоговый классификатор UniClass в США и Канаде, включающий MasterFormat и UniFormat. Состоит из 15 таблиц, представляющих собой определенную область строительной информации. Табл. 21–23 классифицируют результаты строительства. Табл. 21 (Элементы) основана на UniFormat, табл. 22 (Результаты работы) основана на MasterFormat. В каждой таблице представлены коды для классификации определенного типа информации. Эти таблицы позволяют классифицировать изделия как чистое изделие в таблице «Продукты», по их функциональному назначению в таблице «Элементы» и по результатам работ или практике строительства в таблице «Результаты работ». Комби-

нация этих таблиц в комплексном подходе обеспечивает возможность точной классификации продукта и его функции. Запись кодов производится посредством комбинации цифр и знаков [4, 5].

UniClass 2015 — классификатор, разработанный Великобританией, обеспечивающий комплексную систему, пригодную для использования всей отраслью, включая инфраструктуру, ландшафтные и инженерные службы, а также строительный сектор и для всех этапов жизненного цикла проекта. Первоначально выпущенный в 1997 г., Uniclass позволял структурировать проектную информацию в соответствии с общепризнанными стандартами. Эта исходная версия была значительно переработана, чтобы сделать ее более подходящей для использования в современной строительной отрасли и сделать ее совместимой с BIM сейчас и в будущем. Uniclass 2015 был тщательно структурирован в соответствии с ISO 12006. Состоит из 12 таблиц, представляющих собой определенную область строительной информации (Activities, Complexes, Entities, Spaces/Locations, Elements/Functions, Systems, Products, Tools and Equipment, Project Management, Form of information, Roles, CAD). Запись кодов производится посредством комбинации цифр, букв и знаков [4–7].

CoClass — шведская цифровая система классификации, основанная на ISO 12006-2:2015/IEC CD 81346. Разрабатывалась изначально в целях снижения расходов строительства из-за ненадлежащего качества коммуникаций между участниками строительного процесса на всех этапах жизненного цикла объекта от самых ранних стадий до технического обслуживания, эксплуатации и сноса [4].

Система CCS (Cuneco Classification System) — датская система классификации, пришедшая на смену устаревшему DBK. Классификационная система CCS во многом схожа со шведской классификационной системой CoClass, включая форму представления. Содержание и структура CCS также не имеют классического представления посредством бумажного носителя или электронных таблиц, доступ к содержанию классификатора возможен через специализированный web-сервис или API. Внутренняя структура КС формируется посредством шести основных категорий информации (Use of Construction Entities, Elements, Construction Aids, Construction Agents, Construction Product и Use of Spaces), каждая из которых представлена соответствующими таблицами (одной и более). При разработке КС организация CCS Cuneco руководствовалась положениями международного стандарта ISO 12006-2:2015 [4, 5].

Система классификации Talo 2000 — это финская национальная система, созданная в сотрудничестве между различными участниками строительной отрасли, формирующая основу для обмена информацией о строительстве для всех сторон. Система включает название элемента конструкции или

здания и код, с помощью которого можно идентифицировать группу.

Целью исследования являлась оценка возможности применения существующих моделей машинного обучения для классификации строительной информации.

Задачи исследования:

1) обработка данных цифровых моделей для создания обучающей выборки для модели машинного обучения;

2) выбор наиболее качественной модели машинного обучения для классификации строительной информации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процесс классификации в проектной деятельности может быть организован следующими методами.

1. Ручной метод.

Внесение кодов в атрибут каждого элемента цифровых моделей отдельно. Web-платформа Bimaxon от компании AGACAD в свою очередь является инструментом ручного способа классификации через внесение кода для созданного атрибута. Подобные надстройки и приложения несут высокие временные затраты из-за обработки большого числа элементов в моделях вручную по сравнению с другими способами классификации.

2. Полуавтоматический метод:

- применение Dynamo и других сред визуального программирования;
- приложения для работы с атрибутами на основе сопоставления с таблицами.

Задаются признаки и правила по выбору элементов, после чего вносится атрибут с кодом элемента через скрипты, созданные в средах визуального программирования. Также существуют различные приложения по классификации, например Signal, в котором классификация производится по различным правилам или условиям посредством внесения кода в таблицы Excel, содержащие все элементы цифровой модели. Данный метод сокращает время внесения кодов по сравнению с ручным, но не отменяет проверки со стороны эксперта при подборе правил, для группирования и фильтрации элементов для присвоения кода.

3. Автоматический метод с помощью алгоритмов искусственного интеллекта.

Автоматический процесс классифицирования элементов цифровой модели — это самый эффективный по трудоемкости способ, который требует применения программных комплексов, основанных на методах машинного обучения [8–10]. Автоматический метод позволяет подобрать элементам соответствующий код посредством алгоритмов искусственного интеллекта, не прилагая усилия к фильтрации или отбору данных, в результате чего

присутствие человека необходимо только для валидации элементов с полученной классификацией.

На данный момент не существует программных комплексов, основанных на автоматическом методе классификации строительной информации. Однако классификационные системы широко используются среди других предметных областей, таких как нефтегазовая сфера, медицина, маркетинг, менеджмент [11], экономика, безопасность [12] и др. Подходы машинного обучения активно применяются для автоматической классификации и обнаружения аритмических заболеваний по сигналам ЭКГ [13], для распознавания лиц, походки, жестов [14], изображений [15], речи, а также для преобразования текста в голос и т.д. Методы машинного обучения позволяют обрабатывать, систематизировать, прогнозировать и классифицировать огромные массивы информации по определенным признакам и условиям, что в разы сокращает трудозатраты и повышает эффективность работы. Использование алгоритмов искусственного интеллекта обеспечит упрощение классификации BIM-моделей объектов капитального строительства и позволит исключить ошибки при внесении кода.

Методы машинного обучения предполагают возможность обучения за счет использования решений множества сходных задач или уже обработанных данных, что позволяет обучать модель классификации и увеличивать точность прогнозирования, в случае если код, назначенный программой, определен неверно [10, 11]. Данный аспект является ключевым преимуществом при выборе способа и метода классификации строительной информации.

Существуют различные модели машинного обучения для задач классификации. Наиболее эффективные по соотношению затрат времени на обучение и качества предсказания являются: случайный лес (RF-Random Forest) [16], LightGBM [17], XGBoost [18, 19], CatBoost [20].

Случайный лес (RF-Random Forest) — это алгоритм, предложенный Лео Брейманом и Адель Катлер. Random Forest создает множество деревьев приятия решений для полученных данных и усредняет результаты предсказаний на основе случайной выборки при построении деревьев.

LightGBM (Light Gradient Boosting Machine) — бесплатная и с открытым исходным кодом распределенная платформа повышения градиента в машинном обучении, использующая древовидные алгоритмы обучения, первоначально разработанная Microsoft [21]. Она основана на алгоритмах дерева решений и используется для ранжирования, классификации и других задач машинного обучения. Обладает относительно других алгоритмов невысокой скоростью обучения, но достаточной точностью.

XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) — алгоритм машинного обучения, основанный на дереве принятия решений. XGBoost изначально стартовал как исследовательский проект Тяньцзы Чена

как часть сообщества распределенного глубинного машинного обучения. В последнее время приобрел большую популярность среди специалистов из-за высокой точности и скорости обучения.

CatBoost — открытая программная библиотека, разработанная компанией Яндекс и реализующая уникальный патентованный алгоритм построения моделей машинного обучения, использующий одну из оригинальных схем градиентного бустинга в виде ансамбля слабых предсказывающих моделей, которыми в основном являются деревья решений. У Microsoft LightGBM российская разработка выигрывает по качеству, что демонстрирует таблица тестов с общепринятыми в машинном обучении сравнениями.

В ходе исследования были выявлены следующие критерии выбора модели классификации.

1. Скорость предобработки.
2. Время обучения/переобучения.
3. F1-score (macro) — основная метрика точности предсказаний на несбалансированной выборке.

F1-score (macro) является показателем, характеризующим оценку точности модели классификации, среднее гармоническое взвешенное значение между значениями метрик «precision» и «recall»:

$$F1_{score(macro)} = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^Q \frac{2\text{Recall} \cdot \text{Precision}}{\text{Recall} + \text{Precision}}$$

Метрика «precision» показывает долю верно классифицированных объектов среди всех объектов, которые к этому классу отнес классификатор. «Recall» отображает долю верно классифицированных объектов класса к общему числу элементов этого класса [22].

Исходя из существующих решений, проводилось исследование с целью прогнозирования прибыльности новых клиентов с использованием древовидных моделей с градиентным повышением, в ходе которого на основе информации о покупателях сравнивались модели XGBoost, LightGBM, CatBoost. Было выявлено, что CatBoost по усредненным показателям

precision и recall опережал другие модели классификации, но точность предсказаний при использовании случайного леса была выше [23, 24] (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс обработки данных цифровых моделей для создания обучающей выборки начинался с разметки информационных моделей. В качестве исходных данных для машинного обучения была выбрана 101 цифровая информационная модель жилых и промышленных объектов. В ходе разметки данных было обработано и закодировано более 500 000 элементов различных дисциплин: архитектурные решения, конструктивные решения, инженерные решения и др. Элементы, в свою очередь, имели 7544 уникальных наименований — признаков, которые составляли обучающую выборку для модели машинного обучения.

Исследование основывалось на данных цифровых моделей, закодированных вручную по таблице 6 КСИ (компоненты модели). Данная таблица была выбрана в связи с тем, что она содержит те же самые типы объектов, с которыми работает проектировщик при разработке BIM-модели.

До начала обучения модели ИИ необходимо было подготовить и отфильтровать данные, представляющие собой дубликаты или ненужные с точки зрения информативности и идентификации признаки элементов. Вследствие отсутствия структуры в признаках объектов было произведено маппирование (смысловое объединение признаков) и следующие действия:

- удалены признаки, написанные на отличном от русского и английского языков;
- удалены пустые столбцы или столбцы со значениями ‘*<unnamed>*’, ‘*other*’, ‘*-*’ и ‘*notdefined*’;
- удалены все признаки, не имеющие маппирования;
- удалены числовые идентификаторы из отдельных столбцов (например, в столбце ‘имя’ в конце строки часто встречается ‘*<tag>*’ или ‘*(<tag>)*’, что искусственно вносит уникальность в каждое значение).

Табл. 1. Результаты сравнения моделей на основе информации о покупателях

Table 1. Results of the model comparison based on the customer information

Модель Model	XGBoost	LightGBM	CatBoost	RF
Доля верно классифицированных объектов Avg_precision	0,68	0,68	0,69	0,77
Доля верно классифицированных объектов класса к общему числу элементов этого класса Avg_recall	0,53	0,53	0,56	0,53

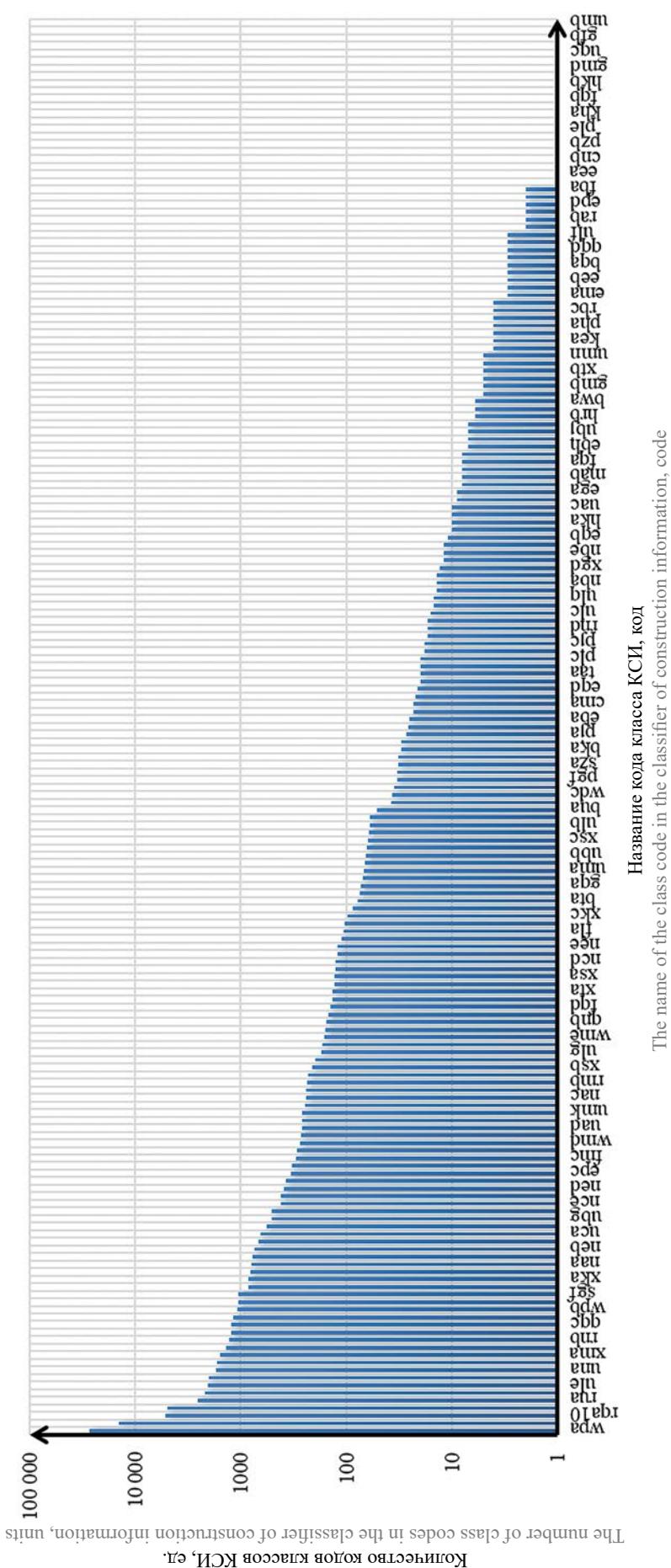
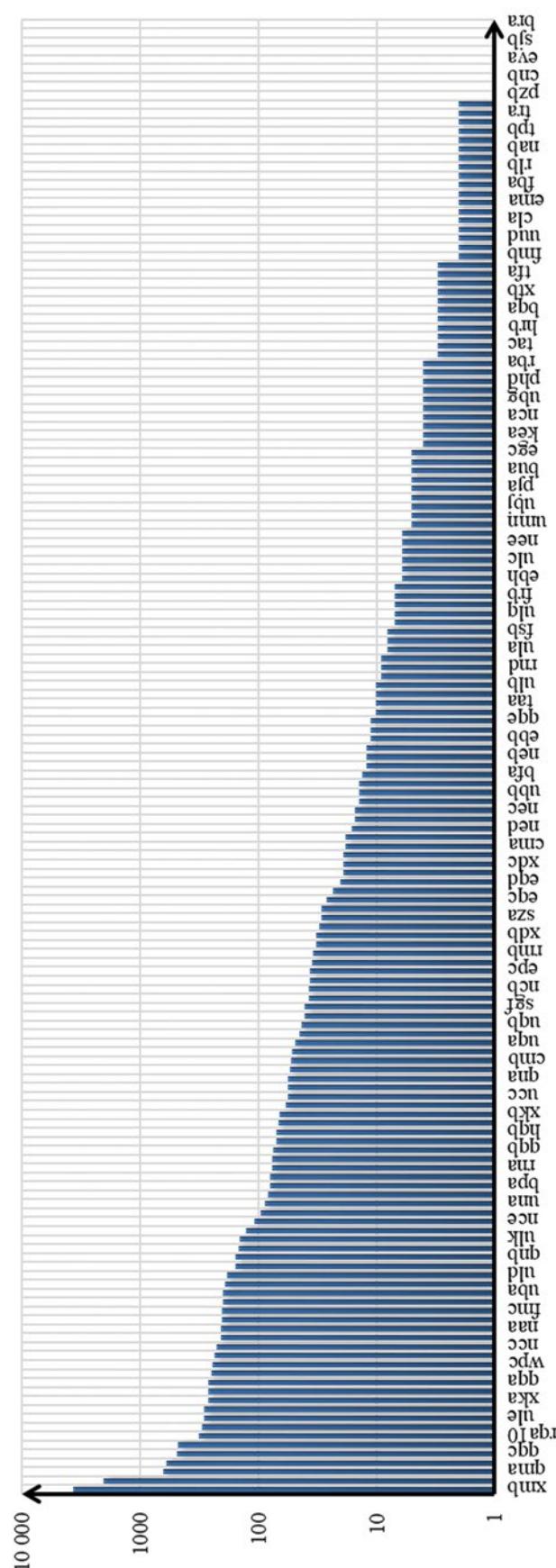


Рис. 2. График распределения числа методов отбора признаков



Также были удалены признаки с общим количеством элементов менее 30, которые не учитывались при классификации (рис. 2, 3).

Из рис. 2 видно, что код класса «wra» (труба) в соответствии с КСИ чаще всего используется при классификации (26 847 ед.), при этом количество отметок использования классов ранжируется от 1 до 26 847.

Из рис. 3 видно, что после отбора признаков код класса «xmb» (фитинг трубы) является самым многочисленным (26 847 ед.), при этом количество отметок ранжируется от 1 до 3643. В результате отбора количество классов сократилось в 7,34 раза (рис. 1, 2).

В результате частоты заполнения (рис. 4) были отобраны наиболее значимые признаки, которые будут в первую очередь учитываться при классификации цифровых моделей: имя, класс, тип, материал, категория, вид, наименование системы, описание, марка, отметка уровня базовой точки.

На следующем этапе проводилось сравнение моделей классификации на ранее обработанных данных со следующими параметрами:

- сбалансированная выборка для 60 классов;
- из каждого класса определялось по 30 элементов;
- соотношение размеров обучающей выборки к тестовой 3:1;
- для RF — 100 деревьев, максимальная глубина — 20;
- XGBoost, LightGBM, CatBoost — 1000 итераций, максимальная глубина — 5.

По проведенным исследованиям модель «случайный лес» показала более высокие результаты, указав точность 0,9, F1-score = 0,85 и скорость обучения/переобучения не более 5 сек. (табл. 2).

На основе полученных показателей в качестве модели машинного обучения была принята модель случайного леса (RF) и проведено обучение модели на основе обработанных данных. С целью апробации модели было выполнено несколько вариантов тестирования с использованием разных наборов признаков.

При установке минимального значения в 30 элементов обучение возможно на 64 классах, чему

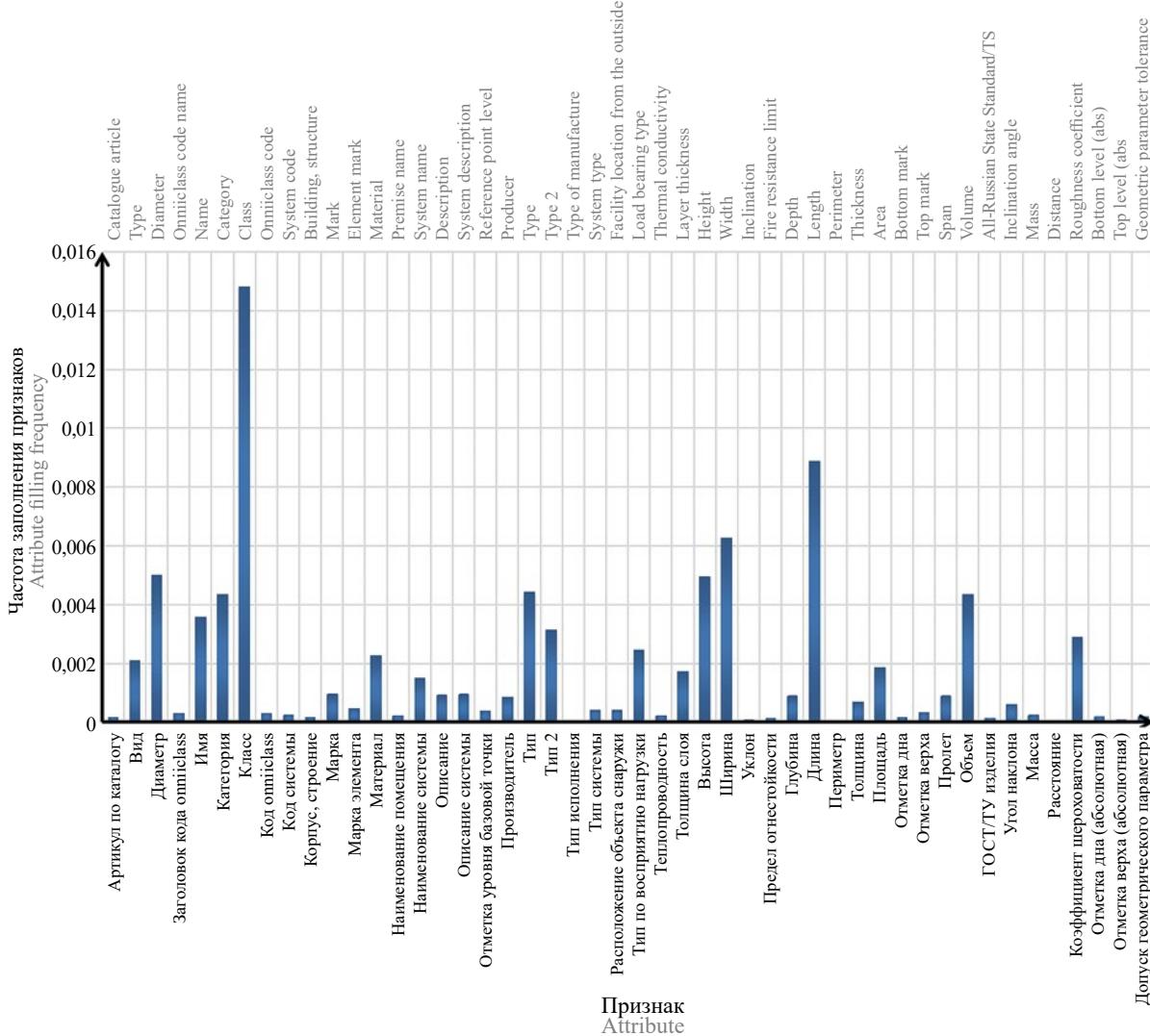


Табл. 2. Результаты сравнения моделей на обработанных данных

Table 2. Results of comparison of models obtained using processed data

Модель Model	RF	XGBoost	LightGBM	CatBoost
Точность Accuracy	0,90	0,73	0,89	0,88
F1-score (macro)	0,85	0,69	0,82	0,82

соответствует 14 931 строки. В этом случае размер обучающей выборки составлял 1440 строк (после выбора случайных 30 для каждого класса и взятия 3/4 от всех признаков), размер простой тестовой выборки — 480 строк, а размер выборки для последних двух столбцов — 13 491, что в 9,37 раз больше обучающей выборки (табл. 3).

При установке минимального значения в 40 элементов возможно обучение на 55 классах, чему соответствует 14 622 строки. Размер обучающей выборки составил 1650 строк (после выбора

случайных 40 для каждого класса и взятия 3/4), размер простой тестовой выборки составил 550 строк, а размер выборки для последних двух столбцов 12 972, что в 7,86 раз больше обучающей выборки (табл. 4).

При установке минимального значения в 50 элементов возможно обучение на 50 классах, чему соответствует 14 407 строки. Размер обучающей выборки составил 1875 строк (после выбора случайных 50 для каждого класса и взятия 3/4), размер простой тестовой выборки 625 строк, а размер

Табл. 3. Результаты, показанные моделью RF на 3 запусках. Вариант 1

Table 3. Results shown by the RF model using 3 runs. Option 1

Точность во время обучения Accuracy during training	Точность на тестовой выборке (четверть от выборки по 30 элементов) Accuracy using test set (quarter of the sampling of 30 items)	F1 (macro) на тестовой выборке (четверть от выборки по 30 элементов) F1 (macro) obtained using the test set (quarter of the sampling of 30 elements)	Точность на выборке на 64 классах с исключением обучающей (т.е. набор, в несколько раз больший, чем обучающая выборка) Accuracy obtained using the test set of 64 classes except for the teaching set (i.e. the set is several times larger than the teaching set)	F1 (macro) на выборке на 64 классах с исключением обучающей (т.е. набор, в несколько раз больший, чем обучающая выборка) F1 (macro) obtained using the sampling of 64 classes except for the teaching set (i.e. the set is several times larger than the teaching set)
0,95	0,85	0,85	0,85	0,78
0,95	0,86	0,86	0,86	0,77
0,96	0,86	0,86	0,86	0,78

Табл. 4. Результаты, показанные моделью RF на 3 запусках. Вариант 2

Table 4. Results shown by the RF model using 3 runs. Option 2

Точность во время обучения Accuracy during training	Точность на тестовой выборке (четверть от выборки по 40 элементов) Accuracy using test set (quarter of the sampling of 40 items)	F1 (macro) на тестовой выборке (четверть от выборки по 40 элементов) F1 (macro) obtained using the test set (quarter of the sampling of 40 elements)	Точность на выборке на 55 классах с исключением обучающей (т.е. набор, в несколько раз больший, чем обучающая выборка) Accuracy obtained using the test set of 55 classes except for the teaching set (i.e. the set is several times larger than the teaching set)	F1 (macro) на выборке на 55 классах с исключением обучающей (т.е. набор, в несколько раз больший, чем обучающая выборка) F1 (macro) obtained using the sampling of 55 classes except for the teaching set (i.e. the set is several times larger than the teaching set)
0,96	0,89	0,89	0,90	0,84
0,96	0,85	0,85	0,88	0,81
0,96	0,87	0,87	0,89	0,81

выборки для последних двух столбцов 12 532, что в 6,68 раз больше обучающей выборки (табл. 5).

Обучение на несбалансированной выборке на 64, 55 и 69 (тех, где 20 и больше элементов) классах и соотношении обучающей к тестовой 3:1 дает следующий результат, представленный в табл. 5–7 соответственно.

В соответствии с данными табл. 6–8, модель, обученная на несбалансированных данных, по-

казывает лучший результат (точность на тестовой выборке в среднем = 0,96, F1 (macro) на тестовой выборке = 0,9). При возрастании элементов в классе увеличивается вариативность классов, при этом при низкой доле встречаемости элементов с высокой вариативностью обнаружить их в достаточной мере не удается, следовательно, при больших количествах строк в данных одного класса необходимо большее число данных для обучения.

