

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 19. Выпуск 11
2024**

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

Сквозной номер 192

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 19. Issue 11
2024**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	27.11.2024.
Подписан в свет	29.11.2024.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 17,09. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 351

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Дизайн и верстка: *Алина Юрьевна Байкова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	29.11.2024

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2024

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Vera V. Galishnikova, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Anna A. Dyadicheva* **Corrector:** *Oksana V. Ermikhina*

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

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

А. Аасем, В.Н. Ткачев

Реабилитация среды обитания современных городов Сирии 1735

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

Э.К. Агаханов, М.К. Агаханов, Е.В. Труфанова

**Информационное моделирование динамических воздействий на уникальное здание
многофункционального комплекса параметрической архитектуры 1746**

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В.И. Логанина, А.Д. Рыжов, И.А. Пронин, А.А. Карманов, Н.Д. Якушова

**Исследование механизма фотокаталитической активности оксида цинка в присутствии синтетического
цеолита 1758**

А.А. Лазарев, С.В. Федосов, В.Г. Котлов, Д.Е. Цветков, А.Ю. Комлёв

**Информационное и математическое моделирование в строительстве при разработке строительных
изделий для обнаружения пожара в соседнем здании 1770**

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Л. Торопов

Эмиссия CO₂ при работе автономных водяных систем теплоснабжения 1779

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.И. Пасканый, А.А. Липидус

**Моделирование бизнес-процессов инжиниринговых компаний на этапах жизненного цикла
инвестиционно-строительного проекта 1789**

А.Н. Ларионов, Е.Э. Смирнова

**Метод оценки риска для организации экологической безопасности в сфере жилищного
и промышленного строительства 1797**

С.Б. Сборщиков, Н.В. Лазарева

Теоретические основы и практики реализации реинжиниринга в строительстве 1824

М.В. Гуреев, А.Н. Макаров

**Модель прогнозирования материальных ресурсов и сметной стоимости на ранних этапах жизненного
цикла объектов строительства 1835**

И.Г. Лукманова, В.А. Власенко, С.С. Уварова

**Стратегическое планирование инновационной деятельности строительного предприятия
в проекции системно-сетевых подходов 1850**

Требования к оформлению научной статьи 1861

1732

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Ammar Aasem, Valentin N. Tkachev

Rehabilitation of the habitat of modern cities in Syria 1735

CONSTRUCTION SYSTEM DESIGN AND LAYOUT PLANNING.

CONSTRUCTION MECHANICS.

BASES AND FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES

Elifhan K. Agahanov, Murad K. Agahanov, Elena V. Trufanova

Information modelling of dynamic impacts on a unique building of a multifunctional complex of parametric architecture 1746

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Valentina I. Loganina, Anton D. Ryzhov, Igor A. Pronin, Andrej A. Karmanov, Nadezhda D. Yakushova

Study of the mechanism of photocatalytic activity of zinc oxide in the presence of synthetic zeolite 1758

Alexander A. Lazarev, Sergei V. Fedosov, Vitalii G. Kotlov, Dmitry E. Tsvetkov, Andrey Yu. Komlev

Information and mathematical modelling in construction in the development of building products for fire detection in a neighboring building 1770

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Alexey L. Toropov

CO₂ emissions during the operation of autonomous water heating systems 1779

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION.

ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Vladimir I. Paskanny, Azariy A. Lapidus

Modelling of business processes of engineering companies at the stages of the life cycle of an investment and construction project 1789

Arkadiy N. Larionov, Elena E. Smirnova

Risk assessment method for the organization of environmental safety in the sphere of residential and industrial construction. 1797

Sergej B. Sborshchikov, Natal'ya V. Lazareva

Theoretical foundations and practices of reengineering realization in construction. 1824

Mikhail V. Gureev, Aleksandr N. Makarov

Model of forecasting of material resources and estimated cost at early stages of life cycle of construction objects. 1835

Inessa G. Lukmanova, Vyacheslav A. Vlasenko, Svetlana S. Uvarova

Strategic planning of innovation activities of a construction enterprise in the projection of a system-network approach 1850

Requirements for research paper design 1861

1733

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 72.01:916.014

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1735-1745

Реабилитация среды обитания современных городов Сирии

Аммар Аасем, Валентин Никитович Ткачев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Города Сирии имеют двойную структуру организации застройки: традиционное жилище ковровой застройки с консервативным укладом жизни обитателей и сложившийся в периоды колонизации «европейский город», каждая из которых ориентируется на отдельную методику реабилитации. Предмет исследования — восстановление разрушенных городов Сирии. Цель — представление гипотезы обновления парадигмы реабилитации, интегрирующей методологию урбанистики и объемного строительства вводом программ фрактального распределения паттернов жизнеобеспечения городов.

Материалы и методы. Для формирования предпосылок реконструкции «фоновой» застройки и «европейского города» изучались по доступным литературным источникам и натурным объектам сложившиеся социально-этнические параметры обитателей сирийских городов разного исторического морфогенеза, типология жилища. Фоновая застройка принята базовым объектом восстановительных работ на основе простейшей универсальной системы фрактального распределения паттернов жизнеобеспечения. Дано пояснение сущности этой системы, временно замещающей типовые методы и последовательность градостроительной реконструкции.

Результаты. Описаны модели реконструкции ковровой застройки и специфика концептуального подхода к использованию архитектуры как средства предотвращения миграции, сохранения национальной идентичности образа города.

Выводы. Высказываются опасения о судьбах сирийских городов, разрушение которых грозит распадом культуры этой древней страны, спасение которой во многом зависит от грамотной архитектурной стратегии восстановления среды обитания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: разрушенные города Сирии, концепции восстановления, бытовые традиции мусульманского социума, структурные аналоги, модели обновления, типология жилых объектов, программа фрактальной реабилитации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Аасем А., Ткачев В.Н. Реабилитация среды обитания современных городов Сирии // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1735–1745. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1735-1745

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

Rehabilitation of the habitat of modern cities in Syria

Ammar Aasem, Valentin N. Tkachev

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

ABSTRACT

Introduction. Cities of Syria have a dual structure of building organization: a traditional carpet-built dwelling with a conservative lifestyle of the inhabitants and the “European city” that developed during the periods of colonization — each of which focuses on a separate rehabilitation method. The subject of the study is the restoration of the destroyed cities of Syria. The aim is to present the hypothesis of updating the rehabilitation paradigm, integrating the methodology of urbanism and volumetric construction by introducing programmes for the fractal distribution of patterns of urban life support.

Materials and methods. To form the prerequisites for the reconstruction of the “background” development and the “European city”, the established socio-ethnic parameters of the inhabitants of Syrian cities of different historical morphogenesis, the typology of housing were studied using available literary sources and natural objects. The background building is accepted as the basic object of restoration work based on the simplest universal system of fractal distribution of life support patterns. An explanation of the essence of this system, which temporarily replaces the standard methods and sequence of urban reconstruction, is given.

Results. The models of “carpet” building reconstruction and the specifics of the conceptual approach to the use of architecture as a means of preventing migration, preserving the national identity of the image of the city are described.

Conclusions. There are concerns about the fate of Syrian cities, the destruction of which threatens to disintegrate the culture of this ancient country, the salvation of which largely depends on a competent architectural strategy for restoring the habitat.

KEYWORDS: destroyed cities of Syria, reconstruction concepts, everyday traditions of the Muslim society, structural analogues, renewal models, ideology of residential facilities, fractal rehabilitation programme

FOR CITATION: Aasem A., Tkachev V.N. Rehabilitation of the habitat of modern cities in Syria. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1735-1745. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1735-1745 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Города стареют и разрушаются по разным причинам. Обновлением их застройки решается несколько проблем: восстановление на прежнем месте разрушенного фонда в результате войн или землетрясений; частичное обновление застройки; мероприятия по благоустройству. Особенности колонизированных восточных городов — территориальный контакт традиционной, идущей с феодальных времен застройки и «европейского» города.

В анализе структуры таких городов ключевое внимание обычно уделяется регулярной архитектуре жилища и знаковых общественных объектов, не затрагивая «фоновой» застройки. Исторические исследования указывают между тем на важную роль в организации городской среды именно этой тривиальной застройки, формирующей основную жизнеспособную массу восточного города, освященную сложившимися национально-этническими нормами обитания и религиозными установками. При всей стихии восточной урбанистики выявляется структурно устойчивый и уникальный по своей значимости регламент социальных отношений городского мусульманского сообщества, который должен быть сохранен в процессе обновления среды как архетип специфического морфогенеза.