Табл. 5. Результаты, показанные моделью RF на 3 запусках. Вариант 3

Table 5. Results shown by the RF model using 3 runs. Option 3

Точность во время обучения Accuracy during training	Точность на тестовой выборке (четверть от выборки по 50 элементов) Accuracy on the test sample (a quarter of the sample of 50 items)	F1 (macro) на тестовой выборке (четверть от выборки по 50 элементов) F1 (macro) on a test sample (a quarter of the sample of 50 elements)	Точность на выборке на 50 классов с исключением обучающей (т.е. набор, в несколько раз больший, чем обучающая выборка) Accuracy on a sample of 50 classes with the exception of the training one (i.e. the set is several times larger than the training sample)	F1 (macro) на выборке на 50 классов с исключением обучающей (т.е. набор, в несколько раз больший, чем обучающая выборка) F1 (macro) on a sample of 50 classes with the exception of the training one (i.e. the set is several times larger than the training sample)
0,96	0,88	0,88	0,89	0,83
0,96	0,90	0,90	0,89	0,84
0,96	0,89	0,88	0,88	0,83

Табл. 6. Результаты трех запусков без отбора сбалансированной выборки на 64 классах

Table 6. Results of three runs without the balanced sampling for 64 classes

Точность во время обучения Accuracy during training	Точность на тестовой выборке Accuracy of the test sampling	F1 (macro) на тестовой выборке F1 (macro) using the test sampling
0,98	0,96	0,91
0,98	0,96	0,91
0,98	0,95	0,90

Табл. 7. Результаты трех запусков без отбора сбалансированной выборки на 55 классах

Table 7. Results of three runs without the balanced sampling of 55 classes

Точность во время обучения Accuracy during training	Точность на тестовой выборке Accuracy using the test sampling	F1 (macro) на тестовой выборке F1 (macro) using the test sampling
0,98	0,96	0,92
0,98	0,97	0,93
0,98	0,96	0,92

Табл. 8. Результаты трех запусков без отбора сбалансированной выборки на 69 классах

Table 8. Results of three runs without the balanced sampling of 69 classes

Точность во время обучения Accuracy during training	Точность на тестовой выборке Accuracy using the test sampling	F1 (macro) на тестовой выборке F1 (macro) using the test sampling
0,98	0,96	0,89
0,98	0,96	0,90
0,98	0,95	0,89

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований сформирована обучающая выборка, состоящая из 7544 уникальных признаков элементов цифровых информационных моделей гражданских и промышленных объектов. Получен численный сравнительный анализ моделей классификации, в результате которого случайный лес имел самые высокие показатели: среднюю точность, равную 0,9, F1-score = 0,9. Для LightGBM точность, равную 0,73, F1-score = 0,69, для XGBoost точность, равную 0,89, F1-score = 0,82, для CatBoost = 0,88, F1-score = 0,82. Более сложные модели ИИ (нейронные сети и др.) не рассматривались ввиду относительно малого размера обучающей выборки и потенциально высокой алгоритмической

сложности при подходе активного обучения. Вместе с тем в обучающей выборке не производилась аугментация, что может дать дополнительные наборы обучающих данных, и подобные модели могут быть следующим шагом для внедрения такого подхода.

Модель случайный лес рекомендуется для применения в качестве основной модели классификации строительной информации. Случайный лес обучен на несбалансированных данных и протестирован на данных с различными признаками. Модель классификации, реализующая автоматический метод внесения кодов, может быть рассмотрена как помощник в принятии быстрых решений в виде предсказанных значений, что приведет к существенной оптимизации сроков выполнения классификации и эффективности работ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Solihin W., Eastman C. Classification of rules for automated BIM rule checking development // Automation in Construction. 2015. Vol. 53. Pp. 69–82. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.03.003
2. Волкодав В.А., Волкодав И.А. Разработка структуры и состава классификатора строительной информации для применения BIM-технологий // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 867–906. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906
3. Тимченко В.С., Волкодав В.А., Волкодав И.А., Тимченко О.В., Осипов Н.А. Разработка элементов классификатора строительной информации для создания и ведения информационных моделей объектов капитального строительства в части процессов проектирования, управления строительными процессами и строительной информации // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 926–954. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.926-954
4. Afsari Kereshmeh, Eastman Charles. A Comparison of Construction Classification Systems Used for Classifying Building Product Models // Conference: 52nd ASC Annual International Conference Proceedings. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.20388.27529/
5. Lou E.C.W., Goulding J.S. Building and construction classification systems // Architectural Engineering and Design Management. 2008. Vol. 4. No. 3–4. С. 206–220. DOI: 10.3763/aedm.2008.0079
6. Pupelis D., Navickas A.A., Klumbyte E., Se-duikyte L. Comparative Study of Construction Information Classification Systems: CCI versus Uniclass 2015 // Buildings. 2022. No. 12. P. 656. DOI: 10.3390/buildings12050656
7. Gelder J. Uniclass 2015 for Smart Cities // Proceedings of the International Conference of Architectural Science Association. Auckland, New Zealand : Architectural Science Association. 2020. Pp. 1303–1312. DOI: 10.1109/ISDA.2010.5687087
8. Owoyele O., Pal P. A novel active optimization approach for rapid and efficient design space exploration using ensemble machine learning // The 2019 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. Chicago, IL. 2019. DOI: 10.1115/ICEF2019-7237
9. Колчин В.Н. Специфика применения технологии «искусственного интеллекта» в строительстве // Инновации и инвестиции. 2022. № 3. URL: petsifikasi-primeneniya-tehnologii-iskusstvennogo-intellekta-v-stroitelstve.
10. Черкасов Д.Ю., Иванов В.В. Машинное обучение // Наука, техника и образование. 2018. № 5 (46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mashinnoe-obuchenie>
11. Асаял В.В., Петухов М.В., Пономарев Н.К., Никулин А.А. Применение искусственного интеллекта в менеджменте строительной отрасли // Финансовые рынки и банки. 2022. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenie-iskusstvennogo-intellekta-v-menedzhmente-stroitelnoy-otrasli>
12. Diaa Salama AbdElminaam, Andrew Gamal Fahmy, Youssef Mohamed Ali, Omar Ahmed Diaa El-Din, Ahmed Raouf aly, Mahmoud Heidar. DeepECG: Building an Efficient Framework for Automatic Arrhythmia classification model // 2022 2nd International Mobile, Intelligent, and Ubiquitous Computing Conference (MIUCC). 2022. Pp. 203–209. DOI: 10.1109/MIUCC55081.2022.9781646
13. Claudio Filipi Gonçalves dos Santos, Diego de Souza Oliveira, Leandro A. Passos, Rafael Gonçalves Pires, Daniel Felipe Silva Santos, Lucas Pascotti Valem et al. Gait Recognition Based on Deep Learning: A Survey // ACM Comput. Surv. 55, 2. Article 34, March 2023. P. 34. DOI: 10.1145/3490235
14. Krizhevsky A.S., Hinton I., Geoffrey E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks (2012) // Advances in Neural Information Processing Systems, 2. 2021. Pp. 1097–1105.

15. Zhao H., Li X., Cheng H., Zhang J., Wang Q., Zhu H. Deep learning-based prediction of traffic accidents risk for Internet of vehicles // *China Communications*. 2022. Vol. 19. No. 2. Pp. 214–224. DOI: 10.23919/JCC.2022.02.017
16. Rai B. Feature Selection and Predictive Modeling of Housing Data Using Random Forest // *World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index* 124, *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2017. Vol. 11. Issue 4. Pp. 940–944. DOI: 10.5281/zenodo.1130301
17. Machado M.R., Karray S., de Sousa, I.T. LightGBM: an Effective Decision Tree Gradient Boosting Method to Predict Customer Loyalty in the Finance Industry // *14th International Conference on Computer Science Education (ICCSE)*. 2019. Pp. 1111–1116. DOI: 10.1109/ICCSE.2019.8845529
18. Tianqi Chen, Carlos Guestrin. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // *The 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16)*. Association for Computing Machinery. New York. 2016. Pp. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785
19. Liu X., Wang T. Application of XGBOOST model on potential 5G mobile users forecast // *Lect Notes Electr Eng.* 2023. Vol. 917. Pp. 1492–500. DOI: 10.1007/978-981-19-3387-5_177
20. Catboost. URL: https://catboost.ai/en/docs/concepts/python-reference_catboostclassifier
21. Kopitar L., Kocbek P., Cilar L. Early detection of type 2 diabetes mellitus using machine learning-based prediction models // *Sci Rep* 10, 11981. 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-68771-z
22. Goutte C., Gaussier E. A Probabilistic Interpretation of Precision, Recall and F-Score, with Implication for Evaluation // D.E. Losada & J.M. Fernández-Luna (Eds.), *Advances in Information Retrieval*. 2005. Pp. 345–359. DOI: 10.1007/978-3-540-31865-1_25
23. Al Daoud E. Comparison between XGBoost, LightGBM and CatBoost using a home credit dataset // *International Journal of Computer and Information Engineering*. 2019. Vol. 13. No. 1. Pp. 6–10. DOI: 10.5281/zenodo.3607805
24. Kinnander M. Predicting profitability of new customers using gradient boosting tree models: Evaluating the predictive capabilities of the XGBoost, LightGBM and CatBoost algorithms. 2020. URL: <mash/get/diva2:1476112/FULLTEXT01.pdf>

Поступила в редакцию 18 августа 2022 г.

Принята в доработанном виде 8 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 8 ноября 2022 г.

О б а в т о р а х : **Марина Вячеславовна Петроченко** — кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 6869-0011, Scopus: 56233437400, ORCID: 0000-0002-4865-5319; petrochenko_mv@spbstu.ru;

Павел Никитич Недвига — магистр, ассистент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; ORCID: 0000-0003-0857-8301; pavel.nedviga@gmail.ru;

Анна Алексеевна Кукина — старший преподаватель Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 9190-9276, Scopus: 57224191176, ORCID: 0000-0003-4271-7408; kukina_aa@spbstu.ru;

Валерия Виталиевна Шерстюк — магистрант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 1047-2485, ORCID: 0000-0002-5644-5629; sherstyuk2.vv@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Solihin W., Eastman C. Classification of rules for automated BIM rule checking development. *Automation in Construction*. 2015; 53:69–82. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.03.003
2. Volkodav V.A., Volkodav I.A. Development of the structure and composition of a building information classifier towards the application of BIM technologies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):867–906. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906 (rus.).
3. Timchenko V.S., Volkodav V.A., Volkodav I.A., Timchenko O.V., Osipov N.A. Development of building information classifier elements to create and maintain information models of capital construction objects in terms

- of design processes, construction process management and construction information. *Vestnik MGСU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(7):926-954. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.926-954 (rus.).
4. Afsari Kereshmeh, Eastman Charles. A Comparison of Construction Classification Systems Used for Classifying Building Product Models. *Conference: 52nd ASC Annual International Conference Proceedings*. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.20388.27529/
5. Lou E.C.W., Goulding J.S. Building and construction classification systems. *Architectural Engineering and Design Management*. 2008; 4(3-4):206-220. DOI: 10.3763/aedm.2008.0079
6. Pupeikis D., Navickas A.A., Klumbyte E., Seduikyte L. Comparative Study of Construction Information Classification Systems: CCI versus Uniclass 2015. *Buildings*. 2022; 12:656. DOI: 10.3390/buildings12050656
7. Gelder J. Uniclass 2015 for Smart Cities. *Proceedings of the International Conference of Architectural Science Association*. Auckland, New Zealand, Architectural Science Association, 2020; 1303-1312. DOI: 10.1109/ISDA.2010.5687087
8. Owoyele O., Pal P. A novel active optimization approach for rapid and efficient design space exploration using ensemble machine learning. *The 2019 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*. Chicago, IL. 2019. DOI: 10.1115/ICEF2019-7237
9. Kolchin V.N. Specifics of the use of “artificial intelligence” technology in construction. *Innovations and investments*. 2022; 3. URL: petsifika-primeneniya-tehnologii-iskusstvennogo-intellekta-v-stroitelstve (rus.).
10. Cherkasov D.Yu., Ivanov V.V. Machine learning. *Science, technology and education*. 2018; 5(46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mashinnoe-obuchenie> (rus.).
11. Asaul V.V., Petukhov M.V., Ponomarev N.K., Nikulin A.A. The use of artificial intelligence in the management of the construction industry. *Financial markets and banks*. 2022; 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenie-iskusstvennogo-intellekta-v-menedzhmente-stroitelnoy-otrasli> (rus.).
12. Diaa Salama AbdElminaam, Andrew Gamal Fahmy, Youssef Mohamed Ali, Omar Ahmed Diaa El-Din, Ahmed Raouf aly, Mahmoud Heidar. DeepECG: Building an Efficient Framework for Automatic Arrhythmia classification model. *2022 2nd International Mobile, Intelligent, and Ubiquitous Computing Conference (MIUCC)*. 2022; 203-209. DOI: 10.1109/MIUCC55081.2022.9781646
13. Claudio Filipi Gonçalves dos Santos, Diego de Souza Oliveira, Leandro A. Passos, Rafael Gonçalves Pires, Daniel Felipe Silva Santos, Lucas Pascotti Valem et al. Gait Recognition Based on Deep Learning: A Survey. *ACM Comput. Surv.* 55, 2. Article 34, March 2023; 34. DOI: <https://doi.org/10.1145/3490235>
14. Krizhevsky A.S., Hinton I., Geoffrey E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks (2012). *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2. 2021; 1097-1105.
15. Zhao H., Li X., Cheng H., Zhang J., Wang Q., Zhu H. Deep learning-based prediction of traffic accidents risk for Internet of vehicles. *China Communications*. 2022; 19(2):214-224. DOI: 10.23919/JCC.2022.02.017
16. Rai B. Feature Selection and Predictive Modeling of Housing Data Using Random Forest. *World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 124, International Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2017; 11(4):940-944. DOI: 10.5281/zenodo.1130301
17. Machado M.R., Karray S., de Sousa I.T. LightGBM: an Effective Decision Tree Gradient Boosting Method to Predict Customer Loyalty in the Finance Industry. *14th International Conference on Computer Science Education (ICCSE)*. 2019; 1111-1116. DOI: 10.1109/ICCSE.2019.8845529
18. Tianqi Chen, Carlos Guestrin. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *The 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16)*. Association for Computing Machinery, New York, 2016; 785-794. DOI: 10.1145/2939672.2939785
19. Liu X., Wang T. Application of XGBOOST model on potential 5G mobile users forecast. *Lect Notes Electr Eng.* 2023; 917:1492-500. DOI: 10.1007/978-981-19-3387-5_177
20. Catboost. URL: https://catboost.ai/en/docs/concepts/python-reference_catboostclassifier
21. Kopitar L., Kocbek P., Cilar L. Early detection of type 2 diabetes mellitus using machine learning-based prediction models. *Sci Rep 10, 11981*. 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-68771-z
22. Goutte C., Gaussier E. A Probabilistic Interpretation of Precision, Recall and F-Score, with Implication for Evaluation. *D.E. Losada & J.M. Fernández-Luna (Eds.), Advances in Information Retrieval*. 2005; 345-359. DOI: 10.1007/978-3-540-31865-1_25
23. Al Daoud E. Comparison between XGBoost, LightGBM and CatBoost using a home credit dataset. *International Journal of Computer and Information Engineering*. 2019; 13(1):6-10. DOI: 10.5281/zenodo.3607805
24. Kinnander M. Predicting profitability of new customers using gradient boosting tree models: Evaluating the predictive capabilities of the XGBoost, LightGBM and CatBoost algorithms. 2020. URL: <mash/get/diva2:1476112/FULLTEXT01.pdf>

Received August 18, 2022.

Adopted in revised form on November 8, 2022.

Approved for publication on November 8, 2022.

BIO NOTES: **Marina V. Petrochenko** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Graduate School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 6869-0011, Scopus: 56233437400, ORCID: 0000-0002-4865-5319; petrochenko_mv@spbstu.ru;

Pavel N. Nedviga — Master, Assistant of Graduate School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0857-8301; pavel.nedviga@gmail.ru;

Anna A. Kukina — Senior Lecturer of Graduate School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 9190-9276, Scopus: 57224191176, ORCID: 0000-0003-4271-7408; kukina_aa@spbstu.ru;

Valeria V. Sherstyuk — Graduate Student of Graduate School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 1047-2485, ORCID: 0000-0002-5644-5629; sherstyuk2.vv@yandex.ru.

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

The authors declare that they have no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 536.212.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1551-1563

Совершенствование технологии получения пеностекла на основе методов сетевого моделирования

Сергей Викторович Федосов^{1,2}, Максим Олегович Баканов³

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

² Поволжский государственный технический университет; г. Йошкар-Ола, Россия;

³ Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается применение метода сетевого планирования в процессе моделирования последовательно реализующихся технологических операций и отдельных стадий технологии пеностекла. Преимущества технологии — простота применения, доступность и логичность. Доказана целесообразность внедрения метода как в бизнес-процессы, так и при обеспечении работы отраслей народного хозяйства.

Материалы и методы. Технологический процесс производства пеностекла приведен в виде сетевого графика, который представляет собой специфический взвешенный граф. Исходным материалом для сетевого планирования служит перечень технологических операций с указанием их последовательности в производственном цикле, который обусловлен возможностью начала одних технологических операций после завершения других, а также продолжительностью реализации каждой из них. При преобразовании операционных этапов применяли распределение Гаусса, которое задавали плотностью вероятностей, представляющей индикаторную функцию для методов сетевого планирования. При оценке параметров эффективности внедрения модели производили расчет D-функции Харрингтона.

Результаты. Показана результативность предлагаемых методов сетевого планирования и управления при производстве пеностекла. Экспериментально доказано повышение значения эффективности технологических операций на 10 % в процессе моделирования показателей теплового воздействия на пеностекло.

Выводы. Технологический процесс производства пеностекла включает набор операций, которые характеризуются временем их выполнения и последовательностью в производственном цикле, что позволяет произвести оценку каждой отдельной стадии с учетом затраченного временного параметра и объема выполненной работы на каждом участке, используя методы сетевого планирования. Корректировка оценочных показателей осуществления отдельных операций при модернизации сетевого графика способствует уменьшению общего времени технологического процесса производства пеностекла, что влияет на себестоимость готового материала. Количественной оценкой при использовании методов сетевого планирования и управления выступало время протекания всех стадий с заданными значениями вероятностей. В качестве показателя эффективности (качественной оценки) применения методов сетевого планирования применяли функцию желательности Харрингтона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пеностекло, методы сетевого планирования, функция Харрингтона, макрофизические параметры, термическая обработка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федосов С.В., Баканов М.О. Совершенствование технологии получения пеностекла на основе методов сетевого моделирования // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1551–1563. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1551-1563

Автор, ответственный за переписку: Максим Олегович Баканов, mask-13@mail.ru.

Using network modelling methods to improve the foam glass production technology

Sergej V. Fedosov^{1,2}, Maksim O. Bakanov³

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

² Volga State Technical University; Yoshkar-Ola, Russian Federation;

³ Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters; Ivanovo, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors applies the critical path method to the simulation of successive technological operations and individual foam glass technology stages. The strengths of the method are user friendliness, availability and consistency. The author proved the expediency of its introduction into business processes and branches of the national economy.

Materials and methods. The foam glass production process is presented as a project network schedule, which represents a weighted graph. The source material for this schedule is a list of technological operations, their sequence in the production process, which is conditioned by the feasibility of some operations upon the completion of others, and also by the time of their implementation. In the course of transformation of operational stages, the authors applied the Gauss distribution which was set by the probability density, representing an indicator function for network scheduling methods. Harrington's *D*-function was calculated to estimate the effectiveness of the model implementation.

Results. The effectiveness of the proposed network scheduling methods and foam glass production management is demonstrated. The author experimentally proved a 10 % rise in the efficiency of technological operations in the process of modeling the indicators of the thermal impact on foam glass.

Conclusions. The technological process of foam glass production includes a set of operations, characterized by their performance time and sequence in the production cycle, which allows using network scheduling methods to evaluate each individual stage taking into account the time spent and the amount of work performed at each stage. Any adjustment of estimated values of performance of separate operations in the course of modernization of a network schedule contributes to a reduction in the total time of foam glass production, which affects the cost of material. The quantitative evaluation was the time of all stages with pre-set values of probabilities. The Harrington's desirability function was used as an indicator of efficiency (qualitative evaluation) of network scheduling methods and their application.

KEYWORDS: foam glass, network scheduling methods, Harrington's function, macro-physical parameters, thermal treatment

FOR CITATION: Fedosov S.V., Bakanov M.O. Using network modelling methods to improve the foam glass production technology. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1551-1563. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1551-1563 (rus.).

Corresponding author: Maksim O. Bakanov, mask-13@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Реализация технологического процесса, как правило, сопряжена с большим количеством взаимосвязанных технологических операций, когда в работу вовлекается множество людей и процессов. В планировании и управлении сложными комплексами работ высокоэффективными оказались сетевые методы и модели на основе построения сетевых графиков [1]. Наиболее оправдано применение сетевых методик при организации работы крупных промышленных предприятий. Такой подход позволяет системно рассматривать все технологические процессы, оценивать их надежность и эффективность. Суть метода сетевого планирования и управления сводится к использованию системы методов графического и расчетного плана, а также способов и технологий контроля и оценки технологических операций, которые в совокупности позволяют составить общее представление о процессах и провести их анализ и моделирование.

Сетевой график — ключевое и системообразующее понятие метода сетевого планирования. Он представляет собой графическое изображение технологического процесса, совокупность составляющих его элементов и связей, возникающих между ними в процессе функционирования предприятия. Все технологические операции представляются наглядно и поэтапно, что дает возможность оценивать их как единое целое.

Сетевые графики применяются много лет на предприятиях различного масштаба и профиля деятельности. Анализ показал, что все сетевые модели могут быть классифицированы по их структуре и содержанию. Так, детерминированными считаются те модели, в которых последовательность и расположение элементов, а также длительность проведения шагов процесса четко определяются и заранее известны. В число таких моделей входят:

1. Метод сетевого графика [2].

2. Гистограмма/диаграмма Ганта — горизонтальная гистограмма на временной шкале, которая представляет план проекта (технологического процесса) во времени [3].

3. Линейка баланса (Line of balance — LOB) в технологии организации строительства используется как метод вертикального производства (Vertical production method — VPM). Это процесс управления, используемый при организации строительства, когда проект включает блоки повторяющихся видов работ (операций), таких как дороги, трубопроводы, туннели, железные дороги и высотные здания. LOB собирает, измеряет и представляет информацию, относящуюся ко времени, стоимости и завершению, и представляет ее по конкретному плану [4].

4. Линейные расписания (Linear scheduling — LS), адаптированные несколькими методами, среди которых модель линейного расписания (Linear scheduling model — LSM) [5].

На практике чаще всего применяются сетевые графики — CPM (Critical path method) и метод оценки и пересмотра планов — PERT (Program evaluation and review technique). Использование указанных методик в технологических процессах началось в 1950-е гг. XX в. [2]. При организации работы крупного промышленного предприятия они наиболее оправданы, поскольку обеспечивают оптимизацию и систематизацию управления сложными процессами. Результат применения методов — минимизация издержек при общем сокращении времени исполнения проекта.

Методы МКП/PERT также являются эффективными методами решения многих задач химической технологии [6, 7]. Например, в периодических химических процессах, где можно выразить несколько процессов как последовательность взаимосвязанных технологических операций, позволяют определить объем капитальных вложений для оптимизации планирования средств, где появляется возможность

определить стоимость технологического процесса, который может включать до 1000 операций. Также метод PERT можно применять к таким задачам планирования, как оценка и прогнозирование времени окончания химических процессов в случаях, когда временные параметры отдельных операций не определены. Вместе с тем проблемы, которые могут быть решены с помощью методов МКП/PERT, могут охватывать многие отрасли перерабатывающей промышленности, такие как сталелитейная, фармацевтическая, строительная и пищевая. Кроме того, методы МКП/PERT могут быть адаптированы к процессам организации строительства предприятий химической промышленности [8].

МКП также применяется как в строительных проектах [9], так и во всех проектах, в которых необходимо произвести оптимизацию временных параметров выполнения определенных операций и проекта в целом [10, 11]. Например, в США и Великобритании представленные методы нашли широкое применение при планировании и контроле выполнения работ и технологических операций [12, 13]. Методы МКП/PERT применяются во многих проектах и странах, таких как Финляндия и Бразилия, где они широко используются в качестве инструментов планирования и контроля производства [14, 15].

Применение сетевого планирования позволяет визуализировать производственные и технологические процессы, выстроить порядок выполнения работ, а также четко поставить цели и шаги для их достижения с минимальными затратами. Инструментами такого планирования становятся математические (сетевые) модели и графики. Они дают возможность построить четкий алгоритм проведения операций и достичь поставленных производством результатов.

Использование графиков упрощает работу руководителя как на этапе планирования работ, так и их осуществления. Такой способ позволяет представить наглядно конкретные операции, а также их взаимосвязь и результаты выполнения работы. Управление становится доступным и эффективным, а использование ресурсов — рациональным [16]. Практическое применение сетевого планирования находит отражение в следующих направлениях:

- строительно-монтажные работы в сфере возведения промышленных и бытовых объектов;
- ремонтные работы, а также реконструкция зданий и сооружений;
- научно-исследовательская и проектная деятельность в сфере машиностроения, требующая участия нескольких субъектов и выполнения сложных операций.

Методы сетевого планирования рассматриваются сегодня как наиболее прогрессивный и современный метод обеспечения работы производства, который предполагает рациональное использование трудовых и прочих ресурсов предприятия. Выгода

от применения данной методики выражается в виде снижения сроков сдачи продукции до 15–20 % [16].

Основные достоинства, принципы метода сетевого планирования, а также последовательность его реализации приведены на рис. 1.

Производство пеностекла представляет собой сложный технологический процесс, требующий поиска оптимальных механизмов его планирования и организации. Ключевыми свойствами данной производственной системы становятся надежность, устойчивость, точность, помехозащищенность. Использование их значений и показателей оправдано при организации рационального процесса управления предприятием и производственными процессами. При этом следует понимать, что результативность будет зависеть от десятков различных параметров и факторов, которые могут быть оценены путем применения к ним методов математических вероятностей [17]. Следовательно, можно говорить как о научной, так и практической значимости исследований в области оптимизации процессов производства пеностекла.

Моделирование последовательно реализующихся технологических операций в рассматриваемой отрасли производства предполагает поиск эффективных механизмов управления, в числе которых особенно выделяется метод сетевого планирования и управления (СПУ). Таким образом, целью исследования является разработка рациональных технологических режимов производства пеностекла с использованием методов СПУ с учетом влияния на стадии предпроектной подготовки результатов моделирования воздействия температуры на пеностекло. Также необходимо произвести качественную и количественную оценку модернизированных сетевых графиков процесса производства пеностекла с учетом корректированных временных параметров при моделировании процессов термической обработки пеностекла.

В рамках исследования ставились следующие задачи:

- определение признаков классификации общих этапов технологического процесса производства пеностекла в соответствии с операционными задачами;
- логико-математическое описание и формализация этапов технологического процесса производства пеностекла;
- определение показателей эффективности применения методов сетевого планирования при описании технологического процесса производства пеностекла.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — двухстадийный порошковый способ производства пеностекла. Процесс проведения эксперимента основывается на предположении о необходимости представления производственно-технологического процесса как совокупности взаимосвязанных стадий или этапов.

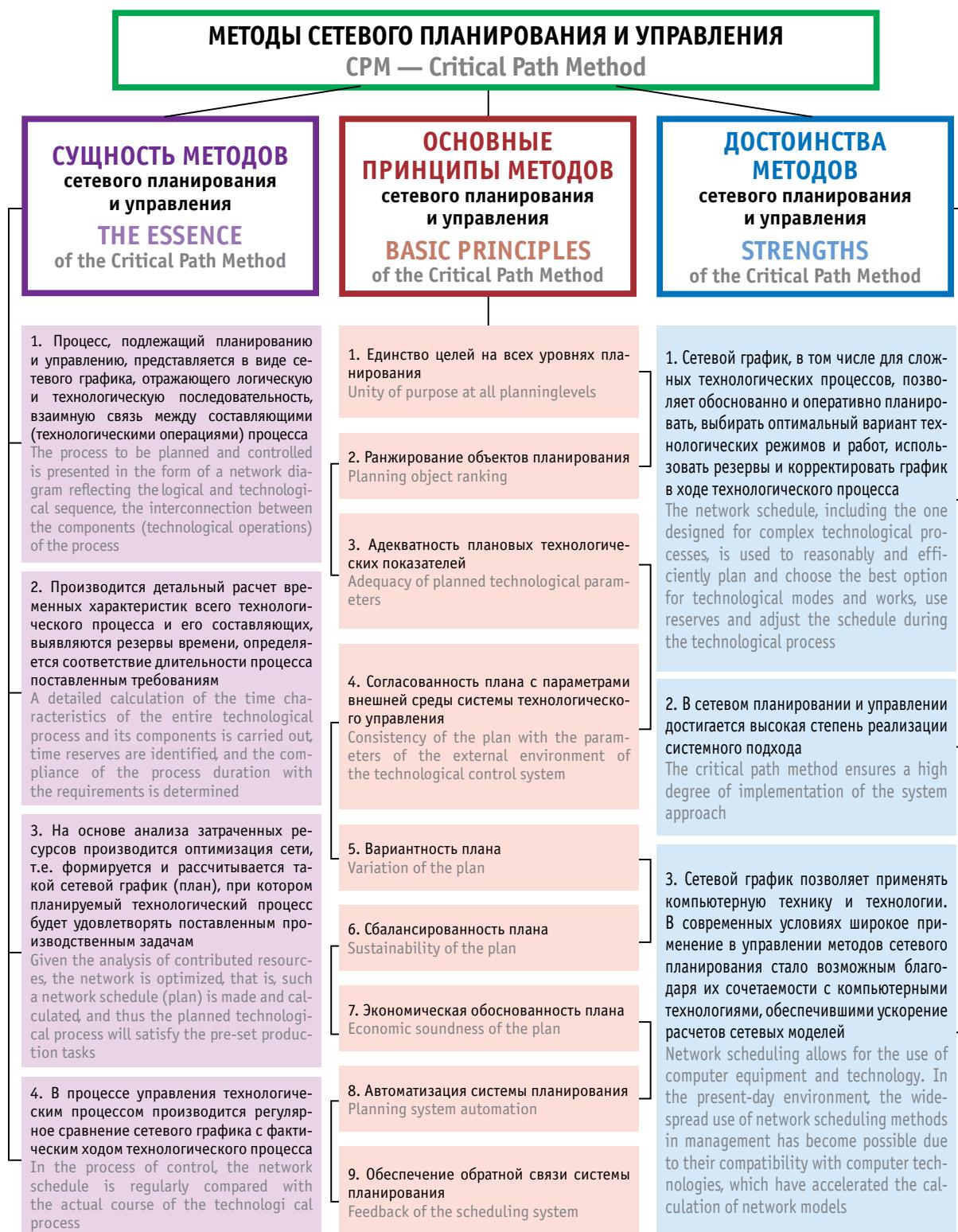


Рис. 1. Принципы, достоинства и сущность методов сетевого планирования и управления

Fig. 1. Principles, advantages and essence of network planning and management methods

Системообразующим фактором при этом становится общая операционная задача. В рамках данной работы выделяются следующие этапы данного процесса: проектирование технологического процесса; подготовка сырья; измельчение сырья; тепловая обработка пеностекла; подготовка готовой продукции (пено-

стекла). Следующий этап исследования предполагает разбивку указанных стадий на более мелкие с целью выделения алгоритмов их функционирования и определения присущих им закономерностей.

Формирование сетевой модели технологического процесса производства пеностекла осуществляется

ся по принципу применения метода математических параметров и их сопоставления на основании данных относительно роли каждого из этапов в получении единого результата [18]. Далее производится аналогичное изучение вклада параметров в процесс при классическом планировании.

В составе первой стадии подготовки сырья были выделены операции: сортировка стекла, мой-

ка стекла, сушка, измельчение стекла, тонкий помол стеклобоя. Время процесса определяли из расчета на производство 1 м³ пеностекла (табл. 1).

Подготовка сырья в рамках нашего исследования рассматривается в качестве совокупности этапов дозирования компонентов, помола пеностекольной шихты, их гомогенизации компонентов и засыпки в форму для вспенивания.

Табл. 1. Показатели сетевого графика технологии получения пеностекла

Table 1. Indicators of the network schedule for a foam glass production technology

Обозначение Designation	Виды операций Operation types	Шифр Code	Время, мин Time, min			$D(t)$, мин min
			t_{\min}	t_{\max}	$t_{\text{ср}}$	
A	Проектирование технологического процесса (классический метод) Technological process design (classical method)	1,2	180	240	204	144
B	Подготовка сырья Preparation of raw materials	2,8	107	184	137,8	52,76
C	Сортировка стекла Glass sorting	2,3	25	40	31	9
D	Мойка стекла Glass cleaning	3,4	15	30	21	9
E	Сушка стекла Glass drying	4,5	20	30	24	4
F	Измельчение стекла Glass crushing	5,6	12	24	16,8	5,76
G	Тонкий помол стеклобоя Fine grinding of glass cullet	6,7	35	60	45	25
H	Подготовка шихты для получения пеностекла Preparation of charge for foam glass production	8,12	92	160	119,2	74,96
I	Дозирование компонентов шихты Dosing of charge components	8,9	6	15	9,6	3,24
J	Помол пеностекольной шихты Grinding foam glass charge	9,10	80	120	96	64
K	Перемешивание (гомогенизация) компонентов шихты Mixing (homogenization) of charge components	10,11	3	15	7,8	5,76
L	Засыпка шихты в форму для вспенивания Filling charge into the mold for foaming	11,12	3	10	5,8	1,96
M	Тепловая обработка Thermal treatment	12,17	670	880	754	860
N	Нагрев шихты Heating of charge	12,13	45	75	57	36
O	Вспенивание Foaming	13,14	15	45	27	36
P	Порообразование Pore formation	14,15	30	40	34	4
Q	Отжиг Baking	15,16	580	720	636	784
R	Извлечение из форм Extraction from moulds	16,17	5	7	5,8	0,16
S	Опиловка готовой продукции Sawing of finished products	17,18	5	10	7	1

Табл. 2. Показатели модернизированного сетевого графика технологии получения пеностекла

Table 2. Indicators of the modernized network schedule for the foam glass production technology

Обозначение Designation	Виды операций Operation types	Шифр Code	Время, мин Time, min			$D(t)$, мин min
			t_{\min}	t_{\max}	t_{cp}	
A	Проектирование технологического процесса (математическое моделирование) Technological process design (classic method)	1,2	10	15	12	1
B	Подготовка сырья Preparation of raw materials	2,8	2,8	107	184	137,8
C	Сортировка стекла Glass sorting	2,3	2,3	25	40	31
D	Мойка стекла Glass cleaning	3,4	3,4	15	30	21
E	Сушка стекла Glass drying	4,5	4,5	20	30	24
F	Измельчение стекла Glass crushing	5,6	5,6	12	24	16,8
G	Тонкий помол стеклобоя Fine grinding of glass cullet	6,7	6,7	35	60	45
H	Подготовка шихты для получения пеностекла Preparation of charge for foam glass production	8,12	8,12	92	160	119,2
I	Дозирование компонентов шихты Dosing of charge components	8,9	8,9	6	15	9,6
J	Помол пеностекольной шихты Grinding of the foam glass charge	9,10	9,10	80	120	96
K	Перемешивание (гомогенизация) компонентов шихты Mixing (homogenization) of charge components	10,11	10,11	3	15	7,8
L	Засыпка шихты в форму для вспенивания Filling charge into the mold for foaming	11,12	11,12	3	10	5,8
M	Тепловая обработка Thermal treatment	12,17	12,17	670	880	754
N	Нагрев шихты Heating of charge	12,13	12,13	45	75	57
O	Вспенивание Foaming	13,14	13,14	15	45	27
P	Порообразование Pore formation	14,15	14,15	30	40	34
Q	Отжиг Baking	15,16	15,16	580	720	636
R	Извлечение из форм Extraction from moulds	16,17	16,17	5	7	5,8
S	Опиловка готовой продукции Sawing of finished products	17,18	17,18	5	10	7

На этапе тепловой обработки постепенно реализуются такие операции, как: нагрев шихты до температуры 800–850 °C; вспенивание при 800–850 °C; порообразование; отжиг до 30–40 °C. Завершается процесс изготовления пеностекла двумя операциями — извлечением продукции из форм и ее опиловкой [19–21].

Формирование сетевого графика процесса изготовления пеностекла в ходе термической обра-

ботки производится с учетом факторов, которые определяют закономерности протекания данного процесса. К ним относятся: единство этапов производства; система и последовательность реализации этапов производства; начало этапа только после окончания предыдущего; применение принципов, которые присущи в целом технологическому процессу стеклопроизводства. В зависимости от значения временного параметра устанавливаются две

пределные границы — пессимистическая (min) и оптимистическая (max). Среднее время выполнения также рассчитывается как на каждую отдельно взятую операцию, так и на этап технологического процесса в целом [22, 23].

Графически рабочий сетевой график технологического процесса, описанного выше, отображен на рис. 2. На рис. 3 представлен сетевой график технологии производства пеностекла с учетом расчета необходимых параметров процесса, а именно среднего времени операции t_{cp} и дисперсии времени выполнения операции $\sigma^2(t)$. На рис. 4 показан доработанный сетевой график технологии пеностекла с учетом применения моделирования. Исходные параметры для рабочего и модернизированного сетевого графика технологического процесса производства пеностекла даны в табл. 1, 2.

Для преобразования операционных этапов применяли распределение Гаусса, которое задавали плотностью вероятностей, представляющей собой индикаторную функцию для методов сетевого планирования [19, 20, 24].

Авторы публикации [25] указывали на аналогию между плотностью вероятности непрерывной случайной величины и функцией принадлежности. Исходя из этого, при реализации совокупности выполняемых операций, следует применять показательную функциональную зависимость:

$$\mu_i = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t_k - t_{icp})^2}{2(\sigma)^2}\right), \quad (1)$$

где t — текущее значение реализации технологической операции; $t_{\text{ср}}$ — среднее значение времени выполнения технологической операции $[t_{i_1}; t_{i_2}]$; σ — дисперсия времени выполнения технологической операции.

Введем обозначение:

$$T_{Ai} = \frac{(t_k - t_{icp})}{2\sigma^2} \text{ при } t_k \in [t_{i1}; t_{i2}]. \quad (2)$$

Следовательно, получаем функцию принадлежности для совокупности выполняемых операций:

$$\mu_{Ai} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-T_{Ai}), \quad (3)$$

где i — номер технологической операции.

Вместе с тем объективно от интервала значений $t_k \in [t_{i1}; t_{i2}]$ для состояния B_i реализовать переход к интервальным оценкам $t_{i\text{cp}}$ и σ . Исследуя технологию производства пеностекла по времени, следует исходить из данных средних значений времени выполнения различных операций и дисперсии времени их выполнения.

Обозначим t_k — время выполнения совокупности операций и зададим множество значений состояния процесса $B_i, i = 1, 2, \dots, n$, каждому из которых соответствуют оценочные значения времени операции $t_{i_{\text{ep}}}$ и σ . Получим, что в случае, если значение параметра операции t_k одновременно принадлежит двум смежным состояниям B_i и B_{i+1} , то для интервала значений параметра операции $t_k \in [t_{i_{\text{cp}}}, t_{i+1_{\text{cp}}}]$

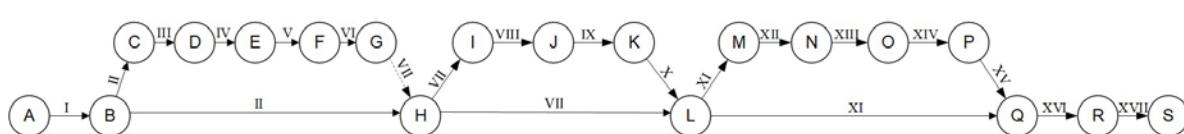


Рис. 2. Рабочий сетевой график технологии производства пеностекла

Fig. 2. Working network schedule for the foam glass production technology

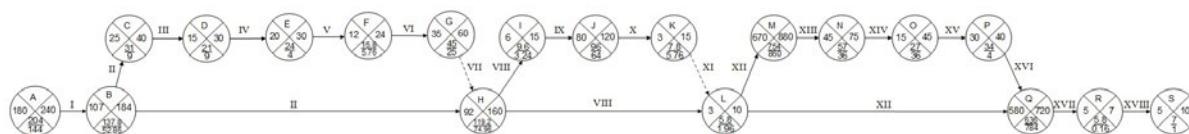


Рис. 3. Доработанный сетевой график технологии производства пеностекла

Fig. 3. Modified network schedule for the foam glass production technology

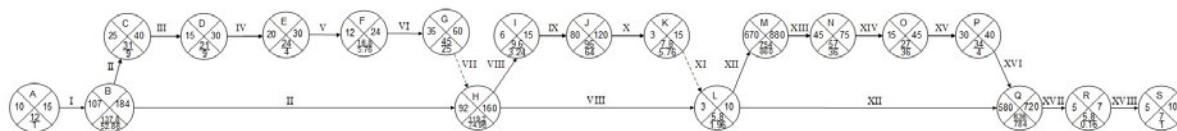


Рис. 4. Доработанный сетевой график технологии производства пеностекла с учетом применения моделирования

Fig. 4. Modified network schedule for the foam glass production technology, taking into account the application of modelling

справедливо сопоставить промежуточное состояние технологической операции [18]:

$$B_{i;i+1} = \frac{B_i}{1 + \frac{\sigma_i}{\sigma_{i+1}} \exp(T_i - T_{i+1})} + \frac{B_{i+1}}{1 + \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} \exp(T_{i+1} - T_i)}, \quad (4)$$

$$T_i = \frac{(t_k - t_{i;\text{cp}})}{2 \cdot \sigma_i^2}. \quad (5)$$

Оценим промежуточное состояние по формуле:

$$B_{i;i+1} = \frac{\mu_i B_i + \mu_{i+1} B_{i+1}}{\mu_i + \mu_{i+1}}, \quad (6)$$

$$\mu_i = \frac{1}{\sigma_i \cdot \sqrt{2\pi}} \exp(-T_i) \quad (7)$$

или

$$B_{i;i+1} = \frac{\frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp(-T_i) B_i + \frac{1}{\sigma_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-T_{i+1}) B_{i+1}}{\frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp(-T_i) + \frac{1}{\sigma_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-T_{i+1})}. \quad (8)$$

Проанализируем дроби и разделим их на несколько слагаемых:

$$I = \frac{\frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp(-T_i) B_i}{\frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp(-T_i) + \frac{1}{\sigma_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-T_{i+1})}, \quad (9)$$

получим:

$$II = \frac{\frac{1}{\sigma_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-T_{i+1}) B_{i+1}}{\frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp(-T_i) + \frac{1}{\sigma_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-T_{i+1})}. \quad (10)$$

Представим первое слагаемое в следующем виде:

$$I = \frac{\frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp(-T_i) B_i}{\frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp(-T_i) \left(1 + \frac{\sigma_i}{\sigma_{i+1}} \exp(-T_{i+1})\right)} = \frac{B_i}{1 + \frac{\sigma_i}{\sigma_{i+1}} \exp(T_i - T_{i+1})}. \quad (11)$$

То же и для второго слагаемого:

$$\begin{aligned} II &= \frac{\frac{1}{\sigma_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-T_{i+1}) B_{i+1}}{\frac{1}{\sigma_{i+1} \sqrt{2\pi}} \exp(-T_{i+1}) \left(1 + \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} \exp(T_i - T_{i+1})\right)} = \\ &= \frac{B_{i+1}}{1 + \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} \exp(T_{i+1} - T_i)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Получаем выражение:

$$\begin{aligned} B_{i;i+1} &= \frac{B_i}{1 + \frac{\sigma_i}{\sigma_{i+1}} \exp(T_i - T_{i+1})} + \\ &+ \frac{B_{i+1}}{1 + \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} \exp(T_{i+1} - T_i)}. \end{aligned} \quad (13)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 5 продемонстрированы плотности распределения времени выполнения операций исходного и модернизированного сетевого графика технологии производства пеностекла.

Таким образом, можно сделать следующее заключение относительно данных на рис. 4: несмотря на относительную стабильность значения временно-го фактора в процессе применения сетевого графика в производстве пеностекла, ярко выражена положительная динамика в рациональном распределении времени на выполнение отдельных технологических операций. В результате кривая среднего времени, характерная для применения метода сетевого планирования, смещена влево относительно кривой исходного сетевого графика. Указанные данные можно интерпретировать как количественное подтверждение отсутствия видимого и значительного влияния со стороны сетевых графиков на возможную неопре-

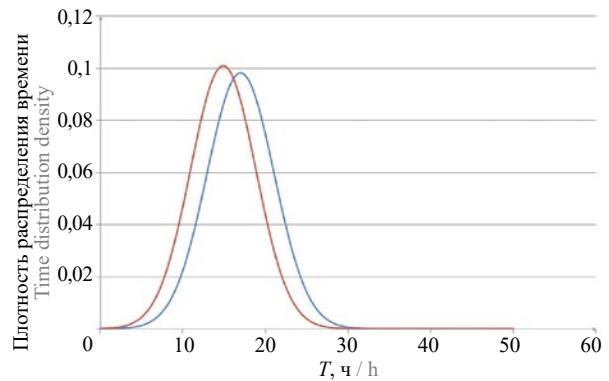


Рис. 5. Плотность распределения времени выполнения операций исходного и модернизированного сетевого графика технологии производства пеностекла

Fig. 5. The time distribution density in operations of the original and modernized network schedule for the foam glass production technology

деленность необходимого времени работы. Единственной стадией производственного процесса, которая оказалась в сильной зависимости от указанного параметра, стала непосредственно стадия внедрения математического моделирования физико-технических параметров конечного продукта. Следовательно, степень эффективности применения указанных методов планирования и управления на этапе «Проектирование технологического процесса» должна оцениваться дополнительно для получения объективных данных. Количественная оценка в данном случае будет выражена вероятностью отклонения распределения времени работ двух сетевых графиков. При оценке параметров эффективности внедрения модели производили расчет D -функции Харрингтона [26–28], на рис. 6 представлены границы интервалов интегральной функции распределения.

На основании суммарного времени осуществления технологического процесса на производстве могут быть сформулированы выводы относительно заданной вероятности и ее значений. В выбранной постановке задачи сетевого моделирования на основе статистики распределения времени отдельных операций можно заключить, что при достоверности 0,9 (наперед заданной вероятности) время реализации рассматриваемого цикла технологического процесса без применения результатов моделирования составит до 22,2 ч (см. рис. 6, синяя линия) и с применением результатов моделирования — до 19,9 ч. Отсюда можно сделать вывод, что время, необходимое для производства единицы продукции, снижается более чем на 10 %. Представленная характеристика (%) является количественной оценкой эффективности производства по критерию времени выполнения. Для качественной оценки применим D -функцию Харрингтона.

С целью построения общего показателя эффективности сетевого моделирования при совершенствовании производства следует применять функцию желательности Харрингтона [29]. Построение обобщенной функции базируется на преобразова-

нии натуральных значений частных показателей эффективности производства в безразмерную шкалу предпочтительности. Все показатели имеют физический смысл и размерность. Для объединения различных показателей необходимо вводить для каждого из них некоторую безразмерную шкалу. Шкала должна быть одинаковой для всех объединяемых факторов, это позволяет их сравнивать. Выбор шкалы — задача, зависящая от априорной информации о частных факторах, а также от той точности, с которой определяется обобщенный признак.

Метод количественных оценок с значениями предпочтительности d от 0 до 1 представляется наиболее эффективным для построения шкалы желательности. Значение $d = 0$ (или $D = 0$) соответствует абсолютно неприемлемому значению критерия, а $d = 1$ ($D = 1$) — самому лучшему значению, при этом последующее улучшение критерия или невозможно, или не представляет интереса. Промежуточные значения желательности и соответствующие им числовые отметки приведены в табл. 3.

Табл. 3. Значения для шкалы D -функции Харрингтона

Table 3. Values for the D -scale of the Harrington function

Количественная отметка на шкале желательности D Quantitative mark on the scale of desirability D	Желательность значения критерия y Desirability of criterion value y
0,80–1,00	Очень хорошо Very good
0,63–0,80	Хорошо Good
0,37–0,63	Удовлетворительно Satisfactory
0,20–0,37	Плохо Bad
0,00–0,20	Очень плохо Very bad

Построенная шкала D представляет собой безразмерную шкалу, при помощи которой отклик может быть преобразован так, чтобы его можно было интерпретировать в терминах полезности или желательности для любого специфического применения (рис. 7).

Обобщенная функция желательности Харрингтона, представляющая собой среднее геометрическое желательностей отдельных параметров оптимизации K_i , в нашем случае временной параметр технологической операции [24–27]:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n K_i}, \quad (14)$$

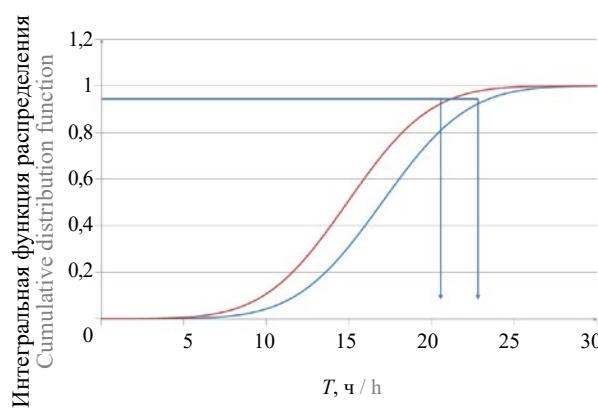


Рис. 6. Интегральная функция распределения времени производства пеностекла

Fig. 6. The cumulative distribution function of the foam glass production time

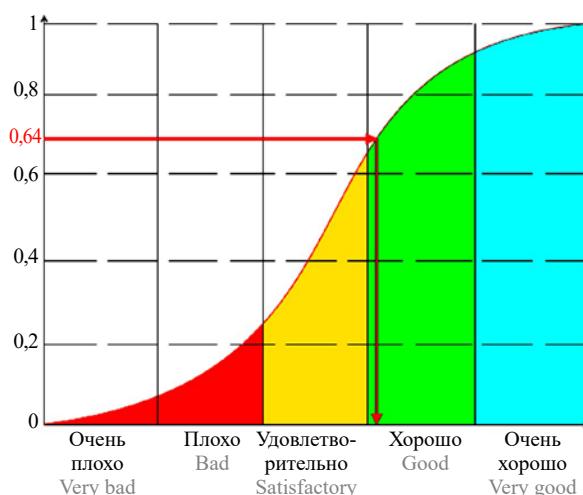


Рис. 7. Значения D-функции Харрингтона

Fig. 7. Harrington D-function values

где D — обобщенная желательность (значение интегрального показателя эффективности технологического процесса). В результате обобщенная функция желательности D оказывается единственным параметром оптимизации взамен многих.

Анализируя результаты, представленные на рис. 7, можно сделать вывод, что интегральный показатель эффективности технологического процесса производства пеностекла с учетом использования на этапе планирования технологии математического моделирования макрофизических параметров процессов высокотемпературной термической обработки пеностекла составляет значение 0,64, что соответствует уровню «хорошо» по шкале D-функции Харрингтона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что применение математического моделирования макрофизических параметров процессов высокотемпературной термической обработки пеностекла на стадии разработки и создания моделей технологического процесса позволяет существенно повысить эффективность работы предприятия в среднем на 10 % и более. При этом важным инструментом достижения данной цели становится использование методов сетевого планирования и управления. Особенно значимо внедрение указанных технологий на предприятиях, технологический процесс которых включает этап высокотемпературной тер-

мической обработки продукции. В этих условиях эффективность повышается, что выражается в значениях энергоемкости, снижения издержек и себестоимости продукции.