Аналогичная преобразовательная осторожность должна быть и в отношении других конфессиональных групп населения восстанавливаемых городов.

Ближний Восток уже несколько десятилетий находится в состоянии гражданских войн, поощряемых «заинтересованными» государствами.

С распадом Османской империи ее территории были распределены между молодыми арабскими государствами без учета этнических локаций и пограничной напряженности.

В борьбу за передел территорий вмешались европейские страны, стремившиеся колонизовать земли, богатые природными ресурсами, прежде всего нефтью.

Продолжающаяся междоусобица правительств и «повстанцев», подогреваемая западными хищниками, ведет ближневосточные страны к суициду, безрассудному разорению среды обитания, разрушению городов враждующими сторонами.

Сегодня и Сирия стала объектом многочисленных сторонних притязаний и практически находится на военном положении. Тем не менее в этих тяжелых условиях необходимо строить планы на будущее, искать нестандартные и эффективные способы восстановления страны, возвращения населения к нормальной жизни. Вернуть связь с историческим прошлым, культурными памятниками. Сохранить традиционный комфорт среды обитания.

Опыт восстановления многих городов после войн и землетрясений, например Варшавы и Ташкента, показывает успешность обновления за счет застройки

новыми кварталами и восстановления исторической среды, сочетания нового со старым, благоустройства, в целом благодаря возвращению городам утраченного образа и их прежнего статуса аттракторов, очагов культуры и полноценной жизни. В процессе их восстановления одновременно реставрировалась историческая застройка и возводились современные комфортные здания по новым проектам. Тогда еще не созрели вопросы взаимодействия культур разного исторического морфогенеза.

В городах Сирии сегодня сложилась особая ситуация. В течение десятилетий накапливалась визуально конфликтная обстановка из-за соприкосновения различных урбанистических систем: свойственного для феодальных городов бессистемного аддитивного заполнения пространства городской территории ковровой застройкой и европейской колониальной архитектуры регулярной планировки. В результате образовалась плотная, практически непроницаемая для транспорта масса прилегающих друг к другу глинобитных «клеток» с капиллярным доступом к каждой (рис. 1).

В силу исторического созревания синтеза между религиозной и светской жизнью таких поселений сформировалась специфическая общность, постоянная на мусульманских морально-этнических догматах, своеобразного восточного домостроя (не худших, заметим, норм общественной морали).

В Сирии система городского расселения имеет трехступенчатую структуру: областную (мухафазы), городских районов (минтаки), внутригородских кварталов (навахи). Сейчас в стране насчитывается 14 мухафаз и отдельно Дамаск, состоящий из 65 минтак, включающих 281 навахи.

Для сравнения в Узбекистане в близких исторических условиях группа из нескольких десятков домов компоновалась вокруг «своей» мечети как универсального центра «малого» социума, получившего название махалля [1–3], обладающего правами решать общинные проблемы на сходках, проводить работы по благоустройству, строительству нового жилья, организации свадеб, похорон и прочим житейским обрядам. В качестве элементов инфраструктуры такие стихийные «административные» образования (не касающиеся архитектуры) имеют рынки, ремесленные мастерские, цирюльни, бани, в той или иной степени свойственные мусульманским городам Средней Азии. На Ближнем Востоке похожий тип организации коммунального поселения располагает аналогичной системой обслуживания¹ [4, 5].

¹ تيار عمل الة ندم ال طي طخت ين انك ل لمك د . أ ا
تتادل ال و ة صوص ل الة م ال [Камель аль-Канани А. Араб-исламское городское планирование, конфиденциальность и современность]. URL: <https://urplanner.blogspot.com/2008/01/blog-post.html>



Рис. 1. Ковровая застройка Алеппо. Старый город²

Fig. 1. Carpet construction of Aleppo. The old town²

Ценность взаимопомощи жителей махалля в уверенности получения помощи соседей, демократической форме управления, возглавляемого советом аксакалов, играющим к тому же серьезную роль в воспитании молодежи, была понята в Узбекистане, где махалля официально признаны управляющим институтом регионального уровня.

Аналогичные системы самоорганизации жителей «фонового» города свойственны и городам Ближнего Востока.

Исследователи, мимоходом затрагивающие тему иррегулярной, транспортно недоступной стихийной застройки махалля и навахи, обращают внимание на визуальную разницу внешних глинобитных глухих стен «блокированного» жилья и внутренних помещений, имеющих цветную керамическую орнаментацию стен и пола, изящную мебель, учитывающих рекомендации Корана, призывающего к скромности облика жилища, достойного правоверных.

Господствует «интерьерная» психология восприятия архитектурного пространства, отсутствует внимание к украшению внешних поверхностей и даже к удобной доступности жилища, ограниченной «капиллярными» проходами, теснота которых отчасти компенсировалась относительно свободным атриумом двора каждого жилища. Конечно, со временем в последнее столетие города с такой плотной, ковровой застройкой, подчиняясь активизации транспортной связи застройки в европейских нормах, при-

обрили разгрузочные дороги — кольцевые вокруг цитадели и главной мечети, и радиальные вылетные для поддержки связи с другими населенными пунктами. Наиболее заметна эта межгородская связь с цепочкой основных городов Сирии: Дамаском, Хомсом, Хамой, Идлибом, Алеппо (рис. 2–5).

Небольшая деталь принадлежности быта в махалля и навахи: арба — одноколка на высоких колесах, позволяющая, помимо прочих достоинств, вознице наблюдать с большой высоты, куда нужно ехать по извилистым проходам между низкими домами безбрежного «моря» застройки.

Как объект вернакулярной деятельности жителей, заселяющих город, махалля (навахи) до сих пор является устойчивой урбанистической единицей, parcelлой застройки, жители которой ментально и психологически «приросли» к месту многолетнего обитания семьи (рода, общины) и настроены против изменений; они намерены жить всегда так, как жили их деды.

В таком эмоционально невыраженном режиме преданности месту есть позитив сохранения национальной идентичности — и, с другой стороны, негатив, тормозящий цивилизационное обновление жизни.

Внесение европейского ритма городского обитания при колонизации как азиатских, так и малоазийских городов задало урбанистическую поляризацию структур традиционной и новой застройки, форме их контактов как между объектами взаимной скрытой идиосинкразии, бытовой несовместимости.

Аморфная, с точки зрения посторонних, стихийная масса застройки махалля и навахи противо-