В результате проведенной опытно-экспериментальной работы получили следующие выводы:

- технологический процесс производства пеностекла включает набор операций, которые характеризуются временем их выполнения и последовательностью в производственном цикле, что позволяет произвести оценку каждой отдельной стадии с учетом затраченного временного параметра и объема проведенной работы на каждом участке, используя методы сетевого планирования;

- корректировка оценочных показателей выполнения отдельных операций при модернизации сетевого графика способствует уменьшению общего времени технологического процесса производства пеностекла, что влияет на себестоимость готового материала;

- измерение эффективности применения сетевых методов планирования на производстве пеностекла производится на основе значения общих временных затрат на выполнение технологических операций;

- в качестве показателя эффективности (качественной оценки) использования методов сетевого планирования применяли функцию желательности Харрингтона, с учетом преобразования размерных показателей технологических операций в количественные оценки с интервалами значений желательности, на основе априорной информации о частных факторах процесса;

- значение интегрального показателя рациональности использования методов сетевых графиков в процессе производства пеностекла и моделирования макрофизических параметров процессов его высокотемпературной термической обработки составляет 0,64. Следовательно, можно говорить о целесообразности применения рассмотренной модели;

- на основе статистики распределения временных показателей отдельных технологических операций можно заключить, что при достоверности 0,9 (наперед заданной вероятности) время реализации этапа «Проектирование технологического процесса» без применения результатов математического моделирования составляет до 22,2 ч и с применением результатов математического моделирования — до 19,9 ч. На основе полученных данных можно сделать вывод, что время реализации технологического процесса снижается более чем на 10 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Таценко В.П., Шатыко Д.Б., Баканов А.А. Оптимизация технологического процесса на основе хронометража его ключевых операций // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 1 (137). С. 12–19. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-1-12-19
2. Malcolm D.G., Roseboom J.H., Clark C.E., Fazar W. Application of a technique for research

- and development program evaluation // *Operations Research*. 1959. Vol. 7. Issue 5. Pp. 646–669. DOI: 10.1287/opre.7.5.646
3. *Yamín R.A., Harmelink D.J.* Comparison of linear scheduling model (LSM) and critical path method (CPM) // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2001. Vol. 127. Issue 4. Pp. 374–381. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(2001)127:5(374)
4. *Ahuja H.N., Dozzi S.P., Abourizk S.M.* Project management: techniques in planning and controlling construction projects. John Wiley & Sons, 1994.
5. *Harmelink D.J., Rowings J.E.* Linear scheduling model: Development of controlling activity path // *Journal of Construction Engineering and Management*. 1998. Vol. 124. Issue 4. Pp. 263–268. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(1998)124:4(263)
6. *Kopanos G.M., Kyriakidis T.S., Georgiadis M.C.* New continuous-time and discrete-time mathematical formulations for resource-constrained project scheduling problems // *Computers & Chemical Engineering*. 2014. Vol. 68. Pp. 96–106. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2014.05.009
7. *Kyriakidis T.S., Kopanos G.M., Georgiadis M.C.* MILP formulations for single- and multi-mode resource-constrained project scheduling problems // *Computers & Chemical Engineering*. 2012. Vol. 36. Pp. 369–385. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.06.007
8. *Walton H.* Experience of the Application of the Critical Path Method to Plant Construction // *Journal of the Operational Research Society*. 1964. Vol. 15. Issue 1. Pp. 9–16. DOI: 10.1057/jors.1964.3
9. *Liu L., Burns S.A., Feng C.W.* Construction time-cost trade-off analysis using LP/IP hybrid method // *Journal of Construction Engineering and Management*. 1995. Vol. 121. Issue 4. Pp. 446–454. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(1995)121:4(446)
10. *Hegazy T.* Computerized system for efficient scheduling of highway construction // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2005. Vol. 1907. Issue 1. Pp. 8–14. DOI: 10.1177/0361198105190700102
11. *Shi Q., Blomquist T.* A new approach for project scheduling using fuzzy dependency structure matrix // *International Journal of Project Management*. 2012. Vol. 30. Issue 4. Pp. 503–510. DOI: 10.1016/j.ijproman.2011.11.003
12. *Galloway P.D.* Survey of the construction industry relative to the use of CPM scheduling for construction projects // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2006. Vol. 132. Issue 7. Pp. 697–711. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(2006)132:7(697)
13. *Olawale Y., Sun M.* Construction project control in the UK: Current practice, existing problems and recommendations for future improvement // *International Journal of Project Management*. 2015. Vol. 33. Issue 3. Pp. 623–637. DOI: 10.1016/j.ijproman.2014.10.003
14. *Kemmer S.L., Heineck L.F.M., Alves T.C.L.* Using the line of balance for production system design // 16th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. 2008.
15. *Lucko G., Alves T.D.C.L., Angelim V.L.* Challenges and opportunities for productivity improvement studies in linear, repetitive, and location-based scheduling // *Construction Management and Economics*. 2014. Vol. 32. Issue 6. Pp. 575–594. DOI: 10.1080/01446193.2013.845305
16. *Сафаргалиев М.Ф.* Планирование производства новой продукции машиностроительного предприятия // *Вестник экономики, права и социологии*. 2012. № 3. С. 109–113.
17. *Улитко Е.В., Лапидус А.А.* Стохастическая модель технико-экономической эффективности организации строительства жилищных объектов // *Строительное производство*. 2021. № 4. С. 2–6. DOI: 10.54950/26585340_2021_4_1_2
18. *Федосов С.В., Баканов М.О.* Модели и методы высокотемпературной термической обработки в технологиях пеностекла. М.: Спутник +, 2021. 301 с.
19. *Van den Briel M.H.L., Kambhampati S.* Optiplan: Unifying IP-based and graph-based planning // *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2005. Vol. 24. Pp. 919–931. DOI: 10.1613/jair.1698
20. *Gupta A., Singh R.K.* Developing a framework for evaluating sustainability index for logistics service providers: graph theory matrix approach // *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2020. Vol. 69. Issue 8. Pp. 1627–1646. DOI: 10.1108/ijppm-12-2019-0593
21. *Yatsenko E.A., Goltzman B.M., Klimova L.V., Yatsenko L.A.* Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 142. Issue 1. Pp. 119–127. DOI: 10.1007/s10973-020-10015-3
22. *Karandashova N.S., Goltzman B.M., Yatsenko E.A.* Analysis of influence of foaming mixture components on structure and properties of foam glass // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 262. P. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012020
23. *Lotov V.A., Krivenkova E.V.* Kinetics of formation of the porous structure in foam glass // *Glass and Ceramics*. 2002. Vol. 59. Issue 3/4. Pp. 89–93. DOI: 10.1023/a:1019519727228
24. *Dutta P., Hazarika G.C.* Construction of families of probability boxes and corresponding membership functions at different fractiles // *Expert Systems*. 2017. Vol. 34. Issue 3. P. e12202. DOI: 10.1111/exsy.12202
25. *Adduri P., Penmetsa R.* System reliability analysis in the presence of random and non-random variables // 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. 2006. DOI: 10.2514/6.2006-6929

26. Топольский Н.Г., Тараканов Д.В., Михайлов Е.А. Теоретические основы поддержки управления пожарными подразделениями на основе мониторинга динамики пожара в здании : монография / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Н.Г. Топольского. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 320 с.
27. Trautmann H., Weihs C. On the distribution of the desirability index using Harrington's desirability function // Metrika. 2006. Vol. 63. Issue 2. Pp. 207–213. DOI: 10.1007/s00184-005-0012-0
28. Bikbulatov E.S., Stepanova I.E. Harrington's desirability function for natural water quality assessment // Russian Journal of General Chemistry. 2011. Vol. 81. Issue 13. Pp. 2694–2704. DOI: 10.1134/S1070363211130111
29. Puring S.M., Vatusov D.N., Tyurin N.P. Parameter choice optimization of ventilating air cleaning equipment while designing and constructing industrial buildings // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 563–568. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.192

Поступила в редакцию 8 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 25 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 25 октября 2022 г.

О Б А В Т О Р АХ: Сергей Викторович Федосов — доктор технических наук, профессор кафедры Технологии и организации строительного производства, академик РААЧ; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26;

Максим Олегович Баканов — доктор технических наук, доцент, начальник учебно-научного комплекса «Пожаротушение»; Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России; 153011, г. Иваново, пр-т Строителей, д. 33; SPIN-код: 3185-5193, ORCID: 0000-0001-8460-9056, Scopus: 57204434215; mask-13@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tatsienko V.P., Shatko D.B., Bakanov A.A. Optimization of a technological process based on time of its key operations. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2020; 1(137):12-19. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-1-12-19 (rus.).
2. Malcolm D.G., Roseboom J.H., Clark C.E., Fazar W. Application of a technique for research and development program evaluation. *Operations Research*. 1959; 7(5):646-669. DOI: 10.1287/opre.7.5.646
3. Yamín R.A., Harmelink D.J. Comparison of linear scheduling model (LSM) and critical path method (CPM). *Journal of Construction Engineering and Management*. 2001; 127(4):374-381. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(2001)127:5(374)
4. Ahuja H.N., Dozzi S.P., Abourizk S.M. *Project management: techniques in planning and controlling construction projects*. John Wiley & Sons, 1994.
5. Harmelink D.J., Rowings J.E. Linear scheduling model: Development of controlling activity path. *Journal of Construction Engineering and Management*. 1998; 124(4):263-268. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(1998)124:4(263)
6. Kopanos G.M., Kyriakidis T.S., Georgiadis M.C. New continuous-time and discrete-time mathematical formulations for resource-constrained project scheduling problems. *Computers & Chemical Engineering*. 2014; 68:96-106. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2014.05.009
7. Kyriakidis T.S., Kopanos G.M., Georgiadis M.C. MILP formulations for single- and multi-mode resource-constrained project scheduling problems. *Computers & Chemical Engineering*. 2012; 36:369-385. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.06.007
8. Walton H. Experience of the Application of the Critical Path Method to Plant Construction. *Journal of the Operational Research Society*. 1964; 15(1):9-16. DOI: 10.1057/jors.1964.3
9. Liu L., Burns S.A., Feng C.W. Construction time-cost trade-off analysis using LP/IP hybrid method. *Journal of Construction Engineering and Management*. 1995; 121(4):446-454. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(1995)121:4(446)
10. Hegazy T. Computerized system for efficient scheduling of highway construction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2005; 1907(1):8-14. DOI: 10.1177/0361198105190700102
11. Shi Q., Blomquist T. A new approach for project scheduling using fuzzy dependency structure matrix. *International Journal of Project Management*. 2012; 30(4):503-510. DOI: 10.1016/j.ijproman.2011.11.003
12. Galloway P.D. Survey of the construction industry relative to the use of CPM scheduling for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2006; 132(7):697-711. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(2006)132:7(697)

13. Olawale Y., Sun M. Construction project control in the UK: Current practice, existing problems and recommendations for future improvement. *International Journal of Project Management*. 2015; 33(3):623-637. DOI: 10.1016/j.ijproman.2014.10.003
14. Kemmer S.L., Heineck L.F.M., Alves T.C.L. Using the line of balance for production system design. *16th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 2008.
15. Lucko G., Alves T.D.C.L., Angelim V.L. Challenges and opportunities for productivity improvement studies in linear, repetitive, and location-based scheduling. *Construction Management and Economics*. 2014; 32(6):575-594. DOI: 10.1080/01446193.2013.845305
16. Safargaliev M.F. Planning of new production of machine building industry. *The Review of Economy, the Law and Sociology*. 2012; 3:109-113. (rus.).
17. Ulitko E.V., Lapidus A.A. Stochastic model of technical and economic efficiency of the organization of construction of housing facilities. *Construction Production*. 2021; 4:2-6. DOI: 10.54950/26585340_2021_4_1_2 (rus.).
18. Fedosov S.V., Bakanov M.O. *Models and methods of high-temperature heat treatment in foam glass technology*. Moscow, Sputnik +, 2021; 301. (rus.).
19. Van den Briel M.H.L., Kambhampati S. Opti-plan: Unifying IP-based and graph-based planning. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2005; 24:919-931. DOI: 10.1613/jair.1698
20. Gupta A., Singh R.K. Developing a framework for evaluating sustainability index for logistics service providers: graph theory matrix approach. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2020; 69(8):1627-1646. DOI: 10.1108/ijppm-12-2019-0593
21. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Klimova L.V., Yatsenko L.A. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020; 142(1):119-127. DOI: 10.1007/s10973-020-10015-3
22. Karandashova N.S., Goltsman B.M., Yatsenko E.A. Analysis of influence of foaming mixture components on structure and properties of foam glass. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 262:012020. DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012020
23. Lotov V.A., Krivenkova E.V. Kinetics of formation of the porous structure in foam glass. *Glass and Ceramics*. 2002; 59(3/4):89-93. DOI: 10.1023/a:1019519727228
24. Dutta P., Hazarika G.C. Construction of families of probability boxes and corresponding membership functions at different fractiles. *Expert Systems*. 2017; 34(3):e12202. DOI: 10.1111/exsy.12202
25. Adduri P., Penmetsa R. System reliability analysis in the presence of random and non-random variables. *11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*. 2006. DOI: 10.2514/6.2006-6929
26. Topolsky N.G., Tarakanov D.V., Mikhailov E.A. *Theoretical foundations of fire department management support based on monitoring the dynamics of a fire in a building: monograph* / under the general editorship of Dr. of Technical Sciences, prof. N.G. Topolsky. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019; 320. (rus.).
27. Trautmann H., Weihs C. On the distribution of the desirability index using Harrington's desirability function. *Metrika*. 2006; 63(2):207-213. DOI: 10.1007/s00184-005-0012-0
28. Bikbulatov E.S., Stepanova I.E. Harrington's desirability function for natural water quality assessment. *Russian Journal of General Chemistry*. 2011; 81(13):2694-2704. DOI: 10.1134/S1070363211130111
29. Puring S.M., Vatusov D.N., Tyurin N.P. Parameter choice optimization of ventilating air cleaning equipment while designing and constructing industrial buildings. *Procedia Engineering*. 2016; 153:563-568. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.192

Received September 8, 2022.

Adopted in revised form on October 25, 2022.

Approved for publication on October 25, 2022.

BIO NOTES: **Sergej V. Fedosov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technologies and organization of construction production, academician of the RAASN; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation;

Maksim O. Bakanov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the educational and scientific complex Fire extinguishing; **Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters**; 33 Stroiteley ave., Ivanovo, 153011, Russian Federation; SPIN-code: 3185-5193, ORCID: 0000-0001-8460-9056, Scopus: 57204434215; mask-13@mail.ru.

Authors' contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflicts of interest.

Проблема определений и классификации теоретических моделей организации, проектной подготовки и технологии строительства

Владимир Вячеславович Сокольников

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время в научно-техническом и образовательном обороте в части проектной подготовки, организации и технологии строительства и ряда смежных областей значительное место заняли определения, применимые к понятиям «моделирование» и «модель», которые не отражают их специальную принадлежность. Целью настоящего исследования является предложение и обоснование классификационной структуры определений научных и инженерных моделей, охватывающей задачи организации и технологии строительства, решаемые в периоды проектной подготовки и производства строительных работ. Данная классификация позволит структурировать названия моделей и связанных с ними методов решения задач технологии и организации, взаимно увязывать модели, а также методы решений, ограничить использование общих определений в специальных научных и инженерных моделях.

Материалы и методы. Проведен анализ стандартов информационного моделирования в строительстве, общих определений моделей и моделирования, часто используемых в организации, проектной подготовке и технологии строительства. Приведены научные и инженерные представления о задачах моделирования и классификации моделей. Представлена схема научной классификации видов моделирования и примеры атрибуции теоретических моделей.

Результаты. Выполнена классификация некоторых известных научных и инженерных моделей, применяемых в проектировании, технологии и организации строительства. На примере интерпретации уравнения непрерывности математической физики осуществлен анализ и атрибуция математической модели строительного технологического потока и подтверждена необходимость атрибуции моделей по переменным, физическим параметрам и смыслу решаемых с их помощью задач. Предложен формат записи названия теоретической модели в указанных областях строительной науки.

Выводы. Сделаны выводы о необходимости внедрения в практику исследований в области организации, а также проектной подготовки и технологии строительства атрибуции действующих и новых теоретических моделей; единства научной, инженерной и образовательной терминологии описания теоретических моделей. Предложен порядок функционирования системы атрибуции теоретических моделей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вид моделирования, модель, классификация видов моделирования, атрибуция модели, моделирование продолжительности и организации технологического потока

Благодарности. Статья публикуется по результатам научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов работниками Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета в 2022 г.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сокольников В.В. Проблема определений и классификации теоретических моделей организации, проектной подготовки и технологии строительства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1564–1573. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1564-1573

Автор, ответственный за переписку: Владимир Вячеславович Сокольников, vschief@yandex.ru.

The problem of definitions and classification of theoretical models of construction planning, design preparation and building technology

Vladimir V. Sokolnikov

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

ABSTRACT

Introduction. Presently, definitions applied to the concepts of “modelling” and “model”, which do not specify their affiliation, are widely used in research, development and education. They deal with design preparation, construction planning, building technologies and other related areas. The purpose of this study is to propose and justify the classification structure for research and engineering models, focused on the tasks of construction planning and building technologies during design

preparation and performance of construction work. This classification will make it possible (a) to structure model names and related methods used to solve problems of building technologies and construction planning, (b) to mutually relate models as well as solution methods, and (c) to limit the application of general definitions to special research and engineering models.

Materials and methods. The author analyzed information modelling standards in construction, general definitions of models and modelling frequently used in construction planning, design preparation and building technologies. Research and engineering ideas, concerning the tasks of modelling and classification of models, are provided in the article. The pattern of theoretical classification of modelling types and cases of theoretical attribution of models are presented.

Results. The author classified some research and engineering models used in design, construction planning and building technologies. The author interpreted the continuity equation of mathematical physics, performed the analysis and attribution of the mathematical model of a construction process flow, and confirmed the need to perform the attribution of models on the basis of variables, physical parameters and the essence of problems that they solved. The author proposed a record format for a theoretical model name in the above-mentioned areas of construction research.

Conclusions. The conclusion is that there is a need to introduce the attribution of current and new theoretical models into the practice of research in construction planning, design preparation and building technology; there is a need for consistency of research, engineering and educational terminology applicable to descriptions of theoretical models in construction planning and building technology. The procedure of attributing theoretical models is proposed.

KEYWORDS: type of modelling, model, classification of modelling types, model attribution, modelling of the term and planning of construction flows

Acknowledgements. The article is published on the basis of the findings of a research project, implemented by the employees of the Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering within the framework of a grant competition in 2022.

FOR CITATION: Sokolnikov V.V. The problem of definitions and classification of theoretical models of construction planning, design preparation and building technology. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1564–1573. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1564-1573 (rus.).

Corresponding author: Vladimir V. Sokolnikov, vschief@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в научно-техническом и специальном образовательном обороте в области организации, технологии, проектной подготовки строительства и ряда смежных областей значительное место заняли применяемые к понятиям «моделирование» и «модель» определения, не отражающие их специальную инженерную или научную основу и направленность. К указанным определениям моделей и видов моделирования относятся «4D», «информационное», «визуальное», «BIM», «статистическое», «сетевое» [1–10] и прочие, которые встречаются в положениях административных актов, названиях конкурсов и олимпиад учащихся, названиях некоторых учебных дисциплин и в их рабочих программах. Это обстоятельство имеет следствием неопределенность как в задачах моделирования, так и в методах построения и физическом смысле самих моделей: обоснованности выбора переменных и их параметров.

Целью настоящего исследования является предложение и обоснование классификационной структуры определений научных и инженерных моделей, охватывающей задачи организации и технологии строительства, решаемые в периоды проектной подготовки, а также производства строительных работ. Данная классификация моделей, основанная на связи главных соотношений переменных и ограничениях параметров, позволит структурировать названия моделей и связанных с ними методов решения задач организации и технологии строительства, взаимоувязывать и модели, и методы решений между собой, ограничить использование общих определений в специальных научных и инженерных моделях.

В процессе достижения цели исследования автором решались следующие задачи:

- разработка классификации научного и инженерного моделирования процессов организации и технологии строительства, его проектной подготовки, а также производства строительных работ;
- выполнение (на примере интерпретации уравнения непрерывности математической физики) анализа и атрибуции математической модели строительного технологического потока;
- подтверждение необходимости атрибуции моделей по переменным, физическим параметрам и смыслу решаемых с их помощью задач;
- формулирование предложения по формату записи названия теоретических моделей в указанных областях строительной науки.

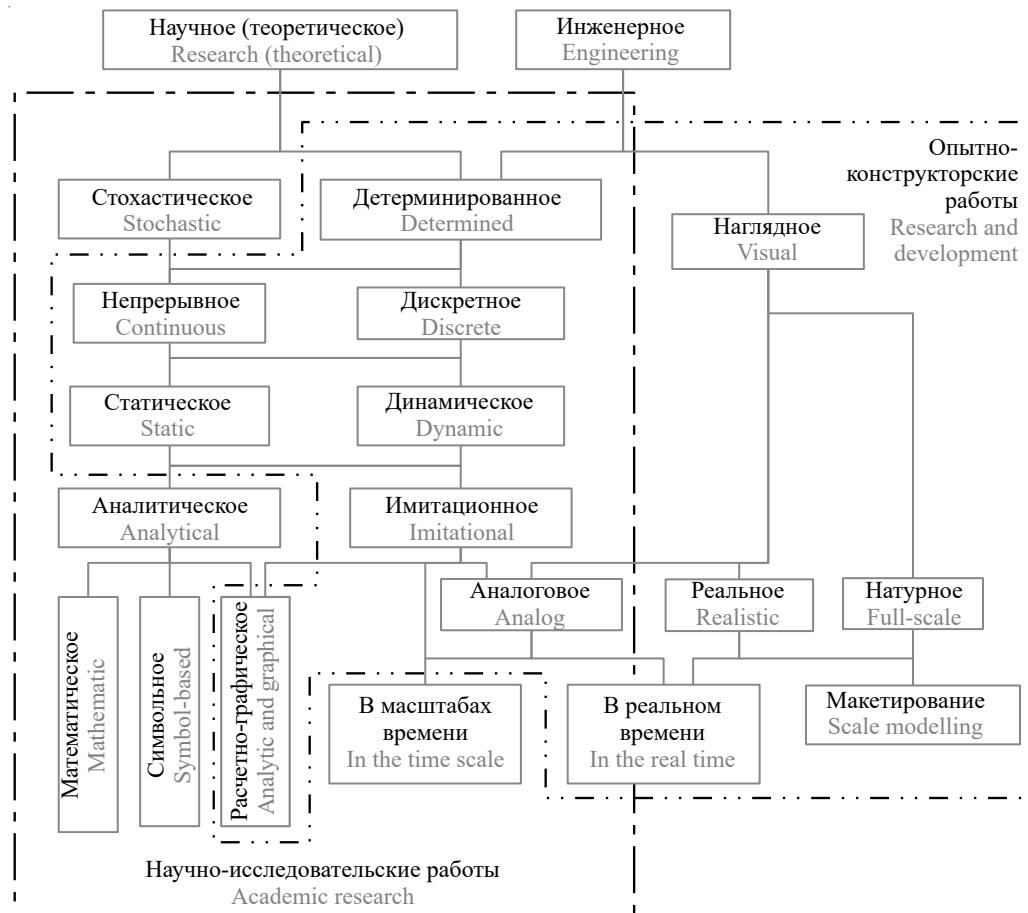
В статье для краткости классификационные признаки теоретических моделей, их названия, а также определения их переменных и параметров объединены общим понятием *атрибуции*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На уровне Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии РФ подготовлен ряд стандартов в области информационного моделирования (ГОСТ Р 10.01.002 «Моделирование информационное в строительстве», 2017 г., ГОСТ Р 10.02.0001 «Информационное моделирование в строительстве». Часть 1. Методология и формат, 2019 г., СП 333.1325800.2017 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели на различных стадиях жизненного цикла» и др.). Имеющиеся в них опре-

деления «информационной модели сооружения»¹, как «...совокупности взаимосвязанных сведений об объекте капитального строительства ...», а также «...Модель — набор данных, созданный по структуре, лежащей в основе схемы данных, соответствующий определенным требованиям»², нельзя считать ни научными, ни инженерными (см. далее), а декларируемые в документах «модели» таковыми не являются. К существующим в указанных документах определениям наилучшим образом подходят известные и хорошо зарекомендовавшие себя понятия «электронная база данных», «электронный структурированный массив данных» или более позднее название «банк знаний на цифровой платформе». То есть речь идет о накоплении данных для обработки их по частным *моделям*, описывающим различные свойства сооружения. Ситуация осложняется и тем, что в качестве дополнений и синонимов к «информационному» моделированию применяют «BIM» и «4 и более D» моделирование. Само понятие «4D-моделирование строительства объектов» в СП 333.1325800.2020 «Информацион-

ное моделирование в строительстве» упоминается как «визуализация процессов строительства» [1], т.е. тоже не определено в научных или инженерных терминах. В связи с последним утверждением следует отметить, что в Градостроительном кодексе РФ № 190-ФЗ, ГОСТ Р 10.0.02-2019 п. 3.1.20 и СП 333.1325800.2020 и других речь идет, по сути, не о модели, а об обязанности формирования цифрового массива данных, характеризующих физические, технические, эксплуатационные, административные, правовые и социальные свойства и параметры сооружения. Именно эта разнородность данных и исключает возможность создания единой научной, или инженерной модели объекта строительства, а также возможность выполнять «информационное» моделирование научными или инженерными методами. Определение *информации* до сих пор — предмет научной полемики, участники которой начинают трактовать «информацию» как еще один философский атрибут существования материи, в дополнение ко времени.



Классификация видов моделирования

Classification of modelling types

¹ Градостроительный кодекс РФ от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 23.04.2018).

² ГОСТ Р 10.0.02-2019/ИСО 16739-1:2018. Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Отраслевые базовые классы (IFC) для обмена и управления данными об объектах строительства. п. 3.1.20.

С другой стороны, согласно представлениям науки и техники о моделировании и моделях, имеем следующее:

- *моделирование (научное)* представляет собой выполняемое с помощью модели объекта *установление видов зависимостей*, а также границ изменений свойств объекта при изменениях в заданных диапазонах значений актуальных параметров объекта, или среды;
- *моделирование (инженерное)* или *вариантное проектирование* обычно выполняют на основе существующих технологий в виде расчетно-графического обоснования и различных форм визуализации будущего облика или свойств объекта. Иногда слово «моделирование» заменяют непосредственно названиями методов и объекта *моделирования*. Например: «графический метод определения потерь на участке трубопровода...». В отличие от научного моделирования, когда результат неизвестен заранее, вариантовое проектирование обеспечивает заданные (нормативные) параметры частей сооружения. Назначение модели — объяснить зависимость(и), необходимость разработки модели определяется невозможностью исследования реального объекта, тип модели устанавливается требованиями к точности получаемого на этой модели решения, а в основе моделирования лежит представление о подобии. Согласно этому представлению, модели могут быть «полными», «неполными» и «приближенными». На рисунке представлена классификация видов моделирования, выполняемых на моделях трех указанных типов [11, 12].

Соответствуют приведенной классификации и атрибутируются на ее основе известные в строительной науке научные и инженерные модели, такие как модели деформаций, объясняющие прочностные характеристики конструкций, геомеханические модели распределения нагрузки от фундамента на грунты основания, объясняющие параметры конструкции фундаментов, теплотехнические модели сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Также укладывается в предложенную схему классификации *инженерная неполная имитационная расчетно-графическая модель* организации строительного производства при возведении сооружения, объясняющая продолжительность строительства и физические параметры стройплощадки и строительного хозяйства. На практике эта модель обозначается нормативными названиями документов из состава ПОС: «календарный график» и «стройгенплан». Методами, основанными на перечисленных моделях, выполняют предметное: научное или инженерное моделирование изменений свойств названных моделируемых объектов и явлений.

Из приведенных определений и примеров научных и инженерных моделей следует, что атрибуция модели должна содержать указание на физический смысл решаемой задачи, а также на виды осуществляемых с ее помощью моделирования. Это значит, что *класс* модели исследователь определяет после выбора необходимых видов моделирования, соответствующих природе изучаемого объекта и поставленной задаче, а также после предъявления требований к точности получаемого решения.