² URL: <https://cdn.fishki.net/upload/post/2016/12/13/2163284/217966.jpg>

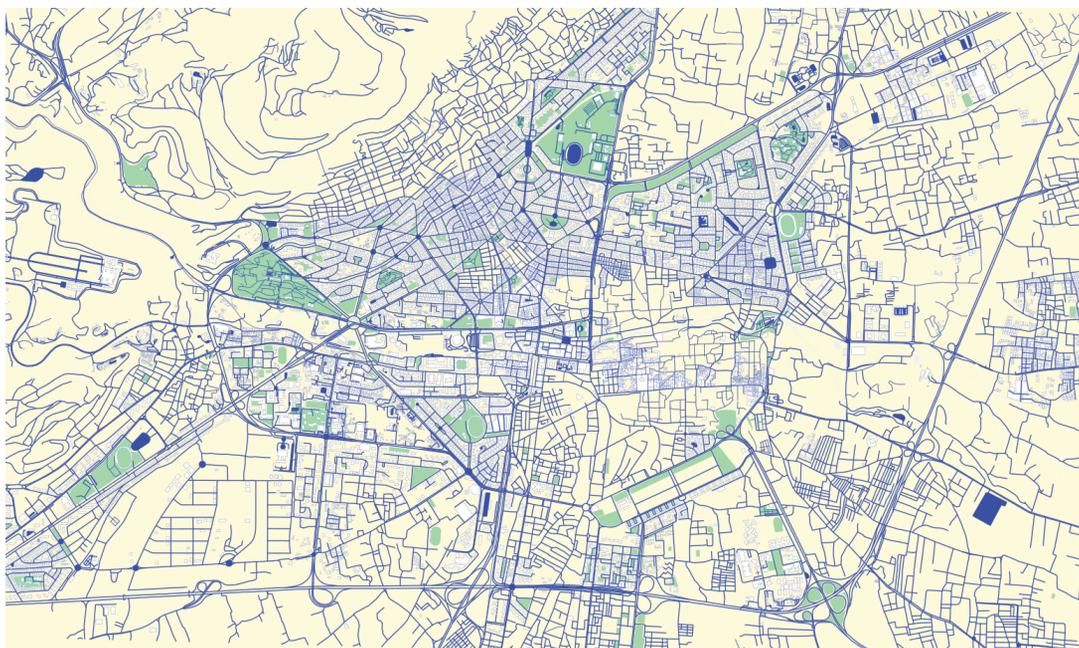


Рис. 2. Схема генерального плана Дамаска

Fig. 2. The outline of the general plan of Damascus

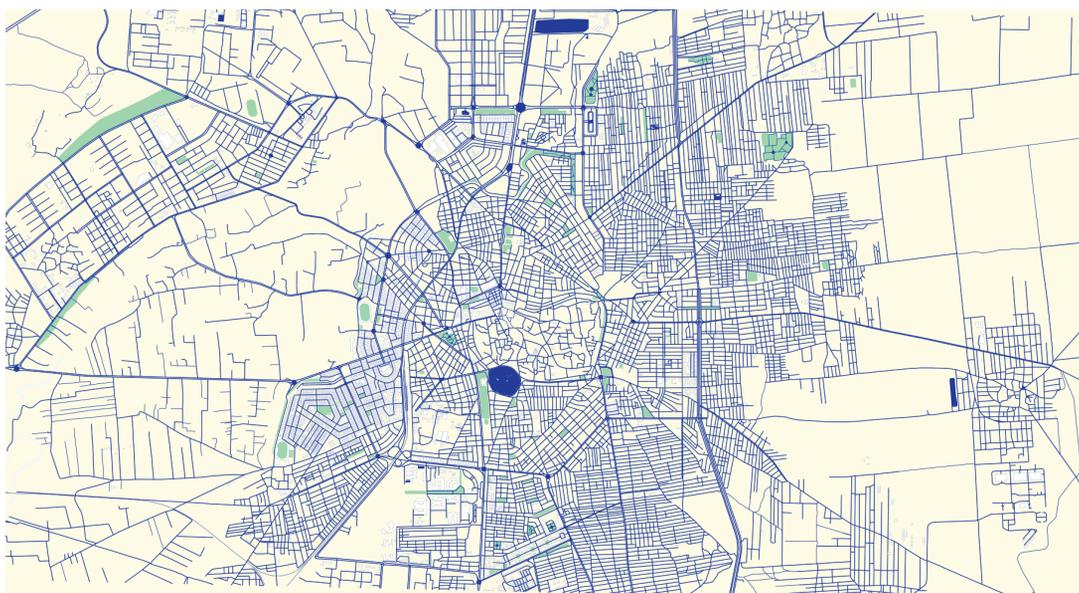


Рис. 3. Схема генерального плана Хомса

Fig. 3. The outline of the Holmes master plan

поставляется симметричным объемам «вставок» культовых и торговых сооружений (базар, торговый перекресток, чайхана, мечеть), заслуживающих архитектурного анализа. Условно «производственные» по функциям очаги — пекарни, парикмахерские, ремесленные мастерские, изготовление бытовой утвари, аптеки — растворялись в обычной застройке.

Между тем один из советских исследователей городской архитектуры Узбекистана, доктор архитектуры И.И. Ноткин справедливо указывал на серьезную роль махалля в качестве «фоновой» объекта бинарной

оппозиции, акцентирующей значимые сооружения [6]. Так, в визуальной оценке ансамбля Регистан в Самарканде важен именно его синтез по контрасту с морем желто-песчаного фона окружающей среды (рис. 6).

Вероятно, это один из удачных приемов закрепления архитектурной идентичности застройки с акцентированием местных ориентиров в зоне махалля (навахи) и адаптации к ним изолированных анклавов современной застройки.

Подсказкой к рисунку предполагаемых мероприятий реконструкции городов может служить



Рис. 4. Разрушения города Идлиба

Fig. 4. The destruction of the city Idlib

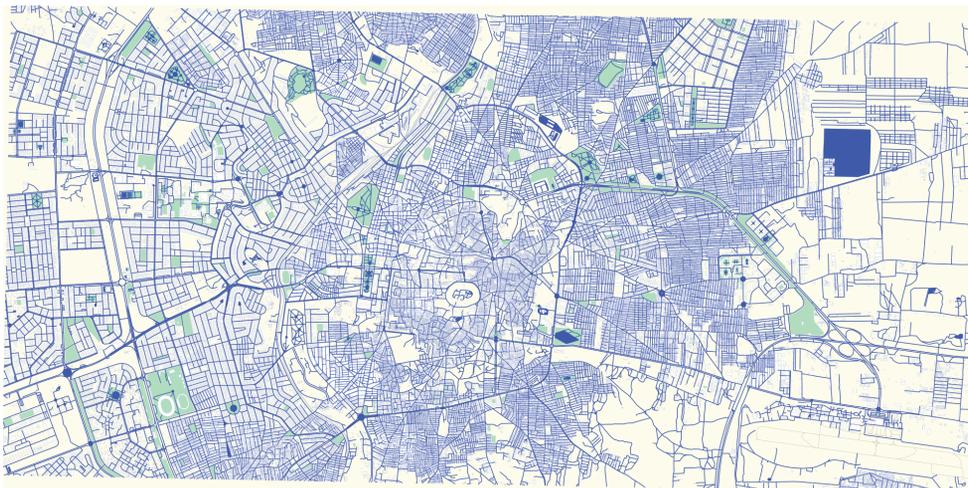


Рис. 5. Схема генерального плана Алеппо

Fig. 5. A diagram of the Aleppo master plan

калька существующих магистралей, трассированных с исторической целесообразностью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ожидании, что мир, наконец, наступит на сирийской земле, имеет смысл готовить генеральную концепцию обновления городской застройки с привлечением архитектурных усилий, ускоряющих процесс реабилитации среды обитания в современных общемировых стандартах и, с другой стороны, способствующих осуществлению систем бережного переноса сложившихся режимов жизни на канву цивилизованных пространственных решений.

Авторы уже указывали на весьма скудную информацию по анализу тривиальной стихийной застройки махалля с точки зрения урбанистической логики, еще раз подчеркнем важность сохранения идентичности среды при обновлении застройки городов, сохраняющих сугубо феодальную систему менталитета общественно-семейных отношений, требующую осторожной адаптации (как при переносе пчелиного улья) религиозных и светских жизненных установок Востока в современных условиях. Здесь доминирование мусульманской психологии еще не исчерпало себя и сохраняет влияние на идеологию и методологию архитектурного проектирования.



Рис. 6. Пример организованного ансамбля среди ковровой застройки. Эль Регистан, Самарканд³

Fig. 6. An example of an organized ensemble among carpet construction. El Registan, Samarkand³

Фоновая застройка как феномен морфогенеза заслуживает анализа и реабилитации как целостная система, но не как объект восстановительных работ по следам утраченной застройки. Для ускоренного возвращения к жизни территорий навахи целесообразно полагать их *carte blanche* — свободными для новой застройки. И применить к их восстановлению методологию фрактального освоения территории, суть которой заключается в следующем.

Люди кооперируются в городские сообщества в поисках наиболее полного обеспечения их жизненных потребностей, «упакованных» в систему социального обслуживания, причем блок паттернов жизнеобеспечения на всех этапах иерархии системы от города до жилой ячейки сохраняется неизменным по номенклатуре, но сокращается масштабно (рис. 7).

Ущербность так называемых моногородов, спешно создаваемых при новых индустриальных центрах Советского Союза, обязана именно некомплектности паттернов жизнеобеспечения.

То есть речь о том, что во главу угла урбанистической реабилитации ставится система распределения жизненных благ, некоторым образом «военный коммунизм». Возможно, это остановит поток иммиграции, упорядочит систему снабжения временных поселений, упростит бюрократическую работу по стандартизации предоставления паттернов. И в последующем послужит каркасом стабильной системы городских служб, в сферу действия которых включается и «европейская» застройка». Для подробного выяснения работы этой фрактальной системы можно более детально ознакомиться со схемой на рис. 3.