Теперь с обозначенных научной или инженерной позиций необходимо попытаться атрибутировать «информационные» модели. «BIM» по форме — аббревиатура делового и рекламного слогана «Строительство. Информация. Модель(ирование)». Ввел эту аббревиатуру в деловой оборот архитектор Чарльз Истман, сейчас он профессор Технической архитектурной школы Джорджии и эксперт по BIM-проектированию³. «...В то время, по подсчетам Истмана, применение BDS уменьшало стоимость проектирования на 50 % ...». Судя по приведенной цитате, BIM изначально понималась как технология корпоративного проектирования, обеспечивающая сокращение потерь оплачиваемого рабочего времени за счет формирования и автоматизированной обработки цифрового массива проектных данных, высокой скорости их оборота между участниками проектирования, автоматической печати проектной документации и ее хранения в электронном виде (отечественный аналог — САПР — система автоматизированного проектирования). В настоящее время в России BIM можно было бы интерпретировать как девиз развития строительной отрасли на основе разработки специальных прикладных моделей и средств их «информационного», в первую очередь — программного обеспечения как самих расчетных алгоритмов, так и получения исходных значений расчетных параметров. Таким образом, в сравнении с указанными выше научными или инженерными моделями, такие названия моделей и моделирования как «информационное...», «BIM...», «4D» или иное, как и «BiT» (технологии), без своих специальных определений в терминах методов моделирования и параметров решаемых задач инженерного или научного смысла не имеют.

С другой стороны, использование специальных предметных названий моделей делает ненужным применение указанных выше «обобщенных» названий. «3D-моделирование» является, по-видимому, искажением понятия «пространственной визуализации под любым углом зрения частей сооружения в ходе вариантового проектирования с использованием цифровой среды», т.е. является цифровым аналогом макетирования (в классификации на рисунке присутствует), иначе — цифровым макетированием.

³ URL: https://yandex.ru/search/?lr=2&clid=2224022&text=bim+%D0%BA%D1%82%D0%BE+%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B4%D1%83%D0%BC%D0%B0%D0%BB&src=suggest_T

Определение «4 и более D» моделирование сложно поддается однозначной интерпретации с научных и инженерных позиций в области организации и технологии строительства.

В отношении приведенных в списке литературы отечественных источников [1–10] из области организации строительства можно отметить следующие моменты использования рассмотренных выше понятий.

1. В заголовках статей встречаются сочетания понятий высокой степени абстракции (например, «визуализация процесса строительства» [1], «имитация планирования» [2], «статистическое моделирование календарных планов» [3], «модель аналогии» [4]). Даже такие, казалось бы, «привычные» определения моделирования как «организационно-техническое» [5] или «сетевое» [7] тоже имеют «неопределенный» статус с точки зрения задач и методов моделирования. То есть указываются не формализованные в задачах исследования и моделируемые параметры организации, технологии строительства или проектирования, а некоторые виды моделирования [8, 9]. Также понятие «информационной модели» используется в различных контекстах как атрибут [10].

2. Авторы не приводят для абстрактных понятий (в том числе «модель»), которые вынесены в названия статей, строгих научных или инженерных определений в терминах (параметрах) технологии, организации строительства, или проектирования, либо в параметрах рассматриваемых моделей.

3. Авторы применяют к понятию «модель» (моделирование) и к близким понятиям (например: «имитация ...планирования», «сценарий», «...аналогия») широкий спектр абстрактных определений, таких как «BIM», «информационный», «сетевой», «4D» и др.

Анализ доступных зарубежных литературных источников позволяет сделать вывод, что в области теоретических исследований технологии и организации строительства такие понятия, как «BIM», «4D» и «информационное моделирование» практически не применяются. Методы моделирования актуальных параметров строительного процесса зарубежные источники рассматривают в следующих задачах: Control Project Cost Escalation [13], Project management [14], Project Risk [15, 17], Optimal resource utilization [16], Decision making [18–20], Secure Information Model [21]. В ходе настоящего исследования каких-либо концепций и направлений теоретического моделирования в области организации и технологии строительного производства в иностранных источниках не выявлено.

Более подробный анализ отечественных источников из группы [1–10], наиболее близких к задачам моделирования технологии и организации строительства на этапе проектирования, показал следующее. В работе [1] автор определяет

«4D-моделирование» как «3D-моделирование, учитывающее время...» и далее «...Для учета времени 3D-модель синхронизируется с графиком работ». Каким образом синхронизируется? Данное в публикации [1] определение не содержит и классификационных признаков «3D-модели». После анализа содержания статьи [1] «4D» можно интерпретировать как *отображение* факта выполнения технологических процессов и соответствующих им элементов конструкций с помощью индикации цветом как готовых конструкций в схемах и чертежах, так и диаграммы календарного графика. Индикация в графике выполняется методом ручного редактирования статуса работ(ы) (техпроцесса): «начат», или «выполняется», или «завершен».

Описанный подход [1], названный автором «4D-моделированием», является, по сути, формированием интерфейса, известного из техники систем автоматического управления под названием «мнемосхема»: интерфейсом, сигнализирующим в автоматическом (но не ручном) режиме цветом или звуком об изменении состояния элементов технической системы. Мнемосхема — весьма сложный индикатор, к которому не предъявляются требования к точности (это требование предъявляется к датчикам системы) и который не объясняет причин изменения состояния элементов системы или среды. Подход [1] — это не моделирование «процесса строительства», а индикация выполнения работ, указанных в графике. В связи с этим стоит также заметить, что присутствующее в СП 333.1325800.2020 и в названии [1] понятие «процесс строительства» не синоним технического термина «строительный технологический процесс» и также требует определения на предметном уровне соответствующей научной специальности или инженерной практики.

Вместе с тем очевидно, что самым надежным способом «визуализации процесса строительства» в период СМР служит посещение стройплощадки или просмотр видеотрансляции работ, ведущихся в актуальных проектных отметках. Это обеспечивает стопроцентную точность и своевременность непосредственного наблюдения без использования моделирования. В период проектирования (разработки ПОС или ППР) «визуализацию процесса строительства» (т.е. изображение хронологической последовательности работ) выполняют, как известно, в интерфейсе диаграммы Ганта. Правда, в период проектирования анимационное пространственное изображение строительных работ, производительности машин и ручного труда в масштабе времени, пропорциональном масштабу изображения сооружения и его конструкций, стало бы моделью *продолжительностей* осуществления техпроцессов, по которой можно рассчитывать продолжительности работ и строительства в целом, меняя для этого значения параметров производительности машин и рабочих (подбирая комплекты техники и составы бригад).

Но и в этом случае, визуализация — анимация, это в большей степени обучающий интерфейс, чем инженерный, или производственный интерфейс диаграммы Ганта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вышеизложенные примеры и рассуждения обосновывают значимость разработки системы классификации и атрибуции теоретических моделей для структурирования их названий и связанных с ними методов решения задач организации и технологии строительства, взаимоувязки как моделей, так и методов решений. Причем специальные названия моделей должны быть выполнены на основе терминов классификации (рис.), соотношений переменных, а также ограничений параметров и с целью точной атрибуции места моделей в структуре специальных знаний. В подтверждение этого тезиса приведем интерпретацию с позиций задач организации и технологии строительного производства известного уравнения непрерывности (1), (2) математической физики [22]. Такая интерпретация позволит применить схему (рис.), что послужит примером атрибуции теоретической модели продолжительности строительства:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + A \nabla \rho + \rho \operatorname{div} A = 0, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{d\rho(x,y,z)}{dt} &= \frac{\partial \rho(x,y,z)}{\partial t} + A \nabla \rho = \\ &= \frac{\partial \rho(x,y,z)}{\partial t} + A_x \frac{\partial \rho(x,y,z)}{\partial x} + \\ &+ A_y \frac{\partial \rho(x,y,z)}{\partial y} + A_z \frac{\partial \rho(x,y,z)}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2)$$

Согласно схеме (рис.) уравнения (1), (2) атрибутируются как *приближенная* аналитическая математическая модель непрерывного переноса массы или энергии. Поскольку в выражениях (1) и (2) в качестве параметров уравнений присутствуют три пространственные координаты и время, то здесь имеет место научный аналог параметров «4D-моделирования». Но, в отличие от названия «4D», название модели «непрерывного переноса» определяет кроме четырех параметров также и актуальные переменные модели: *расстояние, направление и скорость* переноса массы, или энергии за время действия сил (т.е. массив моделируемых переменных). В отличие от моделирования непрерывного переноса «4D» следует интерпретировать как указание некоторых четырех параметров, составляющих переменные, с помощью которых описывают различные явления. Более неопределенное понятие «информационное моделирование» не отражает связи ни с одним параметром. Именно это

обстоятельство выводит как «информационное», так и «4D-моделирование» за научные и инженерные рамки, и делает невозможным атрибуцию их моделей.

Уравнение (2) позволяет прямую его интерпретацию к задачам технологии и организации строительных работ. Выражение (2) для полной производной по времени функции $\rho(x, y, z, t)$ (например: массы перенесенного вещества, т.е. строительной готовности сооружения) показывает, что значение функции ρ непрерывно меняется как со временем (регулярность и периодичность изменений — это первое слагаемое), так и от точки к точке пространства (это три слагаемых, описывающих скорость изменения функции по трем направлениям в зависимости от удаленности точки наблюдения от начала координат, что соответствует приращению строительной готовности в результате переноса масс конструкций под действием сил, возбуждаемых технологическими процессами).

По физической сути технологические монтажно-укладочные процессы — это процессы механического переноса [23] масс материалов и конструкций с некоторой скоростью, вызванной действием системы (поля) распределенных сил (технологического потока рабочих операций) A . Приращение массы строительной готовности сооружения является непрерывной функцией этой скорости. При этом функция ρ в уравнении (2) описывает приращение единицы массы строительной готовности сооружения (объемное расширение) за период действия сил (например, рабочей смены). Вертикальная составляющая вектора A_n характеризует увеличение высоты строительной готовности. Направление действия сил технологического потока A вдоль траекторий движения (подачи) элементов определяется проектным положением (координатами) конструкций, т.е. функцией ρ плотности проектного распределения масс конструкций в строительном объеме и константами техпроцессов.

На основании теоремы Гаусса (3), описывающей величину приращения массы строительной готовности сооружения m за промежуток времени dt выполнения комплексов монтажно-укладочных технологических процессов, можно получить выражение для продолжительности T действия сил технологического потока A , т.е. для продолжительности СМР:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho d\tau = \iint \rho A_n dS, \quad (3)$$

где $\frac{\partial m}{\partial t}$ — скорость приращения массы строительной готовности сооружения, т/период; ρ — функция проектной плотности пространственного распределения масс конструкций, т/м³; A_n — вертикальная составляющая вектор-потенциала (интенсивности) технологического потока.

В общем случае продолжительность T изменения массы (строительной готовности сооружения)

зависит от скорости такого изменения (3), которая в свою очередь является функцией действия сил (технологического потока):

$$T = f \left(\partial m / \partial t \left(\iint A_n(t) dt \right) \right). \quad (4)$$

Следовательно, единичный интервал времени действия сил технологического потока (например, длительность рабочего дня или рабочей недели) будет:

$$dT = d(\rho / A_n(t)). \quad (5)$$

При этом сменность работ служит параметром с изменяющимися значениями и входит в переменную A .

Таким образом показано, что выражение (1) равносильно (5), т.е.:

$$dT = \frac{\partial \rho(x, y, z)}{\partial t} + A \nabla \rho. \quad (6)$$

Сумма таких интервалов времени даст общую продолжительность строительства. Описанное подобие строительного процесса представлениям механики, положенное в основу теоретической модели *продолжительности* строительных работ, не рассматривает выполнения сопутствующих и обеспечивающих операций, которые в большинстве случаев удается совместить с проведением основных работ на других захватках, что и позволяет атрибутировать модель *продолжительности*, основанную на представлениях механики как «приближенную аналитическую математическую непрерывно-детерминированную статическую модель продолжительности выполнения монтажно-укладочных технологических процессов».

Продолжительность сопутствующих работ с высокой вероятностью укладывается в погрешность приближенной модели и метода вычислений либо может быть учтена специальными коэффициентами. Модель *продолжительности* является основой метода экспресс-оценки или проверки результатов определения продолжительности строительства методом составления календарного графика строительных работ на основе применения нормативов ЕНиР и иных действующих норм.

В результате рассуждений можно определить формат записи названия теоретической модели на базе ее атрибуции по схеме классификации (рис.). Избирательные сочетания названия блоков схемы (рис.) отражают физический характер решаемой задачи и одновременно служат атрибутивными признаками модели. Таким образом, формат записи названия модели при ее атрибуции на основе схемы (рис.) должен быть следующий: «(не)полная (*по ограничениям номенклатуры и значений специальных параметров...*) приближенная (*по соотношениям главных специальных переменных*), статическая или динамическая (*в масштабе времени*), непрерывная или дискретная (*по специальным пара-*

метрам...), аналитическая, математическая, имитационная или расчетно-графическая модель *название физического объекта, процесса или явления*».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненный анализ источников, отражающий существующие в настоящее время тенденции научного и инженерного моделирования, приведенные рассуждения и сформулированные на их основе положения, а также примеры их использования позволяют сделать следующие выводы.

- Поставленная автором цель исследования — предложение и обоснование классификационной структуры определений научных и инженерных моделей, охватывающей задачи организации и технологии строительства, достигнута путем решения задач, перечисленных во введении.

- В областях организации, проектной подготовки и технологий строительства, теоретические модели успешно классифицируются, согласно схеме (рис.), по физическому смыслу соотношений переменных и ограничениям их параметров.

- На основе вышеизложенного можно утверждать, что вводить в научный, инженерный и образовательный оборот и конструктивно использовать уточняющие определения к понятию «модель», как и сами понятия «модель» и «моделирование» следует только после проверки их соответствия классификационным признакам (*атрибуции*), природе задачи и требуемой точности решений. Автор считает целесообразным внедрение в практику исследований в области организации, а также проектной подготовки и технологии строительства требования атрибуции новых и действующих теоретических моделей путем классификации, которая предложена в настоящей статье. Для этого ведущим специалистам кафедр, проблемных лабораторий, научно-исследовательских организаций, профильных комитетов по науке и технике при правительствах, способным на основе анализа уровня знаний в предметных областях предлагается создать, периодически совершенствовать и согласовывать в установленном порядке систему атрибутивных признаков теоретических моделей, и опубликовывать их в профильных изданиях для последующего утверждения и использования.

- Методологическое единство научной, образовательной и инженерной терминологии в части описания теоретических моделей, практических задач и методов их решений в технологии и организации строительства позволит довести до практического применения все разрабатываемые теоретические модели, научно обосновать и развивать в нужном направлении как теоретические методы исследований, в первую очередь организации и технологии строительства, так и практические методы производственной реализации, что повысит статус и полезность научных исследований и, как следствие, эффективность методов организаций и технологии строительного производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бовтев С.В. Визуализация процесса строительства зданий и сооружений // Инновационные методы организации строительного производства : мат. Всерос. науч.-практ. конф. 2020. С. 3–8.
2. Болотин С.А., Дадар А.Х., Птухина И.С. Имитация календарного планирования в программах информационного моделирования зданий и регрессионная детализация норм продолжительностей строительства // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7 (25). С. 82–86.
3. Болотин С.А., Дадар А.Х., Птухина И.С. Совершенствование метода PERT в статистическом моделировании календарных планов // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 2 (31). С. 132–138.
4. Болотин С.А., Дадар А.Х., Котовская М.А. Модель пространственно-временной аналогии в оптимизации последовательности реконструируемых объектов // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 7 (42). С. 51–57. DOI: 10.5862/MCE.42.7
5. Костюченко В.В., Кудинов Д.О. Организационно-техническое моделирование проектно-строительных систем // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3 (21). С. 731–734.
6. Кривой С.А., Семин А.И., Попов А.В., Бебякин Б.О. Взаимосвязь BIM-сценариев в рамках инвестиционно-девелоперского проекта // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 2 (65). С. 20–39. DOI: 10.18720/CUBS.65.2
7. Каракозова И.В., Павлов А.С. Создание сетевой модели на основе универсальной последовательности строительных работ // Строительство: наука и образование. 2020. Т. 10. № 3. С. 1–16. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.3.1
8. Соболев В.В., Герасименков Р.Н., Химичев З.К. Информационное моделирование взаимосвязей между параметрами фронта работ // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2008. № S1. С. 16–19.
9. Соболев В.В. Информационное моделирование при разработке проектов организации строительства и проектов производства работ // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2008. № S1. С. 31–35.
10. Kuzhin M., Zhadanovsky B., Kudryashov M., Granilshchikova E. The organizational process in construction using information modeling technologies // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 91. P. 08032. DOI: 10.1051/e3sconf/20199108032
11. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: учебник. М. : ВШ, 1985. 270 с.
12. Sokolnikov V., Osipenkova I., Stupakova O., Motylev R., Nurgalina R. Information models of structures and modeling in construction // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. P. 09016. DOI: 10.1051/e3sconf/202127409016
13. Anderson S., Molenaar K., Schexnayder C. Right-of-way methods and tools to control project cost escalation // NCHRP Synthesis 132, Transportation Research Board National Academies. 2009.
14. Atkinson R. Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, it's time to accept other success criteria // International Journal of Project Management. 1999. Vol. 17. Issue 6. Pp. 337–342. DOI: 10.1016/s0263-7863(98)00069-6
15. Batson R. Project risk identification methods for construction planning and execution // Construction Research Congress 2009. 2009. DOI: 10.1061/41020(339)76
16. El-Rayes K., Moselhi O. Optimizing resource utilization for repetitive construction projects // Journal of Construction Engineering and Management. 2001. Vol. 127. Issue 1. Pp. 18–27. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(2001)127:1(18)
17. Gil N., Tether B.S. Project risk management and design flexibility: Analysing a case and conditions of complementarity // Research Policy. 2011. Vol. 40. Issue 3. Pp. 415–428. DOI: 10.1016/j.respol.2010.10.011
18. Saatti T.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети. М. : ЛКИ, 2008. 360 с.
19. Hagiu A., Wright J. Multi-sided platforms // International Journal of Industrial Organization. 2015. Vol. 43. Pp. 162–174. DOI: 10.1016/j.ijindorg.2015.03.003
20. Qian F., Zhong W., Du W. Fundamental theories and key technologies for smart and optimal manufacturing in the process industry // Engineering. 2017. Vol. 3. Issue 2. Pp. 154–160. DOI: 10.1016/j.ENG.2017.02.011
21. Shaabany G., Grimm M., Anderl R. Secure Information Model for Data Marketplaces enabling Global Distributed Manufacturing // Procedia CIRP. 2016. Vol. 50. Pp. 360–365. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.003
22. Вебстер А., Сеге Г. Дифференциальные уравнения в частных производных математической физики. Ч. 1. М. ; Л. : ОНТИ, 1934. 285 с.
23. Сокольников В.В. Моделирование организации работ на основе концепции физического строительного потока // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 1 (72). С. 94–99. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-1-94-99

Поступила в редакцию 16 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 17 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 17 октября 2022 г.

О Б А В Т О Р Е: **Владимир Вячеславович Сокольников** — кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 526448, Scopus: 57202821958, ResearcherID: ABA-8338-2021, ORCID: 0000-0003-3768-2079; vschief@yandex.ru.

REFERENCES

1. Bovteev S.V. Visualization of the construction process of buildings and structures. *Innovative methods of organization of construction production : materials of the All-Russian scientific and practical conference*. 2020; 3-8. (rus.).
2. Bolotin S.A., Dadar A.Kh., Ptuhina I.S. Simulation of calendar planning in Building information modelling programmes and regression detailing of construction perio.rules. *Magazine of Civil Engineering*. 2011; 7(25):82-86. (rus.).
3. Bolotin S.A., Dadar A.Kh., Ptukhina I.S. Development of the pert method for statistical simulation of calendar plans. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 2(31):132-138. (rus.).
4. Bolotin S.A., Dadar A.Kh., Kotovskaya M. The model of the space-time analogy in the optimization of the renovation order of buildings. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 7(42):51-57. DOI: 10.5862/MCE.42.7 (rus.).
5. Kostyuchenko V.V., Kudinov D.O. Organizational and technical modeling of design and construction systems. *Engineering Journal of Don*. 2012; 3(21):731-734. (rus.).
6. Krivoy S.A., Syomin A.I., Popov A.V., Bebyakin B.O. Connection of BIM uses within the investment project. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2018; 2(65):20-39. DOI: 10.18720/CUBS.65.2 (rus.).
7. Karakozova I.V., Pavlov A.S. Creation of a network model on the basis of a universal sequence of construction works. *Construction: Science and Education*. 2020; 10(3):1-16. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.3.1 (rus.).
8. Sobolev V.V., Gerasimenkov R.N., Himshev Z.K. Information modeling of interrelations between the parameters of the work front. *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*. 2008; S1:16-19. (rus.).
9. Sobolev V.V. Information modeling in the development of construction organization projects and work projects. *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*. 2008; S1:31-35. (rus.).
10. Kuzhin M., Zhadanovsky B., Kudryashov M., Granilshchikova E. The organizational process in construction using information modeling technologies. *E3S Web of Conferences*. 2019; 91:08032. DOI: 10.1051/e3sconf/20199108032
11. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. *Modeling of systems*. Moscow, HSE, 1985; 270. (rus.).
12. Sokolnikov V., Osipenkova I., Stupakova O., Motylev R., Nurgalina R. Information models of structures and modeling in construction. *E3S Web of Conferences*. 2021; 274:09016. DOI: 10.1051/e3sconf/202127409016
13. Anderson S., Molenaar K., Schexnayder C. Right-of-way methods and tools to control project cost escalation. *NCHRP Synthesis 132, Transportation Research Board National Academies*. 2009.
14. Atkinson R. Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, it's time to accept other success criteria. *International Journal of Project Management*. 1999; 17(6):337-342. DOI: 10.1016/s0263-7863(98)00069-6
15. Batson R. Project risk identification methods for construction planning and execution. *Construction Research Congress 2009*. 2009. DOI: 10.1061/41020(339)76
16. El-Rayes K., Moselhi O. Optimizing resource utilization for repetitive construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2001; 127(1):18-27. DOI: 10.1061/(asce)0733-9364(2001)127:1(18)
17. Gil N., Tether B.S. Project risk management and design flexibility: Analysing a case and conditions of complementarity. *Research Policy*. 2011; 40(3):415-428. DOI: 10.1016/j.respol.2010.10.011
18. Saati T.L. *Decision making under dependencies and feedbacks: analytical networks*. Moscow, LKI, 2008; 360. (rus.).
19. Hagi A., Wright J. Multi-sided platforms. *International Journal of Industrial Organization*. 2015; 43:162-174. DOI: 10.1016/j.ijindorg.2015.03.003
20. Qian F., Zhong W., Du W. Fundamental theories and key technologies for smart and optimal manufacturing in the process industry. *Engineering*. 2017; 3(2):154-160. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.02.011
21. Shaabany G., Grimm M., Anderl R. Secure information model for data marketplaces enabling global distributed manufacturing. *Procedia CIRP*. 2016; 50:360-365. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.003
22. Webster A., Sege G. *Partial differential equations of mathematical physics. Part 1*. Moscow ; Leningrad, ONTI, 1934; 285. (rus.).
23. Sokolnikov V.V. Modeling of work organization based on the concept of physical construction stream. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 1(72):94-99. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-1-94-99 (rus.).

Received September 16, 2022.

Adopted in revised form on October 17, 2022.

Approved for publication on October 17, 2022.

BIO NOTES: **Vladimir V. Sokolnikov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Organization; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RISC: 526448, Scopus: 57202821958, ResearcherID: ABA-8338-2021, ORCID: 0000-0003-3768-2079; vschief@yandex.ru.

Оценка рисков информационной безопасности строительных предприятий

Наталья Николаевна Щепкина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Условия нестабильной мировой экономики, обусловленные макроэкономической и геополитической неопределенностью, выдвигают новые требования к обеспечению информационной безопасности (ИБ) предприятий различных секторов экономики, результатом которых является иное видение проблемы оценки рисков ИБ. Проданализированы используемые системы оценки риска ИБ в международной практике, на этой основе выявлены их недостатки, которые взяты автором за основу при выборе подхода к оценке риска ИБ. Выбранный подход к оценке риска ИБ в соответствии с международным стандартом FAIR применительно к строительным предприятиям основан на факторном анализе риска ИБ.

Материалы и методы. Применялись методы исследований, входящие в группу аналитических методов (анализ, классификация, сравнительный анализ), которые позволили обеспечить интегрированное решение относительно выбора подхода к оценке рисков ИБ строительного предприятия в соответствии с международным стандартом FAIR. Использовались российская нормативно-законодательная база в сфере оценки рисков ИБ, международные стандарты к оценке рисков ИБ, а также информация из открытых российских и зарубежных источников.

Результаты. Последовательное решение поставленных задач способствовало выбору подхода к оценке рисков ИБ в соответствии с международным стандартом FAIR и формированию набора факторов для возможности проведения факторного анализа рисков ИБ строительного предприятия. Предлагаемая система факторов учитывает накопленный практический опыт обеспечения ИБ предприятиями различных сфер деятельности и актуальные теоретические разработки, представленные в научных работах.

Выводы. В процессе анализа предметной области выявлены и решены задачи, которые обеспечивают выбор подхода к оценке рисков ИБ строительных предприятий, фокусирующего в себе качественную и количественную оценку факторов, обуславливающих возникновение рисков ИБ в соответствии с международным стандартом FAIR.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационная безопасность, риск, оценка риска, метод, факторы, вероятность, ущерб

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Щепкина Н.Н. Оценка рисков информационной безопасности строительных предприятий // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1574–1585. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1574-1585

Автор, ответственный за переписку: Наталья Николаевна Щепкина, schepkinann@mgsu.ru.

Assessment of information security risks for construction enterprises

Natalia N. Shchepkina

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

ABSTRACT

Introduction. The instability of the global economy, caused by the macroeconomic and geopolitical uncertainty, put forward new information security (IS) requirements applicable to enterprises operating in various industries. The result is a different vision of the problem of IS risk assessment. Systems of IS risk assessment used in international practice were analyzed; their weaknesses were identified in this article. These weaknesses were used by the author as the basis for choosing an approach to IS risk assessment. The approach chosen to assess the IS risk in accordance with the international FAIR standard was based on the factor analysis of the IS risk.

Materials and methods. The author used the research techniques that belong to the group of analytical methods (analysis, classification, and comparative analysis). They allow developing an integrated solution in terms of the choice of an approach to the IS risk assessment for a construction enterprise in accordance with the FAIR international standard. The Russian IS risk assessment regulatory and legal framework, international IS risk assessment standards, as well as information taken from open-access Russian and foreign sources were used.

Results. A consistent solution contributed to the choice of an approach to the IS risk assessment in accordance with the international FAIR standard and the formation of a set of factors needed for a factor analysis of IS risks typical for a construction enterprise. The proposed system of factors takes into account the practical experience, accumulated by IS enterprises operating in various industries and relevant theoretical developments presented in research papers.

Conclusions. In the course of analyzing the problem in question, the author succeeded at choosing an approach to IS risk assessment at construction enterprises. This approach encompasses a qualitative and quantitative assessment of factors triggering IS risks in accordance with the international FAIR standard.

KEYWORDS: information security, risk, risk assessment, method, factors, probability, damage

FOR CITATION: Shchepkina N.N. Assessment of information security risks for construction enterprises. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1574-1585. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1574-1585 (rus.).

Corresponding author: Natalia N. Shchepkina, schepkinann@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях нестабильной мировой экономики, обусловленной макроэкономической и геополитической неопределенностью, вопрос обеспечения информационной безопасности (ИБ) предприятий приобретает все большую актуальность. Развитие информационного общества создает не только новые возможности для экономического роста, но и новые угрозы ИБ. На сегодняшний день предприятия становятся более уязвимыми к угрозам ИБ из-за растущей зависимости от компьютеров, сетей, программ и приложений, социальных сетей и данных. Нарушения безопасности могут негативно сказаться на деятельности предприятий и их клиентах как в финан-

совом, так и в репутационном плане. При этом одной из важнейших составляющих обеспечения информационной безопасности предприятия является оценка рисков ИБ.

По результатам исследования «Риск в фокусе на 2023 год», проведенного Европейской конференцией институтов внутреннего аудита (ЕСПА), были определены ожидаемые риски, с которыми могут столкнуться предприятия различных секторов экономики в ближайшие 5 лет (рис. 1).

По прогнозам респондентов, принявших участие в исследовании, в топ-5 рисков в 2023 г. войдут такие риски, как риск ИБ; управление кадрами; макроэкономическая и геополитическая неопределенность; измене-

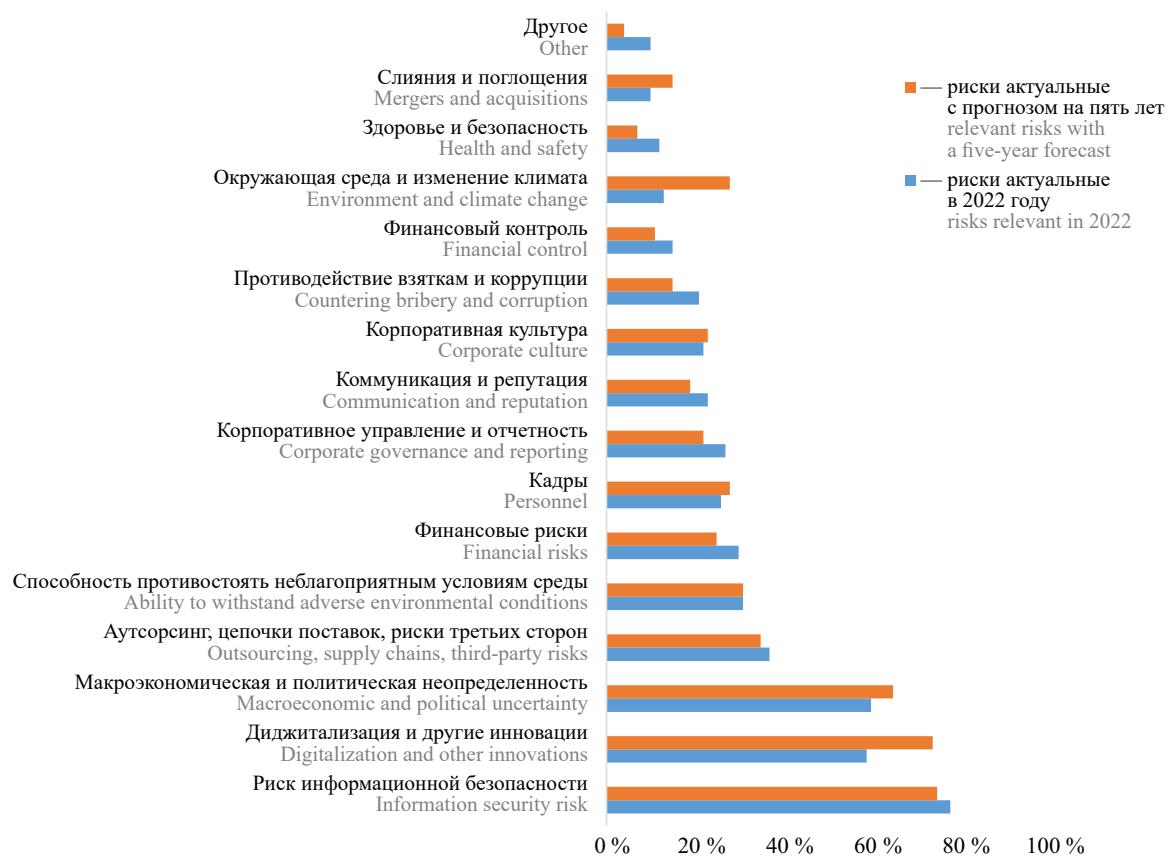


Рис. 1. Ожидаемые риски, с которыми могут столкнуться предприятия в ближайшие 5 лет¹ (рисунок автора на основе данных, представленных в исследовании «Риск в фокусе на 2023 год»)

Fig. 1. Anticipated risks that enterprises may face in the next 5 years¹ (constructed by the author on the basis of the data presented in the study “Risk in focus for 2023”)

¹ Новый Европейский отчет «Риск в фокусе»: видение 2023 года. URL: https://www.iaa-ru.ru/inner_auditor/publications/articles/risk-management/novyy-otchet-risk-v-fokuse-videnie-2023/

нения в законодательных и нормативных актах; цифровые изменения; новые технологии и искусственный интеллект.

Исследование уровня информационной безопасности в компаниях России и СНГ за 2021 г., представленное аналитиками «СерчИнформ», также свидетельствует о высокой опасности рисков ИБ для предприятий различных сфер деятельности. В исследовании, направленном на оценку уровня информационной защиты и подходов к вопросам ИТ-безопасности, приняли участие 1286 человек: начальники и сотрудники подразделений, занимающихся информационной безопасностью, эксперты отрасли и руководители организаций из коммерческой (74 %), государственной (24 %) и некоммерческой сфер (2 %). Подавляющее большинство специалистов (75 % опрошенных) уверены, что внутренние инциденты создают главные риски ИБ. Пятая часть опрошенных называет среди распространенных инцидентов атаки внешних злоумышленников через сотрудников. Утечки информации и рискованное поведение сотрудников, которое может привести к нарушению, — самые распространенные выявленные инциденты, их фиксирует 60 % опрошенных. Также респонденты отметили рост попыток «слива» всех типов данных в 2021 г.² (рис. 2), особенно заметна динамика по попыткам «слива» клиентских баз, за два года их число выросло на 17 %.

Исследование охватило многие сегменты экономики, в том числе и строительство. Вместе с тем обеспечение ИБ в строительстве имеет специфику, обусловленную наличием особенных конфиденциальных данных, таких как техническая и маркетинговая информация с очень длительным циклом подготовки, раскрытие которой раньше определенного срока может подорвать целые проекты. К наиболее распространенным нарушениям в сфере ИБ строительных предприятий можно отнести: выявление фактов закупки заведомо некачественных материалов из-за халатности, «по знакомству», в результате взятки; несанкционированное

использование (распространение) готовых проектов и сметной документации; несанкционированное разглашение информации о продаже участков под застройку до официального опубликования; скрытие фактов нарушения охраны труда.

В этой связи критичной становится роль анализа и управления рисками ИБ при создании комплексной системы ИБ строительного предприятия, как инструмента выбора необходимых и достаточных, а также экономически обоснованных мер и средств защиты информации. Катализатором в вопросах управления рисками ИБ является организация эффективной системы мониторинга рисков ИБ, ориентированная на предупреждение рисков ИБ и сокращение негативного воздействия в случае их наступления. Ввиду этого особое значение приобретает необходимость пересмотра подхода к оценке рисков ИБ с ориентацией на его количественную оценку, значимость которой в рассмотренном контексте все возрастает.

На сегодняшний день большая часть трудов российских авторов в исследуемой области посвящена качественным методам оценки рисков ИБ, тема же количественной оценки рисков в отечественной литературе освещена недостаточно. Среди российских ученых, труды которых посвящены различным аспектам оценки рисков ИБ, стоит отметить В.Н. Максименко, Е.В. Ясюка [1]; Н.Н. Пашкова, В.Г. Дрозда [2], А.С. Римши [3], О.Ю. Губареву [4]; А.В. Слепова, С.Л. Зефирова [5]. Значительная часть исследований в сфере оценки рисков ИБ принадлежит зарубежным авторам. Вопросам применения различных программных продуктов для оценки рисков ИБ посвящены работы К. Razikin, B. Soewito [6]; F.A. Shaikh, M. Siponen [7]; C. Schmitz, S. Pape [8]; P. Loft, Y. He, I. Yevseyeva, I. Wagner [9]; A. Irsheida, A. Murada, M. AlNajdawia, A. Qusefa [10]. Оценка рисков ИБ в различных отраслях промышленности представлена в работах Y. Dong, B. Sun, G. Wang [11], K. Bernsmed, G. Bour, M. Lundgren, E. Bergström [12],

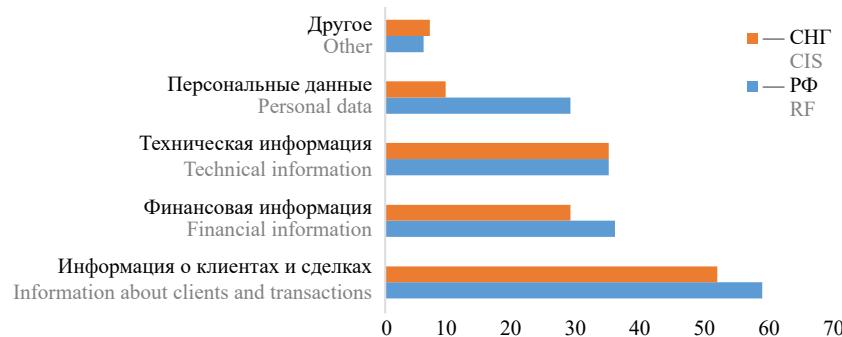


Рис. 2. Типы данных, которые утекали с предприятий, % респондентов (рисунок автора на основании данных Глобального исследования уровня информационной безопасности в компаниях России и СНГ за 2021 год)

Fig. 2. Types of data that leaked from enterprises, % of respondents (made by the author using the data from the Global Study of the Level of Information Security in Russian and CIS Companies in 2021)

² Глобальное исследование уровня информационной безопасности в компаниях России и СНГ за 2021 год. URL: urvey-global-2021/

P. Grace, V.R. Renjith [13], J. Alanen, J. Linnosmaa, T. Malm, N. Papakonstantinou, T. Ahonen, E. Heikkilä и соавт. [14], O. Ryazanova, A. Timin [15], B. Gunes, G. Kayisoglu, P. Bolat [16] и др. [17–19]. Однако, отмечая вклад зарубежных ученых, необходимо заметить, что полученные ими результаты требуют определенной систематизации и адаптации к специфике российских предприятий в вопросах оценки рисков ИБ. В этой связи в проведенном исследовании автор сконцентрировал свое внимание на возможности применения количественной оценки рисков ИБ в практической деятельности строительных предприятий.

Предмет исследования — процесс оценки риска ИБ, характеризующий проблемную область исследования. Цель исследования — выбор подхода к оценке риска ИБ строительного предприятия, обеспечивающего управляемость, основанную на цифрах для при-

ятия управленческих решений в области управления рисками.

Для достижения поставленной цели автором сформулированы несколько логически взаимосвязанных задач, последовательное решение которых позволило получить новые научные результаты:

- провести анализ существующих стандартов к оценке риска ИБ;
- выбрать подход к оценке риска ИБ;
- определить факторное пространство для оценки риска ИБ.

Решение поставленных задач осуществлялось в рамках выполнения трех последовательных этапов (табл. 1).

Первый этап — исследование информационных источников. Направлен на сбор и обработку информации, актуальной для оценки риска ИБ в российских и зарубежных изданиях.

Табл. 1. Логическая последовательность решения задач исследования

Table 1. Logical sequence of solving research problems

Задачи Tasks	Этап 1 Stage 1	Этап 2 Stage 2	Этап 3 Stage 3
	Исследование информационных источников Research of information sources	Анализ и систематизация собранной информации Analysis and systematization of the collected information	Формирование подхода к оценке рисков ИБ строительного предприятия Development of an approach to assessing the risks of information security for a construction company
1. Провести анализ существующих стандартов к оценке риска ИБ 1. Analyze current IS risk assessment standards	Определение нормативно-правовых актов, открытых российских и зарубежных источников, актуальных для оценки риска ИБ Identification of legal acts, open-access Russian and foreign sources that are relevant for IS risk assessment	Анализ и систематизация стандартов к оценке рисков ИБ. Определение стандарта, позволяющего делать количественную оценку риска ИБ Analysis and systematization of standards for IS risk assessment. Identification of a standard that allows for the quantitative assessment of the IS risk	Обоснование выбранного стандарта для оценки рисков ИБ Justification of the standard chosen for the IS risk assessment
2. Выбрать подход к оценке риска ИБ 2. Choose an approach to IS risk assessment	Определение стандартов, значимых для оценки риска ИБ Identification of standards relevant for IS risk assessment	Анализ и систематизация подходов к оценке рисков ИБ. Определение недостатков в качественной оценке рисков ИБ Analysis and systematization of approaches to IS risk assessment. Identification of weaknesses in the qualitative assessment of IS risks	Обоснование выбранного подхода к оценке рисков ИБ Justification of an approach chosen for the IS risk assessment
3. Определить факторное пространство для оценки риска ИБ 3. Identify the factor space for assessing the IS risk	Определение источников, значимых для факторного анализа рисков ИБ Identification of sources significant for factor analysis of IS risks	Анализ и систематизация факторов, способствующих возникновению рисков ИБ. Определение возможности количественной оценки факторов Analysis and systematization of factors contributing to the emergence of IS risks. Identifying the feasibility of the quantitative assessment of factors	Систематизированное представление факторов, способствующих возникновению рисков ИБ согласно стандарту FAIR A systematic presentation of factors that contribute to the emergence of information security risks according to the FAIR standard

Второй этап — анализ и систематизация собранной информации. Ориентирован на систематизацию подходов к оценке риска ИБ, представленных в международных и российских стандартах.

Третий этап — формирование подхода к оценке риска ИБ строительного предприятия. Фокусирует результаты первых двух этапов на возможности применения для оценки риска ИБ подхода, интегрирующего качественную и количественную оценку факторов, обуславливающих возникновение риска ИБ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование автором открытых российских и зарубежных источников, значимых для оценки риска ИБ, показало, что активная работа в направлении оценки информационных рисков началась в конце XX в. Международной организацией по стандартизации ISO был разработан ряд международных стандартов, регламентирующих управление ИТ-безопасностью, например ISO/IEC TR 13335-3:1998. Данные стандарты легли в основу действующего на сегодняшний момент в Евросоюзе международного стандарта ISO/IEC 27005:2022³.

К настоящему времени в большинстве стран применяются различные стандарты оценки рисков ИБ. Среди наиболее распространенных в зарубежной практике стоит отметить стандарт OCTAVE (Operationally Critical Threat, Asset, and Vulnerability Evaluation), разработанный Университетом Карнеги — Меллона в 2007 г., актуальной версии которого является стандарт OCTAVE Allegro⁴; стандарт FRAP (Facilitated Risk Analysis Process)⁵, разработанный компанией Peltier and Associates в 2000 г.; стандарт FAIR (Factor Analysis of Information Risk)⁶, разработанный Risk Management Insight.

В российской практике также есть инициативы в области оценки рисков ИБ. Стоит отметить большую работу Центрального банка Российской Федерации, разработавшего стандарт «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации / Общие положения» СТО БР ИББС-1.0-2014 от 17.05.2014 № Р-399⁷ и Положение Банка России от 8.04.2020 № 716-П «О требованиях к системе управления операционным риском в кредитной организации и банковской группе»⁸, в котором определены требования

к управлению рисками ИБ, в том числе и киберрискаами. В современных условиях тема информационной безопасности и киберрисков развивается в РФ достаточно быстро, но вместе с тем существует много сложностей, связанных с терминологией, подходами к оценке рисков ИБ, формированием статистических данных о случившихся инцидентах.

Анализ представленных выше материалов показал, что имеется высокая степень проработанности вопросов оценки рисков ИБ, которые представилось возможным систематизировать в настоящем исследовании (табл. 2).

Важно отметить, что исследованные материалы показали различие подходов к оценке риска ИБ. В частности, стандарты ISO/IEC 27005:2022, FRAP, OCTAVE ориентированы на качественную оценку риска ИБ. Единственный международный стандарт, предусматривающий количественную оценку риска ИБ, — стандарт FAIR. Стандарт Банка России предполагает качественную и количественную оценку риска для организаций банковской системы РФ.

Переход к следующей задаче исследования, связанной с выбором подхода к оценке риска ИБ, обусловил необходимость получения материалов относительно современной практики оценки рисков. При рассмотрении вопроса управления рисками ИБ обнаруживается большое количество проблем, основанных на использовании устоявшихся классических определений, к которым привыкли риск-менеджеры и часто применяют российские предприятия. Классический подход, который строится на качественной оценке рисков и используется в том числе для оценки рисков ИБ, определяет риск как вероятность наступления какого-либо события и его влияния на бизнес (в узком смысле: ущерба — результата негативного влияния), которые оценивают по универсальной шкале из трех позиций — низкая, средняя, высокая вероятность и соответственно низкий, средний, высокий ущерб. Их произведение дает определенную матрицу, на основе которой принимаются управленческие решения.

Вместе с тем классический подход к оценке рисков имеет ряд недостатков. Он не предоставляет возможности, во-первых, управлять рисками на основе конкретных цифр, во-вторых, точно оценить, что может произойти. Довольно часто можно видеть, что категории «низкая», «средняя», «высокая» отли-

³ ISO/IEC 27005:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection — Guidance on managing information security risks.

⁴ Introducing OCTAVE Allegro: Improving the Information Security Risk Assessment Process. URL: https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/TechnicalReport/2007_005_001_14885.pdf

⁵ Facilitated Risk Analysis Process. URL: specialists/article/5194/587935/

⁶ Factor Analysis of Information Risk. URL: <https://www.fairinstitute.org/what-is-fair>

⁷ Стандарт Банка России СТО БР ИББС-1.0-2014. Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации / Общие положения : принят и введен в действие распоряжением Банка России от 17.05.2014 № Р-399. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70567254/>

⁸ Положение Банка России от 8.04.2020 № 716-П. О требованиях к системе управления операционным риском в кредитной организации и банковской группе. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74179372/#review>

Табл. 2. Сравнительная характеристика стандартов к оценке рисков ИБ
 Table 2. Comparative characteristics of standards for the assessment of information security risks

Критерий сравнения Comparison criterion	Стандарты для оценки рисков ИБ IS risk assessment standards			
	ISO/IEC 27005:2022	FRAP	СТО БР ИБВС 716-II Standard of the Bank of Russia governing the information security of bank organizations in the Russian Federation 716-P	OCTAVE Allegro FAIR
Сфера применения стандарта Scope of the standard application	Предприятия различных сфер деятельности и размеров Enterprises having various fields of focus and sizes	Предприятия различных сфер деятельности и размеров Enterprises having various fields of focus and sizes	Организации банковской системы Organizations of the banking system	Предприятия различных сфер деятельности и размеров Enterprises having various fields of focus and sizes
Сложность применения Difficulty of application	Необходимы большие затраты на внедрение стандарта и высококвалифицированные сотрудники High cost of implementation of the standard; highly qualified employees required	Затраты на внедрение несущественны, но требуются высококвалифицированные сотрудники Implementation costs are insignificant, but necessary highly qualified employees	Необходимы большие затраты на внедрение стандарта и высококвалифицированные сотрудники High cost of implementation of the standard; highly qualified employees required	Затраты на внедрение несущественны, но требуются высококвалифицированные сотрудники Implementation costs are insignificant, but necessary highly qualified employees
Наличие шкал для оценки рисков ИБ Availability of scales for assessing IS risks	Содержит Available	Содержит Available	Содержит Available	Содержит Available
Наличие методик обработки рисков ИБ Availability of information security risk treatment methods	Содержит Available	Не содержит Not available	Содержит Available	Не содержит Not available

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Критерий сравнения Comparison criterion		Стандарты для оценки рисков ИБ IS risk assessment standards			
ISO/IEC 27005:2022	FRAP	СТО БР ИББС 716-П Standard of the Bank of Russia governing the information security of bank organizations in the Russian Federation 716-P	OCTAVE Allegro	FAIR	
Согласованность с нормативно-правовыми актами РФ Consistency with regulatory legal acts of the Russian Federation	Необходима согласованность с нормативно-правовыми актами РФ. Российский ГОСТ не обновлялся с 2010 г., требует актуализации Consistency with regulatory legal acts of the Russian Federation is required. Russian GOST has not been updated since 2010, needs to be updated	Требуется согласованность с нормативно-правовыми актами РФ Consistency with regulatory legal acts of the Russian Federation is required	СТО БР ИББС входит в перечень стандартов РФ (добровольных). 716-П является обязательным положением для кредитных организаций и банковской группы Standard of the Bank of Russia governing the information security of bank organizations in the Russian Federation is included in the list of Russian standards (voluntary). 716-P is a mandatory provision for credit institutions and the banking group	Необходима согласованность с нормативно-правовыми актами РФ Consistency with regulatory legal acts of the Russian Federation is required	Требуется согласованность с нормативно-правовыми актами РФ Consistency with regulatory legal acts of the Russian Federation is required
Связанность со смежными методологиями (IT, общие риски, экономические риски и др.) Linkage with related methodologies (IT, general risks, economic risks, etc.)	Входит в серию стандартов ISO по управлению рисками Part of the ISO risk management series	Не имеет связности со смежными методологиями Has no connection with related methodologies	Входит в серию не поддерживаемых стандартов СТО БР. 716-П предъявляет требования к системе управления операционными рисками, в том числе рисками ИБ Included in a series of unsupported STO BR standards. 716-P imposes requirements on the operational risk management system, including information security risks	Содержит несколько методик оценки рисков, которые применяются в зависимости от размера предприятия и целей оценки рисков Contains several risk assessment methodologies that are applied depending on the size of an enterprise and risk assessment objectives	Не имеет связности со смежными методологиями Has no connection with related methodologies
Методы оценки рисков Risk assessment methods	Качественная оценка рисков Qualitative risk assessment	Качественная и количественная оценка рисков Qualitative and quantitative risk assessment	Качественная оценка рисков Qualitative risk assessment	Качественная оценка рисков Qualitative risk assessment	Количественная оценка рисков Qualitative and quantitative risk assessment

чаются значительно даже в рамках одной градации. Например, низким ущербом на предприятии может считаться ущерб от 1 до 10 млн руб. При оценке риска отсутствует понимание: сумма ущерба ближе к 1 или к 10 млн. Данная ситуация наблюдается при оценке одного риска, а если у предприятия таких рисков 10 или 100. Все это свидетельствует о том, что градус неопределенности, ширина спектра, возможных потерь — огромны, несмотря на то, что риски оценены всеми как низкие. При таких условиях управлять рисками невозможно, что свидетельствует об отсутствии управляемости, основанной на цифрах, фактах. В настоящее время есть инициативы, которые позволяют риск ИБ рассматривать более детально, чем просто вероятность и ущерб, но это, в свою очередь, приводит к определенным сложностям.

С учетом вышеизложенного для оценки рисков ИБ предлагается использовать стандарт FAIR, который широко применяется для управления риска в целом и ориентирован на количественную оценку риска. Стандарт FAIR содержит детальную классификацию факторов, обуславливающих возникновение риска, определяет их влияние друг на друга и взаимосвязи между ними. Это позволяет адекватно оценивать частоту реализации рисков и масштабы потерь — именно то, что чаще всего вызывает сложности, которые будут рассмотрены далее в рамках исследования.

Для решения задачи по установлению факторного пространства консолидировалась информация проведенного анализа открытых источников в сфере оценки рисков ИБ. Наиболее значимые выявленные факторы были адаптированы для оценки рисков ИБ в соответствии с международным стандартом FAIR. Факторы, влияющие на оценку рисков ИБ, определены на основе сложностей, с которыми сталкиваются предприятия при внедрении факторной оценки риска ИБ.

В ходе работы на определенных этапах автором широко применялись методы исследований, входящих в группу аналитических методов (анализ, классификация, сравнительный анализ и др.), которые дали возможность обеспечить интегрированное решение относительно предложенного факторного анализа рисков ИБ на базе международного стандарта FAIR. В частности, на основе метода анализа применяющихся стандартов в международной и российской практике выделен стандарт FAIR, ориентированный не на комплексное управление рисками ИБ, как многие стандарты, а непосредственно на оценку рисков ИБ. Использование методов анализа и классификации информации позволило собрать в единую систему имеющуюся информацию по оценке рисков ИБ, упорядочить значительный информационный ресурс и определиться относительно факторного пространства для оценки рисков ИБ. Это дало возможность формирования на этой основе подхода к оценке рисков ИБ, интегрировавшего в себя как качественную, так

и количественную оценку факторов, способствующих возникновению рисков ИБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представим ключевые результаты, которые получены в процессе исследования собранного материала с помощью рассмотренных методов, позволивших сформировать перечень факторов, способствующих возникновению риска ИБ и влияющих на оценку рисков ИБ, что дало возможность решить все поставленные в исследовании задачи.

Применение международного стандарта FAIR предлагает классические компоненты риска (вероятность и ущерб) раскладывать на ряд факторов. При этом вероятность наступления рискового события ИБ предлагается складывать из некой угрозы (внешнего влияния фактора) и уязвимости (внутреннего состояния информационной системы предприятия). В свою очередь, эти два фактора также раскладываются на угрозу и уязвимость. Угроза — это что-то, что может произойти вследствие действия внешней стороны. При этом внешняя сторона рассматривается достаточно условно как внешняя, так как внутреннего нарушителя никто не отменял. Например, обиженный сотрудник, которому не дали повышение, забирает клиентскую базу и увольняется. Действие угрозы предлагается рассматривать по двум факторам: частота контакта (т.е. как часто: предприятие сталкивается с такой угрозой, обращают внимание на предприятие злоумышленники, сотрудники могут захотеть навредить) и вероятность действия от такой угрозы (т.е. с какой вероятностью будет что-то сделано этой угрозой). Такой подход предоставляет примерную возможность оценить, кто и насколько часто может захотеть пробовать навредить предприятию. В качестве угрозы можно рассматривать каждого отдельного сотрудника.