Значение взаимной адаптации урбанистической поляризации, останавливающей процесс миграции

населения восточных стран в Европу, трудно переоценить как средство погашения конфликтов, возникающих при контакте людей различной этнической культуры и конфессий, социального и имущественного неравенства.

Также трудно прогнозировать, какое направление примет в ближайшее время социальное движение в Сирии, равно как и на всем Ближнем Востоке, однако нужно уже сейчас программировать долгосрочные акции, решающие аспекты реабилитации среды обитания.

Архитектурные мероприятия по организации пространства, благоприятные для развертывания в нем позитивно настроенных действий, предоставляют возможности по меньшей мере для стабилизации социума, на почве которой можно «выращивать» новые городские структуры, сохраняющие привлекательность для населения, снимающие психологический синдром миграционных намерений.

Одним из арабских источников, посвященных теме обновления Востока, является работа Н. Ардабана и Л. Бахтияра «Чувство единства суфийской традиции Персидской архитектуры» [4], а также работы Исхак Якуб Аль-Кутуба, Абдул Илах Абу Айяша² [5].

Но и труды ученых, не находящихся внутри объекта исследования, т.е. Ближнего Востока, вполне допускают проекцию методологических соображений, порожденных среднеазиатским материалом, на сферу арабского региона. Во всяком случае, такие параллели полезны как для сопоставлений, так и для заимствования опыта. Мы воспользовались как путеводителями в лабиринтах восточной специфики расселения доступными публикациями на близкие темы: работами Л.Ю. Маньковской [7], Н.И. Смолиной [8], М.Е. Массона [9], И.И. Ноткина [6], Г.А. Пугаченковой [10], З.Н. Яргиной [11], К. Линча [12], Ш. Ле Корбюзье [13], А.Э. Гутнова

³ URL: https://kazpravda.kz/media/ckeditor_files/share/2022/11/11/6_xrWwreB.JPG

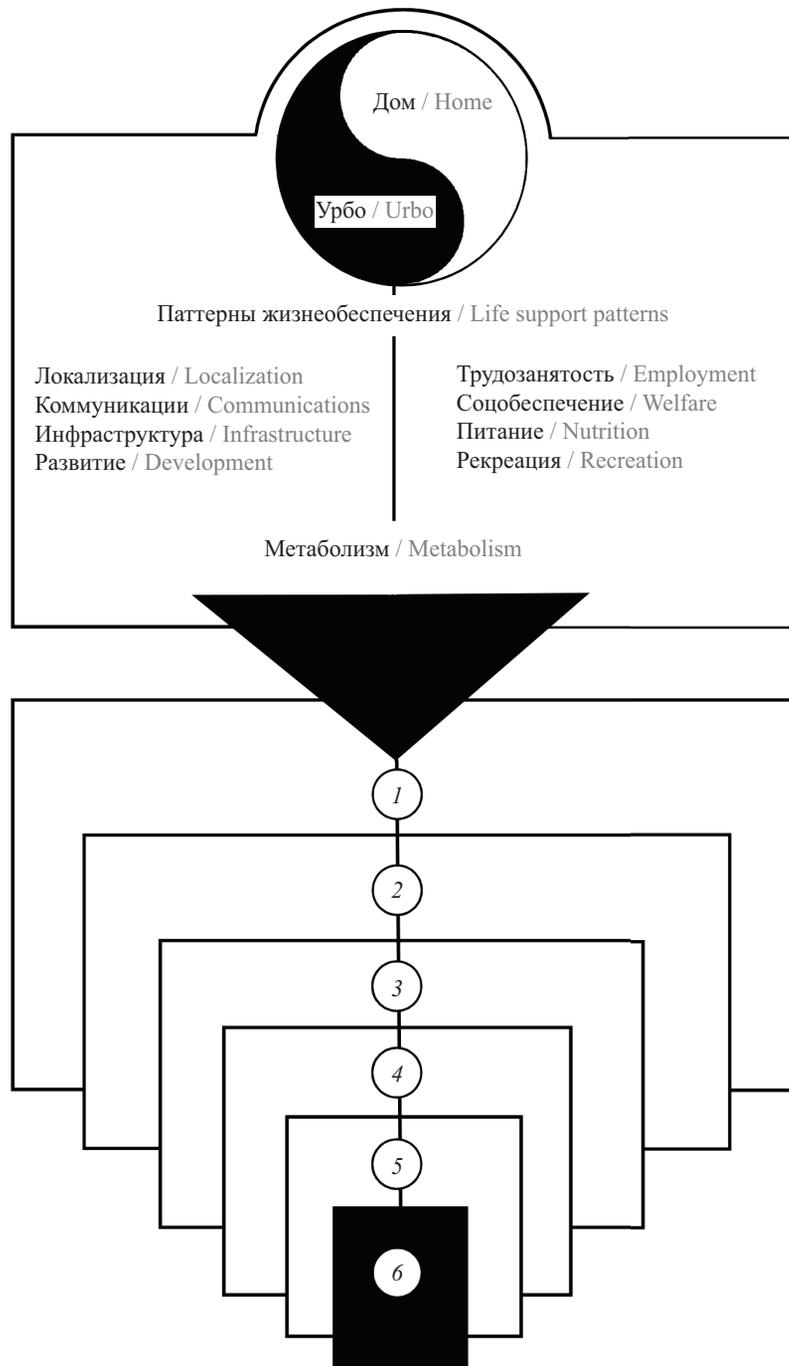


Рис. 7. Схема фрактального распределения паттернов жизнеобеспечения на шкале организованной среды обитания: 1 — конурбация; 2 — агломерация; 3 — город; 4 — район; 5 — жилая группа; 6 — жилая ячейка (рисунок В.Н. Ткачева)

Fig. 7. A diagram of the fractal distribution of life support patterns on the scale of an organized habitat: 1 — conurbation; 2 — agglomeration; 3 — city; 4 — district; 5 — residential group; 6 — residential cell (drawing by V.N. Tkachev)

[14], К. Танге [15,], Я.В. Косицкого [16], В.В. Владимиров [17], П. Мерлена [18], В.А. Лаврова [19] и др.

В конце XX в. исследованиями эволюции городской среды плодотворно занимался доктор архитектуры А. Гутнов. Но административная рутинность и архаичность градостроительного проектирования отеснили перспективы реализации его разработок. Сегодня урбанистическое мышление поднялось на новый уровень фрактальной методологии анализа сложных систем, к которым относится город, и за-

ставляет вернуться к рассмотрению его «как иерархии “вкладываемых друг в друга структур» [20].

Если мы соединим теоретические позиции К. Александера, Б. Манделброта, А. Гутнова, можно скомпоновать новую парадигму урбанистики, которой предлагаем заняться компетентным специалистам. Она очень пригодится для создания концепции восстановления городов Сирии.

Дежурные мероприятия, которые можно программировать на решение ближневосточных про-

блем в архитектурном аспекте, конечно, не смогут обмануть эволюцию применением временных компенсационных приемов, но разрабатывать их, безусловно, нужно.

При этом пакет проблем сирийских городов: внутренняя миграция с переуплотнением заселения городов несмотря на разруху, нехватка жилья и стихийная самодеятельная архитектура, подорванная инфраструктура, подавленная строительная индустрия, низкий уровень жизненного комфорта, рост цен на жилье, отсутствие работы и, следовательно, источников жизнеобеспечения — невозможно решить эпизодическими усилиями, тем более что в Сирии еще не разработана система грамотного возвращения к жизни разоренных кварталов. Необходим централизованный государственный аппарат, способный решать вопросы в экстремальном режиме.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения направлений реабилитации городской среды целесообразно разобраться в современных тенденциях формирования общей концепции реконструкции, которая пока традиционно и логично начинается с урбанистики и завершается проектированием объемных решений.

Тема устойчивого развития наднациональна и в целом включает синтез базовых принципов жизнеобеспечения: экологию, экономику, социальный мир.

Идеология устойчивости прозрачно отображена в исследованиях известного американского ученого-урбаниста К. Линча, посвященных выявлению «совершенных форм города» [12], без конкретных градостроительных разработок, что вполне естественно для теоретической работы установления концептуальных позиций проектировщиков, отвечающих потребностям обитателей.

Точно так же конкретная теория архитектуры объемной, анализирующая житейскую конъюнктуру, динамику комфортных требований и эволюцию стилистики, включающих «чувство места», практически далека от реальной проектной работы, у которой свои меры проектной «игры», обставленной нормативами, проблемами согласования, технологии и экономики осуществления проектного замысла, и которая представляет собой объект менеджмента.

В формировании концепции участия архитектуры в реабилитации среды города имеет смысл обобщить в единой системе блок паттернов жизнеобеспечения как ключевой элемент, определяющий круг проблем, а затем наметить по двум руслам — урбанистическому и объемному — системы отдельных технических мероприятий по реализации проектных разработок, намеченных генеральной концепцией (см. рис. 7). Такая централизация узла задач с последующим размежеванием технических этапов позволяет «держать руку на пульсе» всей отрасли в целом, устранять промежуточные циклы работ, нередко искажающих линейность исполнения замыслов, повы-

шать ответственность исполнителей за свой фронт работ, упростить отчетность. И в целом повысить уровень организованности, что чрезвычайно важно в условиях нестабильности.

В генеральной концепции должны быть представлены крупные блоки направлений архитектурной деятельности, не отделяя урбанистику (на концептуальном этапе) от объемного проектирования архитектурных объектов.

Они обозначены в паттернах как наиболее актуальные в условиях всеобщей неустроенности, деформации городской структуры:

- системы обеспечения первичных потребностей (жилище, питание, метаболизм);
- обеспечение безопасности;
- социальные инфраструктуры;
- транспортная доступность;
- информация и образование;
- мобильность;
- трудовая занятость.

Все разделы паттернов реализуются в урбанистических и архитектурных формах при постоянстве списка паттернов в разных масштабах (на схеме это «Урбо» и «Дом»).

Создание регулирующего органа, контролирующего деятельность по каждому виду паттернов, составляет первый шаг в организации системных мероприятий архитектурного морфогенеза.

Концепция сохранения целостной атмосферы восстанавливаемого города — это реализация архитектурной полифонии — разделение традиционного массива махалля (и навахи — его ближневосточного аналога) и индустриальной современной застройки — «европейского города».

Модели подхода:

1. Трактовка традиционной застройки как опорной для бережной реконструкции сложившейся «фоновой» ткани города.

2. Возведение новых кварталов современной архитектуры на расчищенных после разрушений территориях.

3. Проведение работ по реабилитации уцелевшей застройки с элементами благоустройства.

Для сохранения исторического лица города следует ориентироваться на выявление архитектурных акцентов на трассах внутригородских «паломнических» путей.

Необходима разработка концепции освоения глубинных территорий страны, где ожидается прекращение военных действий и обеспечение безопасной реализации принимаемых решений. Пальмира, как геометрический центр страны, должна уже в ближайшей перспективе стать объектом восстановления исторической аутентичности Сирии.

Освобождение частей города от разрушений даст импульс к разработке новых градостроительных ориентиров, разработке серий зданий, образующих массовые аттракторы целесообразности в глазах населения.

Навахи — исторически сложившийся, уникальный в своем роде социальный институт жизни мусульманского населения, поддерживающий национальные традиции, принимается как инвариант действий реабилитации.

Любые смелые архитектурные решения не должны создавать иллюзию успешного выполнения социальной задачи этими средствами, а проходить тестирование отсутствия покушения на сложившиеся традиции обитания, на извращение норм идентификации.

Свой визуальный шарм среднеазиатские и ближневосточные города сохранили в силу исторических обстоятельств, специфической конфессиональной психологии и мировоззрения обитателей городов ковровой застройки. Это естественный отклик идеальной реконструкции таких древних городов, как Ур, Чаталхююк, Топрак-кала.

Социальная организация подобных городов впоследствии закрепились исламом, табуировавшим ковровые поселения от возможных пространственных возмущений.

Табуированность феодальных поселений от обновлений сказалась на отставании их от быстрых темпов развития, присущих европейским городам, и выразилась в дихотомии наиболее крупных городских центров Сирии, в которых соприкасаются практически два мира. Задача состоит в создании условий их безболезненного социального сосуществования. При реконструкции со временем допускается послабление табу неприкосновенности по отношению к историческим объектам, если обстоятельства современной реабилитации среды потребуют освободить место для новой застройки.

Полезной будет активизация процессов обновления по всей цепочке городов от Дамаска до Алеппо.

Идеологический стержень реконструкции разрушенных городов страны пока только намечается. Во всяком случае он не должен разрушать сложившиеся традиции общинного обитания или их модификации, основанные на коммунальном быте мусульманского сообщества, сохраняющего видимость изолированности.

Очевидно, именно здесь нужно искать пути останки миграции населения из стран, где люди отчаялись найти почву под ногами, перспективы жизни на месте обитания предков.

Массовая миграция в благополучные страны — это естественное следствие неравновесной эволюции запада и востока? Возможно, потребуется международное сотрудничество по разработке программ реабилитации «сломавшейся» среды обитания маргинальных народов; все-таки инвазии чужой культуры есть исторический факт и нелогично исключать его последствия из работ восстановления синтетической среды, где уже сложились некоторые режимы взаимодействия, представляющие общий интерес. Это относится к французскому влиянию в Сирии и русскому — в Средней Азии.

Есть предположения, что внесение в программу реабилитации неких совершенно новых принципов

компоновки городской среды, например, на основе фрактальности, которой закладываются основы воспроизведения формы в разных масштабах, может освежить методiku осмысления эволюции города как среднего звена в ряду пространственных форм: квартиры — дома — квартала — района — города — агломерации — ... и т.д., в каждой из которых заложен один и тот же комплекс паттернов жизнеобеспечения. Может быть, его и следует принять в качестве парцеллы, генетического ядра единицы организованной среды?

В ряде исследований уже обновляются вопросы целостности архитектуры как объекта синтезирования всех составляющих аспектов независимо от масштабов и области реализации задач организации среды (урбо или объем), вернув ценность главному механизму, объединяющему людей в сообщества взаимозависимых особей — блоку жизненных потребностей.

К таким вопросам относится так называемая эмерджентность как фактор взаимодействия всех составляющих, идея сбалансированности (темперированности по И.С. Баху), идея аутопоэзиса — самовоспроизводства организованных форм материи по теории У. Матураны и Ф. Варелы [21], чилийских биологов, настойчиво подталкивающих науку к теоретической интеграции разрозненных знаний разных областей, архитектуры в том числе, т.е. теорию архитектуры уже методологически «подпирают» смежные науки.

Теоретическое обновление откроет возможности более целенаправленного процесса реосвоения территорий — с заменой традиционной урбанистической парадигмы, восстановлением психологической атмосферы нарушенного быта, если речь по-прежнему идет о сирийских городах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Сирии сложилась безвыходная обстановка затянувшейся гражданской войны, ведущая, если просчитать все шансы противоборствующих сил, к самоуничтожению страны и ее обезлюдению. Неужели это конец страны, внесшей неопределимый вклад в историю цивилизации, мировую культуру и архитектуру? Слепые обстоятельства, не без помощи со стороны, толкают ее к гибели.

Но кто-то должен сделать пусть неожиданный, но яркий поступок, который станет ориентиром для всплеска пассионарности. Похоже, что сирийская история пришла к своей точке сингулярности и настало время обновления. Лучшего и очевидного средства изменения менталитета в сторону креативности, чем архитектура, трудно придумать.

Но и архитектура должна выйти на новые орбиты творчества, в частности изменения принципов реабилитации разоренных городов [22].