Далее более детально рассмотрим такой фактор, как уязвимость. Под уязвимостью подразумевается некое состояние, которое позволяет угрозе реализовать свой замысел. Уязвимость также предлагается рассматривать по двум факторам — возможности нарушителя и степени защищенности. Если говорить о возможности нарушителя, то нетрудно оценить, что какие-то хакеры-энтузиасты, например вчерашние школьники-программисты или студенты, обладают неизмеримо меньшими возможностями и навыками, чем хакерские организации, которые целенаправленно ведут свою деятельность против конкретных предприятий. В свою очередь оценка этих возможностей предоставляет возможность ранжировать потенциальных злоумышленников. Вторым фактором, влияющим на уязвимость, является степень защищенности от угроз ИБ, отражающая внутреннее состояние предприятия, т.е. предпринятые меры предприятием для обеспечения ИБ (внедренные процессы, контрольные процедуры, средства защиты информации).

Рассматривая понятие ущерба, следует обратить внимание на два его вида: прямой и косвенный. Под прямым ущербом понимается снижение производительности, вызванной простоем, недовыпуском продукции, т.е. это убытки, которые строительное предприятие понесло, недовыполнив обязательства перед клиентами. Сюда также попадают затраты стоимости замены оборудования, испорченного в результате инцидента, затраты на реагирование (в случае, если привлекаются специальные компании, которые будут расследовать эти инциденты, возможный выход сотрудников за дополнительную оплату и т.д.).

Косвенный ущерб оценивать сложнее, по нему, как правило, нет статистических данных, он обладает составляющей «вероятность» — это репутационные потери, связанные с тем, что с информацией об инциденте на предприятии не придут новые клиенты, некие штрафы от регуляторов (например, если произошла утечка персональных данных клиентов, сотрудников, то люди могут обратиться в соответствующие органы и на предприятие будет наложен штраф). В данной ситуации вероятность закладывается в тот фактор, что допустимо из 100 тыс. человек, чьи данные «утекли», не все обратятся в соответствующие органы, кто-то доведет дело до суда, а кто-то нет. Конкурентное преимущество, т.е. условное положение на рынке, также будет подвержено влиянию после информации об инциденте, произошедшем на предприятии.

Однако на основе представленного перечня факторов можно более предметно говорить о том, какой риск ИБ у предприятия (рис. 3).

На рис. 3 представлены факторы, способствующие возникновению риска ИБ, с указанием возможности получения статистических данных либо необходимости проведения экспертной оценки на основании опыта знаний и умений сотрудника, который оценивает риски на предприятии, или внешнего консультанта.

Вместе с тем сбор статистических данных по случившимся инцидентам на предприятии также вызывает ряд сложностей. Если, например, данные о частоте контакта или стоимости реализации инцидента можно получить из имеющейся информации, то в большинстве случаев на практике это не так. На многих предприятиях не собирается информации о том, сколько стоило наступление риска ИБ предприятию. Есть данные, например, о том, что на две недели вышла из строя определенная система, но нет сведений о заработной плате сотрудников, вовлеченных в процесс относительно этого инцидента, объемах недовыпущенной продукции, количестве упущеных клиентов.

Вероятность воздействия злоумышленника, его возможности либо степень защищенности предприятия оценить на данный момент можно только экспертико в каких-то диапазонах, в каких-то допущениях. Все это указывает на те факторы, которые важно учитывать при оценке рисков информационной безопасности (табл. 3).

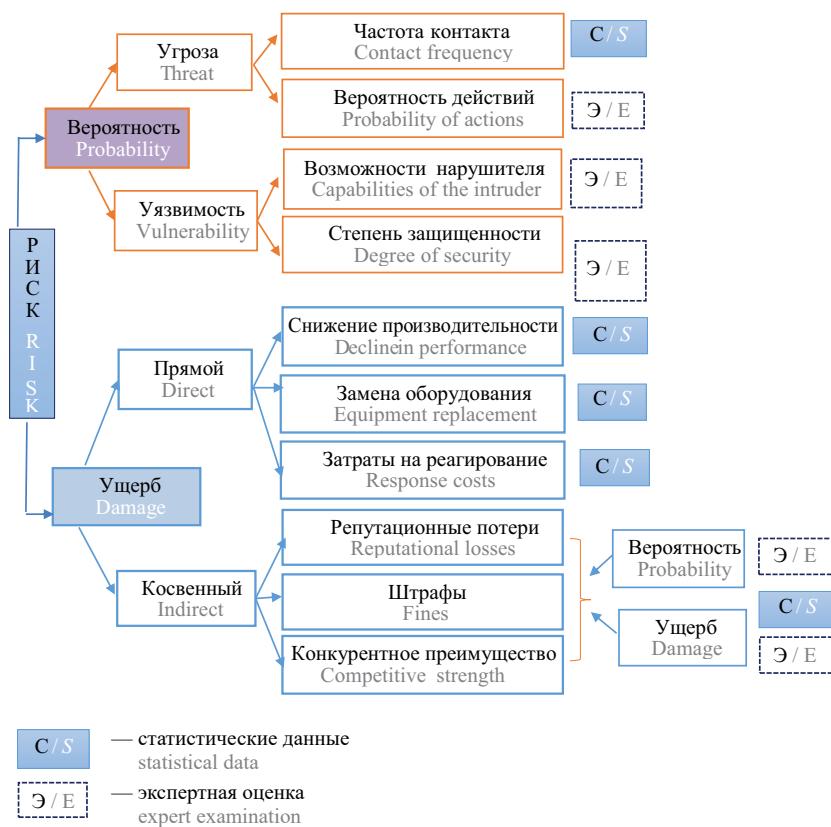


Рис. 3. Факторы риска ИБ в соответствии с международным стандартом FAIR

Fig. 3. IS risk factors according to the FAIR international standard

Табл. 3. Факторы, оказывающие влияние на оценку рисков ИБ

Table 3. Factors influencing the assessment of IS risks

Перечень факторов List of factors	Проблематика оценки факторов Issues of assessing factors
Трудоемкость Labor intensity	Много дискретных изменений: частоту контакта и вероятность воздействия необходимо оценивать для каждого нарушителя в отношении каждого актива Many discrete changes: frequency of contact and likelihood of impact need to be assessed for each perpetrator for each asset
Отсутствие единого подхода к экспертной оценке Lack of a unified approach to peer review	Каким образом оценивать возможности нарушителя? Каким образом оценивать степень защищенности? Как соотнести возможности нарушителя со степенью защищенности? How to assess the capabilities of the offender? How to assess the degree of security? How to correlate the capabilities of the intruder with the degree of security?
Доступность исторических и статистических данных Availability of historical and statistical data	Существует ли достоверная и полная статистика по ущербу от наступивших инцидентов? Структурированы ли эти данные? Как оценить вероятность наступления косвенного ущерба? Are there reliable and complete statistics on damage from incidents? Is this data structured? How to assess the likelihood of collateral damage?

Для того чтобы по стандарту FAIR по всем факторам разложить все риски, потребуется потратить огромное количество времени ввиду того, что частоту контакта и вероятность воздействия необходимо оценивать для каждого нарушителя в отношении каждого внутреннего актива, т.е. информационной системы.

В отношении экспертной оценки стоит отметить, что на данный момент отсутствует единый подход, устоявшийся как в РФ, так и в мировом сообществе, к оценке факторов, представленных на рис. 3 и помеченных как экспертная оценка. Как вариант можно использовать Common Vulnerability Scoring System (CVSS) — общую систему оценки уязвимостей, предназначенную для классификации уязвимостей по шкале критичности от 0 до 10. Однако в практической деятельности предприятий она не получила широкого применения.

Доступность исторических и статистических сведений ограничена на сегодняшний момент на многих строительных предприятиях, что обусловлено отсутствием культуры измерения данных о произошедших инцидентах, их фиксации и систематизации. В лучшем случае есть инициатива отдельных сотрудников, которые разрозненно для себя ведут какие-то сводки, но в едином ключе такую информацию получить, как правило, очень сложно в части рисков ИБ, что приводит к ситуации, требующей экспертной оценки статистических данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе анализа предметной области исследования выявлены и решены задачи, обеспечивающие выбор подхода к оценке рисков ИБ строитель-

ных предприятий, фокусирующего качественную и количественную оценку факторов, обуславливающих возникновение рисков ИБ на основе международного стандарта FAIR.

Первичным вопросом, решенным в исследовании, стало выявление недостатков существующих качественных подходов к оценке рисков ИБ. Определена общая проблематика — отсутствие набора факторов, способствующих возникновению риска ИБ, что нашло отражение в рамках настоящей работы.

С учетом этого важнейшим результатом исследования стала сформированная система факторов с указанием возможности получения статистических данных для количественной оценки факторов либо необходимости проведения экспертной оценки для качественной оценки факторов. Предлагаемая система факторов учитывает накопленный практический опыт обеспечения ИБ предприятиями различных сфер деятельности и актуальные теоретические разработки, представленные в научных работах.

Факторы, влияющие на оценку рисков ИБ, установлены на основе проблем, с которыми сталкиваются предприятия при внедрении факторной оценки риска ИБ, таких как большая трудоемкость, обусловленная множественностью дискретных изменений; отсутствие единого подхода к экспертной оценке; отсутствие исторических и статистических данных.

Прикладная значимость результатов заключается в решении важнейших задач строительных предприятий в области управления рисками ИБ за счет применения оценки рисков ИБ в соответствии с международным стандартом FAIR.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Максименко В.Н., Ярюк Е.В. Основные подходы к анализу и оценке рисков информационной безопасности // Экономика и качество систем связи. 2017. № 2 (4). С. 42–48.
2. Пацков Н.Н., Дрозд В.Г. Анализ рисков информационной безопасности и оценка эффективности систем защиты информации на предприятии // Современные научные исследования и инновации. 2020. № 1 (105). С. 3.
3. Римшиа А.С. Метод и алгоритмы управления рисками информационной безопасности АСУ ТП критических инфраструктур : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2021.
4. Губарева О.Ю. Разработка методики оценки рисков информационной безопасности корпоративных телекоммуникационных сетей : дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2018.
5. Слепов А.В., Зефиров С.Л. Способ риск-ориентированной оценки информационной безопасности организации // Инженеринг и технологии. 2018. Т. 3. № 2. С. 32–35. DOI: 10.21685/2587-7704-2018-3-2-8. URL: https://engineering.pnzgu.ru/files/engineering.pnzgu.ru/iit_2018_vol_3_2_8.pdf
6. Razikin K., Soewito B. Cybersecurity decision support model to designing information technology security system based on risk analysis and cybersecurity framework // Egyptian Informatics Journal. 2022. Vol. 23. Issue 3. Pp. 383–404. DOI: 10.1016/j.eij.2022.03.001
7. Shaikh F.A., Siponen M. Information security risk assessments following cybersecurity breaches: The mediating role of top management attention to cybersecurity // Computers & Security. 2022. Vol. 124. P. 102974. DOI: 10.1016/j.cose.2022.102974
8. Schmitz C., Pape S. LiSRA: Lightweight security risk assessment for decision support in information security // Computers & Security. 2020. Vol. 90. P. 101656. DOI: 10.1016/j.cose.2019.101656
9. Loft P., He Y., Yevseyeva I., Wagner I. CAESAR8: an agile enterprise architecture approach to managing information security risks // Computers & Security. 2022. Vol. 122. P. 102877. DOI: 10.1016/j.cose.2022.102877
10. Irsheida A., Murada A., AlNajdawia M., Qusefa A. Information security risk management models for cloud hosted systems: A comparative study // Procedia Computer Science. 2022. Vol. 204. Pp. 205–217. DOI: 10.1016/j.procs.2022.08.025
11. Dong Y., Sun B., Wang G. Research on modeling method of power system network security risk assessment based on object-oriented Bayesian network // Energy Reports. 2021. Vol. 7. Pp. 289–295. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.10.030
12. Bernsmed K., Bour G., Lundgren M., Bergström E. An evaluation of practitioners' perceptions of a security risk assessment methodology in air traffic management projects // Journal of Air Transport Management. 2022. Vol. 102. P. 102223. DOI: 10.1016/j.jairtranman.2022.102223
13. Grace P., Renjith V.R. Evolution of safety and security risk assessment methodologies towards the use of Bayesian networks in process industries // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 149. Pp. 758–775. DOI: 10.1016/j.psep.2021.03.031
14. Alanen J., Linnosmaa J., Malm T., Papakonstantinou N., Ahonen T., Heikkilä E. et al. Hybrid ontology for safety, security, and dependability risk assessments and Security Threat Analysis (STA) method for industrial control systems // Reliability Engineering & System Safety. 2022. Vol. 220. P. 108270. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108270
15. Ryazanova O., Timin A. Assessment of the state, threats and risks of the economic security system of motor transport enterprises of the Kirov region // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 63. Pp. 1121–1130. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.115
16. Gunes B., Kayisoglu G., Bolat P. Cyber security risk assessment for seaports: A case study of a container port // Computers & Security. 2021. Vol. 103. P. 102196. DOI: 10.1016/j.cose.2021.102196
17. Baybutt P. Issues for security risk assessment in the process industries // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. Vol. 49. Pp. 509–518. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.05.023
18. Matteini A., Argenti F., Salzano E., Cozzani V. A comparative analysis of security risk assessment methodologies for the chemical industry // Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 191. P. 106083. DOI: 10.1016/j.ress.2018.03.001
19. Liang L., Wu X., Deng J., Lv X. Research on risk analysis and governance measures of open-source components of information system in transportation industry // Procedia Computer Science. 2022. Vol. 208. Pp. 106–110. DOI: 10.1016/j.procs.2022.10.017

Поступила в редакцию 21 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 8 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 8 ноября 2022 г.

О Б А В Т О Р Е: Наталья Николаевна Щепкина — 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: 1017109, Scopus: 5720830587, ResearcherID: ABI-3123-2020, ORCID: 0000-0002-3250-6212; natasha.chechkina@mail.ru.

REFERENCES

1. Maksimenko V., Yasyuk Y. Main approaches to the analysis and estimation of risks of information security. *Economics and Quality of Communication Systems*. 2017; 2(4):42-48. (rus.).
2. Pashkov N.N., Drozd V.G. Analysis of information security risks and evaluation of the effectiveness of information security systems at the enterprise. *Modern Scientific Research and Innovation*. 2020; 1(105):3. (rus.).
3. Rimsha A.S. *Method and algorithms of information security risk management of automated process control systems of critical infrastructures : dissertation ... Candidate of Technical Sciences*. Saint Petersburg, 2021. (rus.).
4. Gubareva O.Yu. *Development of a methodology for assessing the risks of information security of corporate telecommunications networks : dissertation ... Candidate of Technical Sciences*. Samara, 2018. (rus.).
5. Slepov A.V., Zefirov S.L. Method for risk-based assessment of organizational information security. *Engineering and Technology*. 2018; 3(2):32-35. DOI: 10.21685/2587-7704-2018-3-2-8 (rus.).
6. Razikin K., Soewito B. Cybersecurity decision support model to designing information technology security system based on risk analysis and cybersecurity framework. *Egyptian Informatics Journal*. 2022; 23(3):383-404. DOI: 10.1016/j.eij.2022.03.001
7. Shaikh F.A., Siponen M. Information security risk assessments following cybersecurity breaches: The mediating role of top management attention to cybersecurity. *Computers & Security*. 2023; 124:102974. DOI: 10.1016/j.cose.2022.102974
8. Schmitz C., Pape S. LiSRA: Lightweight security risk assessment for decision support in information security. *Computers & Security*. 2020; 90:101656. DOI: 10.1016/j.cose.2019.101656
9. Loft P., He Y., Yevseyeva I., Wagner I. CAE-SAR8: an agile enterprise architecture approach to managing information security risks. *Computers & Security*. 2022; 122:102877. DOI: 10.1016/j.cose.2022.102877
10. Irsheida A., Murada A., AlNajdawia M., Qusefa A. Information security risk management models for cloud hosted systems: A comparative study. *Procedia Computer Science*. 2022; 204:205-217. DOI: 10.1016/j.procs.2022.08.025
11. Dong Y., Sun B., Wang G. Research on modeling method of power system network security risk assessment based on object-oriented Bayesian network. *Energy Reports*. 2021; 7:289-295. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.10.030
12. Bernsmed K., Bour G., Lundgren M., Bergström E. An evaluation of practitioners' perceptions of a security risk assessment methodology in air traffic management projects. *Journal of Air Transport Management*. 2022; 102:102223. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2022.102223
13. Grace P., Renjith V.R. Evolution of safety and security risk assessment methodologies towards the use of Bayesian networks in process industries. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 149:758-775. DOI: 10.1016/j.psep.2021.03.031
14. Alanen J., Linnosmaa J., Malm T., Papakonstantinou N., Ahonen T., Heikkilä E. et al. Hybrid ontology for safety, security, and dependability risk assessments and Security Threat Analysis (STA) method for industrial control systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022; 220:108270. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108270
15. Ryazanova O., Timin A. Assessment of the state, threats and risks of the economic security system of motor transport enterprises of the Kirov region. *Transportation Research Procedia*. 2022; 63:1121-1130. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.115
16. Gunes B., Kayisoglu G., Bolat P. Cyber security risk assessment for seaports: A case study of a container port. *Computers & Security*. 2021; 103:102196. DOI: 10.1016/j.cose.2021.102196
17. Baybutt P. Issues for security risk assessment in the process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017; 49:509-518. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.05.023
18. Matteini A., Argenti F., Salzano E., Cozzani V. A comparative analysis of security risk assessment methodologies for the chemical industry. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019; 191:106083. DOI: 10.1016/j.ress.2018.03.001
19. Liang L., Wu X., Deng J., Lv X. Research on risk analysis and governance measures of open-source components of information system in transportation industry. *Procedia Computer Science*. 2022; 208:106-110. DOI: 10.1016/j.procs.2022.10.017

Received October 21, 2022.

Adopted in revised form on November 8, 2022.

Approved for publication on November 8, 2022.

BIO NOTES: **Natalia N. Shchepkina** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1017109, Scopus: 5720830587, ResearcherID: ABI-3123-2020, ORCID: 0000-0002-3250-6212; natalia.chepkina@mail.ru.

Значение и перспективы применения инновационных материалов и технологий в жилищном строительстве

Елена Юрьевна Васильева

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

АНОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются тенденции и перспективы применения инноваций в жилищном строительстве (ЖС) РФ.

Материалы и методы. Использованы системный подход, методы структурного анализа, методы классификации и группировок, сравнительный и статистический анализ и прогнозирование, методы экспертных оценок. Материалом для исследования послужили работы отечественных и зарубежных авторов, опыт строительных компаний, статистика Росстата, информация Агентства инноваций г. Москвы, деловых программ специализированных выставок, конференций и форумов.

Результаты. Систематизированы существующие инновационные тенденции, которые разделены на два направления: разработка и внедрение инновационных строительных материалов и создание и внедрение инновационных технологий строительства. Все инновации в конечном счете способствуют снижению стоимости, сокращению сроков, улучшению качества или повышению экологичности строительства. Сформулировано принципиальное условие целесообразности внедрения инновации: улучшение показателя инновационного проекта по сравнению с базовым вариантом при прочих равных (и/или не ухудшающихся) условиях. Также анализ ситуации позволил выявить барьеры, препятствующие активному внедрению инноваций в ЖС РФ.

Выводы. Проведенный анализ доказывает, что в нашей стране есть востребованность и предпосылки для развития инновационной активности в сфере ЖС. Для преодоления существующих барьеров широкого применения инновационных технологий в ЖС требуются определенные условия: совершенствование методики оценки инновационных проектов с учетом специфики ЖС, а следовательно, активизация инвестиций в инновационные проекты ЖС, разумное государственное регулирование, совершенствование нормативно-правовой базы, повышение квалификации управленческих кадров и обеспечение отрасли менеджерами-инноваторами. В качестве наиболее перспективных для внедрения инноваций секторов выделены малоэтажное и индивидуальное строительство и возведение доходных домов.

Ключевые слова: инновации, инновационные материалы, инновационные технологии, жилищное строительство, инновационное влияние, эффективность внедрения инноваций

Для цитирования: Васильева Е.Ю. Значение и перспективы применения инновационных материалов и технологий в жилищном строительстве // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1586–1593. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1586-1593

Автор, ответственный за переписку: Елена Юрьевна Васильева, elena.chibisova_metr@mail.ru.

Innovative materials and technologies in housing construction: importance and prospects

Elena Yu. Vasilyeva

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

ABSTRACT

Introduction. The trends and prospects for the application of innovations in the housing construction in the Russian Federation are considered in the article.

Materials and methods. The system approach, methods of structural analysis, classification and grouping, comparative and statistical analysis, forecasting and expert evaluations were used in the research. Works of Russian and foreign authors, experience of construction companies, statistics presented by Rosstat (Federal state Statistics Service), materials of the Moscow Agency of innovations, materials of business programmes of specialized exhibitions, conferences and forums were used as the material for the research.

Results. The author systematized the current innovation trends broken down into (1) development and application of innovative construction materials and (2) creation and implementation of innovative technologies in construction. All innovations eventually reduce costs and terms; improve the quality of or cause an increase in the environmental friendliness of construction. The author formulated the basic condition of expediency of innovation introduction, or the improvement of an indicator of an innovative project in comparison with the basic option, other things being equal. The analysis of the situation also allowed identifying barriers, interfering with the introduction of innovations in the housing construction in the Russian Federation.

Conclusions. The analysis has proved the demand and certain prerequisites for the development of innovative activities in the housing construction in Russia. Certain conditions are required for overcoming the existing barriers, preventing the wide-scale use of innovative technologies in housing construction, such as the better assessment of innovative projects, taking into account the features of housing construction; and consequently, a rise in investments into innovative housing construction projects; reasonable state regulation; regulatory framework improvement; advanced training of executives and providing the industry with managers, acting as innovators. Low-rise and single-family houses are the best options for innovations.

KEYWORDS: innovations, innovative materials, innovative technologies, housing construction, innovation influence, innovation introduction efficiency

FOR CITATION: Vasilyeva E.Yu. Innovative materials and technologies in housing construction: importance and prospects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1586-1595. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1586-1593 (rus.).

Corresponding author: Elena Yu. Vasilyeva, elena.chibisova_metr@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие всех отраслей в экономике Российской Федерации ориентировано на разработку и внедрение инновационных продуктов и технологий. Эти направления задекларированы прежде всего в Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года¹ и Стратегии инновационного развития строительной отрасли Российской Федерации на период до 2030 года².

Однако, несмотря на провозглашенные ориентиры и определенные успехи, достигнутые в строительной и девелоперской деятельности на пути к повышению уровня их инновационности, жилищное строительство (ЖС) традиционно является консер-

вативной и довольно инерционной с точки зрения технологий отраслью. Причем это не всегда недостаток, а скорее особенность отрасли. Во-первых, длительные сроки эксплуатации зданий обуславливают то, что только спустя много лет могут вскрыться недостатки новых материалов и технологий. Отсюда — осторожность строителей при внедрении новшеств. Во-вторых, высока ответственность строителей за результат применения инноваций, поскольку в случае неудачи может возникнуть не только экономический ущерб, но и непосредственная угроза для жизни людей.

Таким образом, ЖС ведется зачастую традиционно, не используя инновационные возможности,

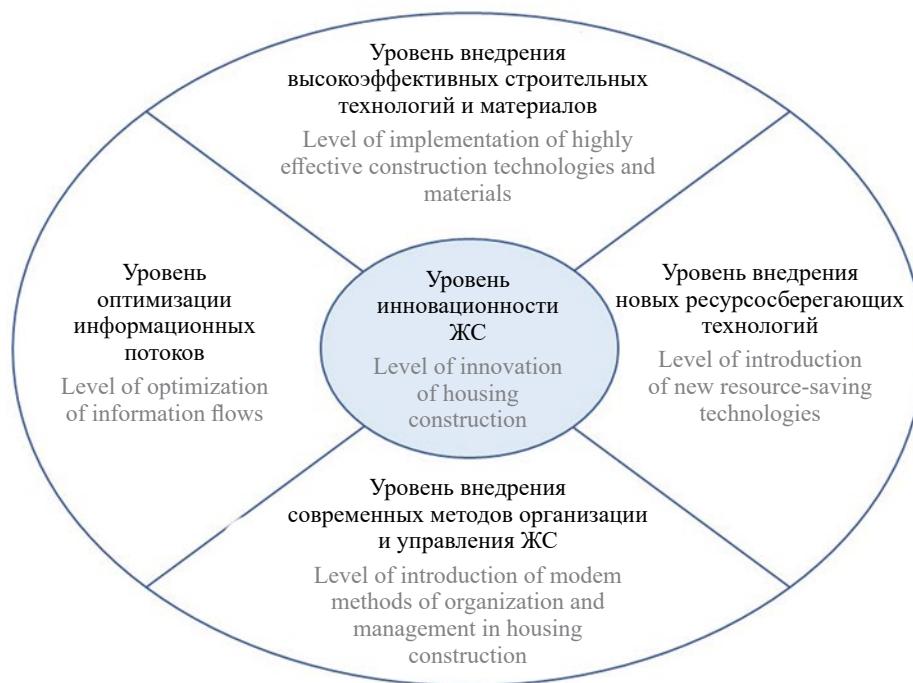


Рис. 1. Совокупность показателей инновационности жилищного строительства (рисунок автора)

Fig. 1. Set of indicators of the innovation level in housing construction (drawn by the author)

¹ Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года : Распоряжение Правительства РФ от 08.12.2011 № 2227-р (ред. от 18.10.2018). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_123444/2f806c88991ebbad43cdaa1c63c2501dc94c14af/

² Стратегия инновационного развития строительной отрасли Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/11870/>

с большими затратами временных, трудовых, материальных и энергетических ресурсов. Уровень инновационности ЖС в РФ невысок (см. показатели уровня инновационности на рис. 1).

Как результат, обеспеченность населения в России жильем все еще значительно ниже, чем это предусматривают международные стандарты. К концу 2021 г. в среднем в стране на одного человека приходилось 27,8 м², к 2030 г. обеспеченность жильем планируется увеличить до 34 м² на одного человека³, в то время как во Франции и Финляндии этот показатель уже сейчас составляет 40 м², а в Германии и США — более 40 м² на одного человека.

Ситуация усугубляется значительной долей ветхого и аварийного жилья, высокой степенью износа инженерных коммуникаций. Притом что в стране осуществляются программы реновации и расселение аварийного жилья идет высокими темпами, ежегодно площадь жилья, непригодного для проживания, увеличивается на 2 млн м²; с 2017 по 2022 гг. объем аварийного жилья вырос на 13 млн м².⁴ Стоит задача ускоренного ЖС на замену непригодного.