Решительный шаг обновления должен опираться на патриотический пафос молодых реформаторов. История не раз подтверждала эффективность пассионарных рывков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мусурманкулов Ф.У. Махалля — важный субъект самоуправления граждан // Молодой ученый. 2013. № 7. С. 351–353. EDN OSIMSA.
2. Азизханов А.Т., Ефимова А.П. Теория и практика строительства демократического общества в Узбекистане. Ташкент : Национальный университет Узбекистана, 2005.
3. Юлдашева Р.К. Структура махалли и ее роль в жилой застройке исторических городов Узбекистана // Проблемы современной науки и образования. 2022. № 1 (170). С. 121–124. EDN RQYEKL.
4. Ardalan N., Bakhtiar L. The sense of Unity: The Sufi Tradition in Persian Architecture. Chicago, London : The University of Chicago Press, 1973.
5. يف يرض حل طيختل و منزل دلال دبع شاي ع وبأ وبأ دلال دبع ، بطقول بوقعي قحسا / يبرعلا جيل خلا لود متاعوبطل شاي ع . 1980; 328. [Исхак Якуб Катб, Абдель Аль Аббас. Сельскохозяйственное развитие и планирование в странах Аравийского полуострова. Издательство «Матбуа», 1980. 328 с.]. URL: <https://lib.mcu.gov.uz/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=50795>
6. Ноткин И.И. Архитектурно-пространственное формообразование исторически сложившихся городов Узбекистана : дис. ... д-ра архитектуры. Ташкент, 1980. Т. 1. 418 с.
7. Маньковская Л.Ю. Типологические основы зодчества Средней Азии (IX – нач. XX вв.). Ташкент : Фан, 1980. 183 с.
8. Смолина Н.И. Традиции симметрии в архитектуре. М. : Стройиздат, 1990. 343 с.
9. Массон М.Е. К исторической топографии Герата XV в. // Великий узбекский поэт. 1948.
10. Пугаченкова Г.А. Зодчество Центральной Азии, XV век. Ташкент : Изд-во лит. и искусства, 1976. 115 с.
11. Яргина З.Н. Эстетика города. М. : Стройиздат, 1991. 365 с.
12. Линч К. Совершенная форма в градостроительстве. М. : Стройиздат, 1986. 264 с.
13. Ле Корбюзье Ш. Архитектура XX века. М. : Прогресс, 1970. 304 с.
14. Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. М. : Стройиздат, 1984. 256 с.
15. Танге К. Архитектура Японии: традиция и современность. М. : Прогресс, 1975. 239 с.
16. Косицкий Я.В. Архитектурно-планировочное развитие городов. М. : Архитектура-С. 2005. 648 с.
17. Владимиров В.В. Расселение и окружающая среда. М. : Стройиздат, 1982. 228 с.
18. Мерлен П. Город. Количественные методы изучения. М. : Прогресс, 1977. 262 с.
19. Лавров В.А. Развитие планировочной структуры исторически сложившихся городов. М. : Стройиздат, 1977. 176 с.
20. Гутнов А.Э. Город как объект системного исследования // Вопросы теории архитектуры : сб. ст. 1976. С. 101–114.
21. Матурана У. Биология познания // Язык и интеллект. М. : Прогресс, 1995.
22. Ткачев В.Н., Сарвут Т.О. Опыт трансляции механизма теории фракталов на принципы освоения среды обитания Сибири и Заполярья // Архитектура и строительство России. 2019. № 2 (230). С. 48–57. EDN GCVBIO.

Поступила в редакцию 25 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 11 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 11 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Аммар Аасем — аспирант кафедры архитектуры Института архитектуры и градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; asemamar95@gmail.com;

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

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Musurmankulov F.U. Mahalla is an important subject of self-government of citizens. *Young Scientist*. 2013; 7:351-353. EDN OSIMSA. (rus.).
2. Azizkhanov A.T., Efimova A.P. *Theory and practice of building a democratic society in Uzbekistan*. Tashkent, National University of Uzbekistan, 2005. (rus.).
3. Yuldasheva R.K. The structure of the mahalla and its role in residential development historical cities of Uzbekistan. *Problems of Modern Science and Education*. 2022; 1(170):121-124. EDN RQYEKL. (rus.).

4. Ardalan N., Bakhtiar L. *The sense of Unity: The Sufi Tradition in Persian Architecture*. Chicago, London, The University of Chicago Press, 1973.
5. يف يرضحلا طيظختلا و ومنل هلالا دب ع ،شاي ع و وبأ هلالا دب ع ،ببطلقلا ببوق عي قحسا / يببرعلا جيلخلا لود ،تاعوبطملا .شاي ع . 1980; 328. [Ishak Yaqoub Katb, Abdel Al Abbas. *Agricultural Development and Planning in the Countries of the Arabian Peninsula*. Matbua Publishing House, 1980; 328.]. URL: <https://lib.mcy.gov.ae/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=50795>
6. Notkin I.I. *Architectural and spatial formation of historically formed cities of Uzbekistan : dis. ... doc. architecture*. Tashkent, 1980; 1:418. (rus.).
7. Mankovskaya L.Yu. *Typological foundations of architecture in Central Asia (IX – early XX centuries)*. Tashkent, Fan, 1980; 183. (rus.).
8. Smolina N.I. *Traditions of symmetry in architecture*. Moscow, Stroyizdat, 1990; 344. (rus.).
9. Masson M.E. On the historical topography of Herat in the XV century. *Great Uzbek poet*. 1948. (rus.).
10. Pugachenkova G.A. *Architecture of Central Asia, XV century*. Tashkent, 1976; 115. (rus.).
11. Yargina Z.N. *City aesthetics*. Moscow, Stroyizdat, 1991; 365. (rus.).
12. Lynch K. *Perfect form in urban planning*. Moscow, Stroyizdat, 1986; 264. (rus.).
13. Le Corbusier S. *Architecture of the 20th century*. Moscow, Progress, 1970; 304. (rus.).
14. Gutnov A.E. *The evolution of urban planning*. Moscow, Stroyizdat, 1984; 256. (rus.).
15. Tange K. *Architecture of Japan: tradition and modernity*. Moscow, Progress, 1975; 239. (rus.).
16. Kositsky Ya.V. *Architectural and planning development of cities*. Moscow, Architecture-S, 2005; 648. (rus.).
17. Vladimirov V.V. *Settlement and environment*. Moscow, Stroyizdat, 1982; 228. (rus.).
18. Merlen P. City. *Quantitative research methods*. Moscow, Progress, 1977; 262. (rus.).
19. Lavrov V.A. *Development of the planning structure of historical cities*. Moscow, Stroyizdat, 1977; 176. (rus.).
20. Gutnov A.E. The city as an object of systemic research. *Questions of the theory of architecture : collection of articles*. 1976; 101-114. (rus.).
21. Maturana U. Biology of Cognition. *Language and Intelligence*. Moscow, Progress, 1995. (rus.).
22. Tkachev V.N., Sarvut T.O. Experience of translation of the mechanism of the theory of fractals to the principles of the development of the environment of the habitation of Siberia and Polarians. *Architecture and Construction of Russia*. 2019; 2(230):48-57. EDN GCYBIO. (rus.).

Received May 25, 2024.

Adopted in revised form on October 11, 2024.

Approved for publication on October 11, 2024.

BIONOTES: **Ammar Aasem** — postgraduate student of the Department of Architecture of the Institute of Architecture and Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; asemamar95@gmail.com;

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

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

The authors declare no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1746-1757

Информационное моделирование динамических воздействий на уникальное здание многофункционального комплекса параметрической архитектуры

Элифхан Керимханович Агаханов¹, Мурад Кирымханович Агаханов²,
Елена Васильевна Труфанова³

¹ Дагестанский государственный технический университет (ДГТУ); г. Махачкала, Россия;

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

³ Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследовано формообразование гофрированной поверхности с последующим выбором формы для создания объемно-планировочных решений каркаса здания. Формообразование поверхности осуществлено в программном комплексе (ПК) САПФИР. Проведено совмещение гофрированной поверхности и циклической поверхности для создания архитектурного облика уникального здания многофункционального комплекса. Выполнены расчет методом конечных элементов аналитической модели каркаса уникального многофункционального комплекса параметрической архитектуры и подбор оптимальных конструктивных решений. Дополнительно изучено влияние добавления аутригерных этажей в конечно-элементную модель на разных уровнях каркаса здания.

Материалы и методы. Формообразование гофрированной поверхности выполнено в ПК САПФИР. Конечно-элементная модель получена путем экспорта аналитической модели в ПК Лири-САПР. Для подтверждения правильности принятых конструктивных решений по каркасу здания исследованы напряженно-деформированное состояние конструкций, частота и формы собственных колебаний. Предложено четыре варианта расположения аутригерных систем, рассмотрено влияние аутригерных этажей на динамический отклик каркаса здания.

Результаты. В результате расчетов получены значения горизонтальных перемещений каркаса здания, не превышающие нормативные значения. Изменение конструктивных решений позволило сделать первую и вторую форму колебаний поступательной, третью — крутильной. Характер динамического отклика показывает экономичность принятых конструктивных решений каркаса уникального здания. Численный эксперимент позволил добиться снижения горизонтальных перемещений на 25 %, что увеличивает общую устойчивость и пространственную жесткость каркаса здания.

Выводы. Получена форма уникального здания параметрической архитектуры. Проведено исследование влияния аутригерных систем на динамические характеристики каркаса здания. По результатам исследований разработан каркас уникального здания многофункционального комплекса, отвечающего требованиям надежности и экономичности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационное моделирование, параметрическая архитектура, уникальное здание, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, аутригерная система, динамический отклик

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Агаханов Э.К., Агаханов М.К., Труфанова Е.В. Информационное моделирование динамических воздействий на уникальное здание многофункционального комплекса параметрической архитектуры // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1746–1757. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1746-1757

Автор, ответственный за переписку: Мурад Кирымханович Агаханов, muradak@mail.ru.

Information modelling of dynamic impacts on a unique building of a multifunctional complex of parametric architecture

Elifhan K. Agahanov¹, Murad K. Agahanov², Elena V. Trufanova³

¹ Dagestan State Technical University (DSTU); Makhachkala, Russian Federation;

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

³ Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study of corrugated surface shaping with subsequent shape selection for creating volumetric planning solutions for the building frame was performed. Surface shaping was performed in the SAPFIR software package. The corrugated surface and cyclic surface were combined to create the architectural appearance of a unique building of a multifunctional complex. The calculation of the analytical model of the frame of a unique multifunctional complex of parametric architecture was performed using the finite element method and the selection of optimal design solutions was performed. Additionally, the effect of adding outrigger floors to the finite element model at different levels of the building frame was studied.

Materials and methods. The corrugated surface was formed in the SAPFIR software package. The finite element model was obtained by exporting the analytical model to the Lira-SAP. software package. To confirm the correctness of the adopted design solutions for the building frame, a study was conducted on the stress-strain state of the structures, the frequency and shape of natural vibrations. Four options for the location of outrigger systems were proposed, and the influence of outrigger floors on the dynamic response of the building frame was studied.

Results. As a result of the calculations, the values of horizontal displacements of the building frame were obtained, which do not exceed the standard values. The change in design solutions allowed to make the first and second forms of oscillations translational, the third — torsional. The obtained nature of the dynamic response shows the efficiency of the adopted design solutions of the unique building frame. The numerical experiment allowed to achieve a reduction in horizontal displacements by 25 %, which increases the overall stability and spatial rigidity of the building frame.

Conclusions. As a result of the study, a form of a unique building of parametric architecture was obtained. A study of the influence of outrigger systems on the dynamic characteristics of the building frame was carried out. Based on the research results, the frame of a unique building of a multifunctional complex meeting the requirements of reliability and cost-effectiveness is developed.

KEYWORDS: information modelling, parametric architecture, unique building, finite element method, stress-strain state, outrigger system, dynamic response

FOR CITATION: Agahanov E.K., Agahanov M.K., Trufanova E.V. Information modeling of dynamic impacts on a unique building of a multifunctional complex of parametric architecture. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1746-1757. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1746-1757 (rus.).

Corresponding author: Murad K. Agahanov, muradak@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы автоматизированного проектирования применяются на всех этапах разработки строительного объекта. Большое внимание уделяется поиску оптимальной формы будущего здания, которая является отражением прогресса в сфере технологий, строительных материалов и методов производства работ. Важную роль занимает новый архитектурный стиль — параметризм, воплощающий многообразие криволинейных форм внешних оболочек зданий, возможный благодаря развитию программных комплексов (ПК) и вдохновляющий на создание архитектуры будущего [1, 2].

В процессе параметрического моделирования внешний вид здания формируется на базе аналитических поверхностей, доступных к редактированию путем изменения математических уравнений и параметров. Алгоритм такого проектирования включает три этапа: создание уникальной формы, конструирование и расчет несущих элементов каркаса, разработка чертежей [3].

Поиск формы основан на применении ПК, позволяющих вводить зависимости между геометрическими характеристиками проектируемых объектов. Преимущество данного метода состоит в возможности конвертации проекта из одной программы в другую для более удобного редактирования и проектирования объекта в целом. Форма здания, как правило, имеет сложную геометрию и может принимать разные очертания, ограниченные лишь целесообразностью и оптимальностью

решений, а также учитывающие назначение будущего объекта строительства [4–6].

Цифровые модели здания позволяют оперативно проанализировать различные конструктивные решения, выявить их достоинства и недостатки.

Проектирование уникальных зданий напрямую связано с решением ряда задач, в том числе выходящих за рамки соответствующих нормативных документов. В связи со сравнительно небольшим объемом строительных проектов подобного уровня появляется необходимость тщательного контроля, чтобы в разрабатываемых расчетных конечно-элементных моделях уникальных высотных и большепролетных сооружений были учтены все особенности принимаемых расчетных схем, сочетаний нагрузок, а также физико-механических характеристик применяемых материалов с учетом сроков службы зданий. Уникальные объекты, как правило, характеризуются повышенными строительными объемами и сложными расчетными схемами, поэтому выявление на ранней стадии каких-либо опасных изменений в напряженно-деформированном состоянии (НДС) несущих элементов в процессе строительства и эксплуатации — важная задача.

Прогрессивные методы моделирования и разработки проектов, обусловленные гармоничным восприятием формы, актуальны в настоящее время. Привлечение к процессу проектирования вычислительных ПК и систем автоматизированного проектирования может еще на стадии концептуального моделирования обеспечить правильность объемно-планировочного решения объекта. Проявление нели-

нейности в архитектуре определено по большей части особой техникой моделирования пространственной формы. Применение особенностей эволюции формообразования дает возможность использования BIM-технологий при проектировании уникальных зданий и сооружений. Параметрический метод формообразования адаптивен к необходимым изменениям на всех фазах проектирования, а также способствует нетрудоёмкой коррекции внешнего вида концепта.

При разработке конструктивных решений и проектировании высотного здания особое внимание уделяется такому основному фактору, как воздействие ветра. Ветровое давление, увеличивающееся с высотой от поверхности земли, способно негативно воздействовать на здание, вызывать колебания и значительные деформации несущих элементов каркаса. Поэтому важно учитывать аэродинамические характеристики формы сооружения, от которых зависит устойчивость на протяжении полного срока эксплуатации.

Варьированием соотношения жесткостей элементов несущего каркаса возможно решение такой задачи, как регулирование перемещений и усилий в элементах строительных конструкций, а также изменение главных форм колебаний.

Общий принцип анализа собственных колебаний пространственного каркаса состоит в стремлении найти такое расположение несущих элементов и соотношение их жесткостей, при котором отклонения здания от вертикали стремились к минимуму. Кроме того, рационально запроектированная схема здания позволит минимизировать эффект закручивания в первых двух формах собственных колебаний.

Так как на уникальные высотные здания влияют большие горизонтальные нагрузки от воздействия ветра, приводящие к раскачиванию каркаса, необходимо предусмотреть мероприятия, обеспечивающие возведение несущих конструкций в строго проектном положении.

Цель исследования состоит в применении гофрированной поверхности при разработке проекта уникального многофункционального комплекса, подборе оптимальной конструктивной схемы и анализе НДС несущего каркаса здания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В современной архитектуре для придания индивидуальности зданию применяются нестандартные методы, требующие использования программного обеспечения с целью формирования взаимосвязей между различными элементами проекта, а также геометрическими и физическими параметрами объектов.

Основой будущего внешнего облика многофункционального комплекса является поверхность в виде гофрированной сферы. Параметрическую форму задания гофрированной поверхности поддерживает ПК САПФИР 2016. В основании рассматриваемой

поверхности лежит круговая синусоида, заданная в виде:

$$\begin{aligned} X = f(u) &= (R + a \cdot \cos(n \cdot u)) \cdot \cos(u); \\ Y = f(u) &= (R + a \cdot \cos(n \cdot u)) \cdot \sin(u); \\ Z &= 0, \end{aligned}$$

где R — радиус окружности сферы на экваторе, относительно которой построена круговая синусоида; a — максимальная амплитуда гофров в основании поверхности (на экваторе); n — число вершин синусоиды на круговом плане; u — угол, отсчитываемый от оси Ox в сторону оси Oy .