Не менее важен качественный аспект проблемы, а именно: несоответствие имеющегося жилищного фонда современным требованиям к потребительским качествам жилья. Жилье в большинстве своем отличается неудобной планировкой, низкой тепло-, влаго- и звукоизоляцией, отсутствием и невозможностью создания благоустроенных территорий. Конструктивные особенности (недостатки) и материалы жилых зданий влекут за собой такие проблемы, как повышенное потребление энергоресурсов: так, например, до 80 % жилых зданий в российских регионах представлены домами из сборного железобетона, которому свойственны существенные теплопотери, и они повышаются еще на 20–30 % от проектного уровня в случае ухудшения качества материалов.

Повышение инновационной активности в сфере жилищного строительства способно помочь решению как количественной, так и качественной проблемы обеспечения жильем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованы системный подход, методы анализа, синтеза, группировки, обобщения, сравнительный и статистический анализ, методы прогнозирования и экономико-математического моделирования.

Материалами для настоящего исследования послужили работы отечественных и зарубежных ученых [1–4], законодательные и нормативные

документы, данные Федеральной службы государственной статистики, аналитических и информационных агентств, деловых программ специализированных выставок, форумов и конференций (включая форум «Инфраструктура инноваций: 10 лет технопаркам Москвы», 2022, выставку СТТ Expo 2022), а также информация инновационного бюро «Эксперт», которое с 2015 г. занимается проведением исследований отраслей и рынков, мероприятий по тематике своей аналитической деятельности, в том числе форума «Российский дом будущего. Долгосрочная стратегия массового строительства жилья в России».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ тенденций в сфере ЖС позволил систематизировать инновации, выделив два направления (рис. 2) [4–7]:

- инновационные строительные материалы;
- инновационные строительные технологии.

Главными материалами в современном ЖС остаются бетон и железобетон. Актуальна разработка модифицированных бетонов и различного рода химических добавок (модификаторов). Приходится, однако, признать, что лишь два отечественных модификатора полностью отвечают мировому уровню: суперпластификатор С3 и комбинированный модификатор МБ (на основе микрокремнезема и суперпластификатора С3). Многие модификаторы закупались за рубежом, и в настоящее время стоит задача их быстрого и эффективного импортозамещения.

Что касается стеновых материалов, тенденции во всем мире заключаются в снижении их массы. В России путем смешивания цемента с различными пенопластовыми химическими добавками (алюминиевой пудрой, клееканифольным раствором и т.д.) изготавливаются стеновые строительные материалы из ячеистого бетона, которые значительно легче кирпича и традиционных бетонов, обладают лучшими теплоизоляционными свойствами. Это в свою очередь позволяет снижать транспортные расходы, мощность монтажного оборудования и затраты на него, трудоемкость и общую стоимость строительства.

Поиск новых энергоэффективных технологий строительства ведет к применению более эффективных теплоизоляционных и кровельных материалов, энергосберегающих стекол. В России наблюдается дефицит этих материалов и требуется активное импортозамещение этих позиций.

Анализ инновационного влияния в сфере жилищного строительства дал возможность выделить четыре важнейших направления (рис. 3) [7–9].

³ Обеспеченность жильем: результаты и перспективы // Экономика и жизнь. URL: https://www-eg--online-ru.translate.google/news/458470/?_x_tr_sl=ru&_x_tr_tl=en&_x_tr_hl=en&_x_tr_pto=sc

⁴ Соловьева О. Рост объемов аварийного жилья идет быстрее, чем его расселение // Экономика.



Рис. 2. Основные направления инноваций в жилищном строительстве (рисунок автора по работе [6])

Fig. 2. Principal areas of innovations in housing construction (drawn by the author according to [6])

Как следует из схемы на рис. 2, применение инновационных технологий позволяют жилищному строительству:

- сократить сроки строительства (повышая показатели эффективности и привлекательности инвестиций в строительные проекты [8, 10]);

- снизить стоимость (тем самым сделав жилье более доступным для потребителя, стимулируя спрос на него, повышая конкурентоспособность жилья на рынке, что особенно важно в условиях снижения доходов и покупательского спроса, а с другой стороны — повышает прибыль застройщика при существующем уровне цен на рынке жилой недвижимости) [8, 10, 11];

- повысить качество создаваемого жилья (что соответствует приоритетам развития отрасли и в конечном счете ведет, наряду с другими факторами, к улучшению качества жизни населения, что в свою очередь можно оценить показателями социальной эффективности строительного проекта [8, 11, 12]);

- повысить как экологичность процесса строительства (что можно оценить показателями эко-

логической эффективности строительного проекта [8, 9, 12]), так и экологические характеристики возведенного жилья.

Внедрение инновации в ЖС является целесообразным, если соблюдается определенное условие. По мнению автора [8, 12], в общем виде его можно сформулировать:

- с точки зрения снижения стоимости строительства:

$$E_c = C_b - C_i > 0,$$

где E_c — экономическая целесообразность внедрения инновации с точки зрения снижения стоимости строительства; C_b — стоимость строительства в базовом варианте проекта; C_i — стоимость строительства в случае реализации инновационного проекта.

То есть внедрение инноваций целесообразно, если способствует снижению стоимости строительства (при прочих равных, не ухудшающихся условиях) [13–16];

- с точки зрения сокращения сроков строительства:

$$E_t = T_b - T_i > 0,$$

где E_t — экономическая целесообразность внедрения инновации с точки зрения сокращения сроков строительства; T_b — срок строительства в базовом варианте проекта; T_i — срок строительства в случае реализации инновационного проекта.

Внедрение инноваций целесообразно, если способствует сокращению сроков строительства (при прочих равных, не ухудшающихся условиях).

Хотя положительное влияние инновационной активности на развитие ЖС очевидно, как показал проведенный анализ, оно сдерживается целым рядом ограничений.

1. Несовершенны подходы к управлению строительными проектами. Ограничительное действие оказывают организационно-управленческие барьеры, такие как: неэкономические механизмы конкуренции между строительными компаниями при распределении подрядов и землеотводов; сложившаяся и нарастающая олигополия крупных домостроительных компаний на локальных рынках; обремененность существующих строительных компаний крупными ДСК, привязанными к устаревшим индустриальным технологиям массового многоэтажного панельного строительства.

2. Наблюдается низкая мобильность финансовых потоков в строительстве.

3. Несовершенно российское законодательство как в области жилищного строительства, так и в части инновационной деятельности. Имеют место недостатки технического регулирования, не обеспечивающего установление строительных нормативов, требующих применения современных технологий; отсутствие целенаправленной госполитики по стимулированию развития и внедрения инновационных технологий в строительстве [16, 17].

4. Ощущается недостаток квалифицированных специалистов в сфере управления инновациями, занятых в ЖС. Хотя в РФ много лет ведется массовая подготовка менеджеров, большинство из них имеет либо широкий профиль («менеджмент организации»), либо отраслевую подготовку (для отрасли строительства в том числе). Однако инновационная деятельность имеет свою специ-

фику [18]; она отличается мультидисциплинарным характером, многовариантностью решений, повышенным риском и неопределенностью, сочетанием строгого научного и творческого подходов, особенностями методики обоснования целесообразности решений. Менеджеров-инноваторов необходимо целенаправленно готовить, а к этому готовы далеко не все вузы РФ [19–21].

5. Архитекторы и проектировщики мало заинтересованы в применении инновационных материалов и технологий. В свою очередь этому есть логичное объяснение: для новых материалов не всегда имеется достаточное нормативно-техническое обеспечение, так как экспертиза их довольно проблематична. Соответственно, авторы проектов не рискуют использовать в них многие инновационные материалы.

6. Негативную роль играют существующие принципы проектирования: проектировщику выгоднее быстро создать и продать несколько раз традиционный проект жилого дома, а не инновационный, который потребует больших затрат времени и усилий, но инновации скорее всего не будут дополнительно оплачены. Большинство заказчиков ценят только те инновации, которые ведут к сокращению стоимости и сроков строительства, недооценивая потребительское качество и экологические аспекты (рис. 3).

Кроме того, приходится признать субъективные факторы, такие как:

- коррупция и бюрократия, встающие на пути экспертизы, внедрения даже самых качественных и перспективных инновационных материалов и технологий;

- негативный опыт, полученный некоторыми российскими потребителями, а как результат — существование стереотипов и предубеждений против жилья, возведенного не по традиционным технологиям домостроения; сомнения в его качестве; настороженность и неготовность рисковать средствами, вкладывая их в покупку инновационных вариантов.

Как это ни парадоксально, но кризисные явления способны сыграть положительную роль в активизации инновационной деятельности в сфере жилищного строительства. В условиях роста цен

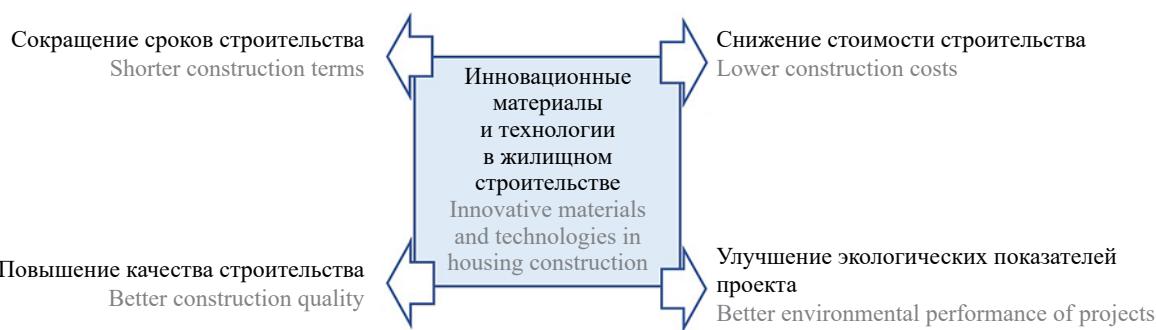


Рис. 3. Инновационное влияние в сфере жилищного строительства (рисунок автора по работам [7–9])

Fig. 3. Innovative influence in housing construction (drawn by the author according to [7–9])

на строительные материалы, энергоресурсы, приобретение (аренду, лизинг) специальной и строительной техники, роста расходов на заработную плату и прочих издержек наиболее выигрышное положение на рынке недвижимости через несколько лет займет тот, кто сможет предложить покупателям наивысшее качество по разумной цене. Применение инновационных материалов и инновационных технологий способствует решению этой задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, повышение уровня инновационности в сфере жилищного строительства имеет высокую социально-экономическую значимость, являясь эффективным инструментом снижения стоимости, сокращения сроков, улучшения экологических показателей строительства и повышения качества жилья. В свою очередь развитие ЖС способно оказать положительный эффект на ряд других отраслей.

Возможности для активного внедрения в российской отрасли ЖС инновационных материалов и технологий имеются.

Прежде всего немаловажно, что отечественным строителям и производителям строительных материалов хорошо известны инновационные технологии, применяемые в мировой практике. Непреродимого отставания России в этом направлении нет. Даже в условиях санкционных ограничений есть возможность закупать современное оборудование и строительные материалы, появляются новые партнеры, в том числе из стран Азии, посредники в импорте.

Что еще важнее, в сфере ЖС появляются новые отечественные материалы и технологии, позволяющие сократить сроки строительства жилых домов, при снижении стоимости строительства и с высоким качеством [1].

Целесообразно выделить наиболее перспективные сегменты ЖС, в которых внедрение инноваций может произойти быстрее и успешнее всего. Такими сегментами на сегодняшний день являются:

- малоэтажное и индивидуальное жилищное строительство;
- строительство доходных домов для последующей сдачи в аренду жилых и нежилых помещений.

В сегменте малоэтажного и индивидуального строительства зачастую работают небольшие строительные компании, которым свойственно меньше организационно-управленческих барьеров. Потребителем выступает индивидуальный заказчик — будущий собственник жилья, непосредственно заинтересованный в сокращении сроков, снижении стоимости строительства, повышении качества жилья и минимизации затрат при его дальнейшей эксплуатации. Индивидуальный заказчик имеет возможность вмешиваться в процесс проектирова-

ния и настоять на применении той или иной инновации.

Что касается доходных домов, их будущие собственники заинтересованы в экономии эксплуатационных издержек и готовы для этого решиться на применение при их возведении инновационных материалов и технологий. С другой стороны, арендаторы в доходных домах — мобильная категория, которая легко готова выехать из квартиры, которая не устраивает их по своим потребительским качествам. Следовательно, есть стимул для инноваций, направленных на повышение качества строительных объектов. Также проводившиеся социологические исследования [3] показывают, что большая часть арендаторов такого жилья — это молодые люди, благосклонно относящиеся к экспериментальным и нестандартным вариантам.

Строительство малоэтажного и индивидуального жилья, а также доходных домов способно стать локомотивом, апробирующим инновации и продвигающим их во все сегменты жилищного строительства.

Параллельно инновационные материалы и технологии должны внедряться в создание инженерных коммуникаций, так как без адекватного, соответствующего современным требованиям газо-, тепло-, водо- и электроснабжения, водоотведения и т.п. создаваемое жилье не будет выполнять требования к потребительскому качеству. В этом плане у России имеется важное преимущество: схемы и технологии в данных сферах уже разработаны и апробированы в передовых странах, и отечественные строительные предприятия могут использовать готовые решения.

Также целесообразно умеренное государственное вмешательство, которое помогло бы устраниć нормативно-правовые барьеры, повысить доверие покупателя к жилью, возводимому по инновационным проектам. Необходимы решительные действия по борьбе с коррупцией и монополизмом строительной отрасли. Свою роль в преодолении существующих барьеров способны сыграть экономические стимулы, поощряющие внедрение и применение энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий (включая налоговые льготы, субсидии и т.д.) [16].

И, наконец, инновационное развитие ЖС требует привлечения инвестиций, для которого необходимы оценка и методически грамотное обоснование. Это вызывает потребность развивать методику оценки инновационных проектов применительно к специфике жилищного строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Mccoy A.* Policies, programs and people that shape innovation in housing. Momentum Press, 2015. 200 p. DOI: 10.5643/9781606505618
2. *Abrantes V., Ural O.* Innovative housing practices: Better housing through innovative technologies and financing. proceedings of the IAHS World congress on housing. Michigan : Pergamon Press, 2008. 368 p.
3. *Chuba O.* Innovative and sustainable construction materials and construction technology for the developing countries: Making the right choice is the answer // Tropical Environment. 2013. Vol. 12. Pp. 91–107.
4. *Bamigboye G.O., Davies I., Nwanko C., Michaels T., Adeyemi G., Ozuor O.* Innovation in Construction Materials-A Review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 640. Issue 1. P. 012070. DOI: 10.1088/1757-899X/640/1/012070
5. *Soliman A., Hafeez G., Erkmen E., Ganesan R., Ouf M., Hammad A. et al.* Innovative construction material technologies for sustainable and resilient civil infrastructure // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 60. Pp. 365–372. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.248
6. Виньков А., Имамутдинов И., Медовников Д., Оганесян Т., Розмирович С., Хазбиеев А. и др. Инновации в строительном кластере: барьеры и перспективы // RAEX Аналитика. URL: https://raex-a.ru/researches/city/inno_r_db
7. Егоров А.Н., Шприц М.Л., Нагманова А.Н. Инновационность в строительной сфере экономики как инструмент снижения стоимости, сокращения сроков и повышения качества строительства // Проблемы современной экономики. 2011. № 3 (39). С. 251–252.
8. Васильева Е.Ю. Комплексный подход к оценке привлекательности инновационного проекта // Экономика и предпринимательство. 2019. № 11 (112). С. 698–703.
9. Масленников М.И. Технологические инновации и их влияние на экономику // Экономика региона. 2017. Т. 13. № 4. С. 1221–1235. DOI: 10.17059/2017-4-20
10. Sommer H. Project management for building construction. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 207 p.
11. Богоносцев А.Л., Папкова М.Д. Оценка эффективности внедрения инноваций в строительстве // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ). Серия: Социально-экономические науки. 2012. № 5. С. 110–112.
12. Vasilyeva E., Krupnov Y. Development of the methodological approach to the comprehensive assessment of the innovative project effectiveness // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 164. P. 10037. DOI: 10.1051/e3sconf/202016410037
13. Беляева С.В., Родионова Е.И. Методическая оценка эффективности инноваций в строительстве // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2017. № 7 (25). С. 160–164.
14. Куликова Н.Н. Оценка эффективности инноваций // Инновационное развитие экономики. 2012. № 2 (8). С. 144–147.
15. Bauer C. Modern Housing. Minnesota : Univ. of Minnesota Press, 2020. 400 p.
16. Borisov I.N., Stronin A.A. Construction materials with low power intensity based on cement // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Pp. 100–106. DOI: 10.1007/978-3-030-72910-3_15
17. Loganina V.I., Klyuev S.V., Fediuk R.S., Aksenenov I.A. Methodology for assessing the quality of building materials // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Pp. 167–173. DOI: 10.1007/978-3-030-72910-3_24
18. Величенкова Д.С. Формы взаимодействия инновационного университета и регионального инновационного развития // Kant. 2020. № 3 (36). С. 22–29. DOI: 10.24923/2222-243X.2020-36.4
19. Романова Е.В. Проблемы строительного образования // Сметно-договорная работа в строительстве. 2022. № 1. С. 61–66. DOI: 10.33920/str-01-2201-09
20. Белякова Е.И., Родионова Е.И. Особенности подготовки специалистов в области управления инновациями // Молодой ученый. 2012. № 2. С. 112–113.
21. Бондалетова Н.Ф. Концептуальные основы модели развития механизма стимулирования инвестиционной привлекательности инновационных жилищных проектов // Материалы Афанасьевских чтений. 2012. № 10. С. 53–63.

Поступила в редакцию 21 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 11 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 11 ноября 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: 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.

REFERENCES

1. McCoy A. *Policies, programs and people that shape innovation in housing*. Momentum Press, 2015; 200. DOI: 10.5643/9781606505618.
2. Abrantes V., Ural O. *Innovative housing practices: Better housing through innovative technologies and financing*. Proceedings of the IAHS World Congress on Housing. Michigan, Pergamon Press, 2008; 368.
3. Chuba O. *Innovative and sustainable construction materials and construction technology for the developing countries: making the right choice is the answer*. Tropical Environment. 2013; 12:91-107.
4. Bamigboye G.O., Davies I., Nwanko C., Michaels T., Adeyemi G., Ozuor O. Innovation in construction materials-a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 640(1):012070. DOI: 10.1088/1757-899X/640/1/012070
5. Soliman A., Hafeez G., Erkmen E., Ganeshan R., Ouf M., Hammad A. et al. Innovative construction material technologies for sustainable and resilient civil infrastructure. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 60:365-372. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.248
6. Vinkov A., Imamutdinov I., Medovnikov D., Oganesyan T., Rozmirovich S., Hazbiyev A. et al. Innovations in the construction cluster: barriers and prospects. *RAEX Analytics*. URL: https://raex-a.ru/researches/city/inno_r_db (rus.).
7. Egorov A.N., Shprits M.L., Nagmanova A.N. Innovativeness in the construction sphere of economy as an instrument of lowering its costs, shortening the terms of construction, and increasing of its quality. *Issues of Modern Economy*. 2011; 3(39):251-252. (rus.).
8. Vasilyeva E.Yu. Comprehensive approach to the assessment of the innovative project attractiveness. *Economy and an Entrepreneurship*. 2019; 11(112): 698-703. (rus.).
9. Maslennikov M.I. The technological innovations and their impact on the economy. *Economy of the Region*. 2017; 13(4):1221-1235. DOI: 10.17059/2017-4-20 (rus.).
10. Sommer H. *Project management for building construction*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010; 207.
11. Bogonostsev A.L., Papkova M.D. Efficiency evaluation of the introduction of innovations in construction. *Bulletin of the South-Russian State Technical University (NPI). Series: Socio-Economic Sciences*. 2012; 5:110-112. (rus.).
12. Vasilyeva E., Krupnov Y. Development of the methodological approach to the comprehensive assessment of the innovative project effectiveness. *E3S Web of Conferences*. 2020; 164:10037. DOI: 10.1051/e3sconf/202016410037
13. Belyayev S.V., Rodionova E.I. Methodical efficiency evaluation of innovations in eco-construction. *Innovation Economy: Prospects of Development and Improvement*. 2017; 7(25):160-164. (rus.).
14. Kulikova N.N. Efficiency evaluation of innovations. *Innovative Development of the Economy*. 2012; 2(8):144-147. (rus.).
15. Bauer C. *Modern Housing*. Minnesota, Univ. of Minnesota Press, 2020; 400.
16. Borisov I.N., Stronin A.A. Construction materials with low power intensity based on cement. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 100-106. DOI: 10.1007/978-3-030-72910-3_15
17. Loganina V.I., Klyuev S.V., Fediuk R.S., Aksenov I.A. Methodology for assessing the quality of building materials. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 167-173. DOI: 10.1007/978-3-030-72910-3_24
18. Velichenkova D.S. Forms of interaction of the innovative university and regional innovative development. *Kant*. 2020; 3(36):22-29. DOI: 10.24923/2222-243X.2020-36.4 (rus.).
19. Romanova E.V. Problems of education in construction. Introduction of digital pedagogics in the system of the higher education in construction. *Estimate and Contractual Work in Construction*. 2022; 1:61-66. DOI: 10.33920/str-01-2201-09 (rus.).
20. Belyakova E.I., Rodionova E.I. Features of training of specialists in the field of innovation management. *Young Scientist*. 2012; 2:112-113. (rus.).
21. Bondareva N.F. Conceptual bases of model of the development of the mechanism of stimulation of investment attractiveness of the innovation housing projects. *Materials of Afanasyevsky Readings*. 2012; 10:53-63. (rus.).

Received October 21, 2022.

Adopted in revised form on November 11, 2022.

Approved for publication on November 11, 2022.

BIO NOTES: **Elena Yu. Vasilyeva** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 702671, Scopus: 57192662530, ResearcherID: AAD-1693-2019, ORCID: 0000-0001-7797-1954; elena.chibisova_metr@mail.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, 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 нею, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (*A*, *F*, *b* и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (*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 осмыслиения 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. Шелущинин 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:

Piryurev 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.nsos-journal.ru/public/journals/1/issuues/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 Фамилия^{2...}

¹ *Место работы первого автора; город, страна*

² *Место работы первого автора; город, страна*

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. рекомендации по составлению аннотации.

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия^{2...} 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 тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls cooling 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.

Ві о н о т е с: **Ім'я, отчество, фамилія** (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;

Ім'я, отчество, фамилія (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:

Артемьева С. С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Форма № ПД-4	
УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001	
(наименование получателя платежа)	
7 7 1 6 1 0 3 3 9 1	0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0
(ИНН получателя платежа) (номер счета получателя платежа)	
в ГУ Банка России по ЦФО БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8	
(наименование банка получателя платежа)	
КБК	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0
ОКТМО 4 5 3 6 5 0 0 0	
Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь 2022 г.	
Вестник МГСУ	
(наименование платежа)	
(номер лицевого счета (код) плательщика)	
Кассир	
Ф.И.О	
плательщика	
Адрес	
плательщика	
Сумма платы	
Сумма	
за	
платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги	
руб. коп.	
Итого 3 822 руб. 00 коп. « 20 » 20 г.	
С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги	
банка, ознакомлен и согласен.	
Подпись	
плательщика	

Форма № ПД-4																															
УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001																															
(наименование получателя платежа)																															
<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>7</td><td>7</td><td>1</td><td>6</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>3</td><td>9</td><td>1</td></tr></table>	7	7	1	6	1	0	3	3	9	1	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>0</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td>4</td><td>6</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>7</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	3	2	1	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	0	1	7	3	0	0
7	7	1	6	1	0	3	3	9	1																						
0	3	2	1	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	0	1	7	3	0	0												
(ИНН получателя платежа) (номер счета получателя платежа)																															
в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> БИК <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>0</td><td>0</td><td>4</td><td>5</td><td>2</td><td>5</td><td>9</td><td>8</td></tr></table>		0	0	4	5	2	5	9	8																						
0	0	4	5	2	5	9	8																								
(наименование банка получателя платежа)																															
КБК	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td><td>0</td></tr></table>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0												
ОКТМО	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>4</td><td>5</td><td>3</td><td>6</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	4	5	3	6	5	0	0																							
4	5	3	6	5	0	0																									
Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь 2022 г.																															
Вестник МГСУ																															
(наименование платежа)																															
Ф.И.О плательщика																															
(номер лицевого счета (код) плательщика)																															
Адрес плательщика																															
Сумма платы																															
за																															
Сумма платежа <u>3 822</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп.																															
Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » <u>20</u> г.																															
С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.																															
Подпись плательщика _____																															

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

Бланк для опла ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала беззатратно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1	0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0
---------------------	---

(ИИН получателя платежа) (номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО	БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8
--------------------------	-----------------------

(наименование банка получателя платежа)

КБК	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0
-----	---

ОКТМО	4 5 3 6 5 0 0 0
-------	-----------------

Вестник МГСУ - 573.34 руб. x 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2022 г.

Вестник МГСУ

Ф.И.О	(наименование платежа)	(номер лицевого счета (код) плательщика)
-------	------------------------	--

плательщика		
-------------	--	--

Адрес		
-------	--	--

плательщика		
-------------	--	--

Сумма

платы

Сумма	за	
-------	----	--

платежа	6 880	руб.	00	коп.	услуги	руб.	коп.
---------	-------	------	----	------	--------	------	------

Итого	руб.	коп.	«	»	20	г.
-------	------	------	---	---	----	----

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги

банка, ознакомлен и согласен.

Подпись
плательщика

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1	0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0
---------------------	---

(ИИН получателя платежа) (номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО	БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8
--------------------------	-----------------------

(наименование банка получателя платежа)

КБК	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0
-----	---

ОКТМО	4 5 3 6 5 0 0 0
-------	-----------------

Вестник МГСУ - 573.34 руб. x 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2022 г.

Вестник МГСУ

Ф.И.О	(наименование платежа)	(номер лицевого счета (код) плательщика)
-------	------------------------	--

плательщика		
-------------	--	--

Адрес		
-------	--	--

плательщика		
-------------	--	--

Сумма

платы

Сумма	за	
-------	----	--

платежа	6 880	руб.	00	коп.	услуги	руб.	коп.
---------	-------	------	----	------	--------	------	------

Итого	руб.	коп.	«	»	20	г.
-------	------	------	---	---	----	----

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги
банка, ознакомлен и согласен.

Подпись
плательщика

Квитанция**Кассир**

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала
беззатратно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О.
на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распрос-
странения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических
лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