Создание 3D-модели гофрированной сферы осуществляется путем ввода уравнений, которые определяют координаты всех точек, принадлежащих данной поверхности, в пространстве:

$$\begin{aligned} X = f(u, v) &= (R \cdot \cos(v) + \\ &+ a \cdot (1 - \sin(v)) \cos(n \cdot u)) \cdot \cos(u); \\ Y = f(u, v) &= (R \cdot \cos(v) + \\ &+ a \cdot (1 - \sin(v)) \cos(n \cdot u)) \cdot \sin(u); \\ Z = f(u, v) &= R \cdot \sin(v), \end{aligned}$$

где v — угол, отсчитываемый от плоскости xOy в сторону оси Oz ; $0 < v < \pi/2$, $0 < u < 2\pi$.

Исходная форма гофрированной поверхности получается путем задания стандартных значений параметров для каждого уравнения в ПК САПФИР (рис. 1). Приняты следующие параметры: $R = 5$, $a = 1$, $n = 5$.

Изменение поверхности производится заданием переменных функций u и v , их пределов, а также параметров будущего здания R , h , a , n (рис. 2).

Для возможного удобного редактирования высоты поверхности вносятся следующие улучшающие правки в исходные параметрические уравнения (рис. 3):

1) добавляется параметр h , отвечающий за высоту будущего здания;

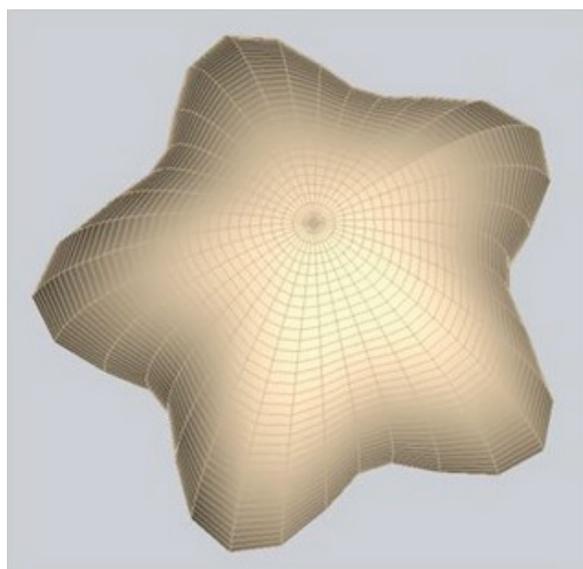


Рис. 1. Исходная форма гофрированной сферы

Fig. 1. Initial shape of the corrugated sphere

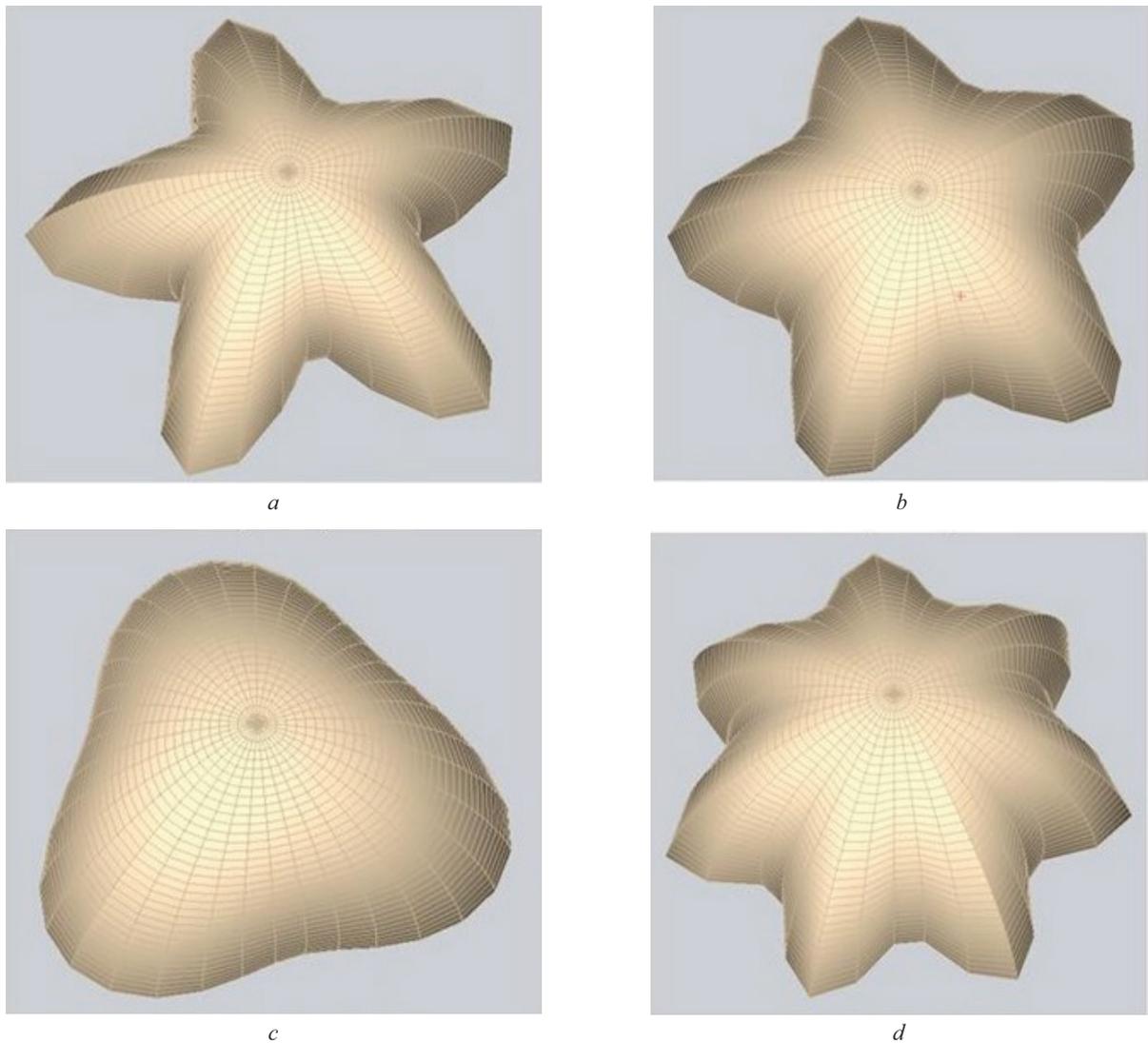


Рис. 2. Эволюция формообразования поверхности: *a* — изменение параметра a , $R = 5$, $a = 2$, $n = 5$; *b* — изменение параметров R и a , $R = 8$, $a = 2$, $n = 5$; *c* — уменьшение параметра n , $R = 5$, $a = 1$, $n = 3$; *d* — увеличение параметра n , $R = 5$, $a = 1$, $n = 7$

Fig. 2. Evolution of surface formation: *a* — change in parameter a , $R = 5$, $a = 2$, $n = 5$; *b* — change in parameters R and a , $R = 8$, $a = 2$, $n = 5$; *c* — decrease in parameter n , $R = 5$, $a = 1$, $n = 3$; *d* — increase in parameter n , $R = 5$, $a = 1$, $n = 7$

2) изменяется уравнение $Z: Z = f(u, v) = h \cdot \sin(v)$;

3) для v задается возможность изменяться в пределах $-\pi/2 < v < \pi/2$.

Исследуемый высотный многофункциональный комплекс является уникальным зданием, следовательно, высота итоговой поверхности должна превышать 100 м. Так как поверхность сужается в обоих направлениях от экваториального положения, то расположение самой широкой части формы, обусловленное соотношением высот от основания здания до экватора и от экватора до крайней верхней точки по оси Z , принимается по золотому сечению. Правило золотого сечения — это определенное правило пропорции, которое заключается в таком делении отрезка на части, чтобы отношение составных частей этого отрезка, а также отношение всего отрезка к наибольшей части составляло значение, близкое к числу 1,618.

Значения параметров для задания итоговой формы: $R = 17$, $a = 1,15$, $n = 7$, $h = 78$. Секущей плоскостью поверхность подрезается на необходимую высоту, принятую равной 126 м. Получаем итоговый вид самой высокой части комплекса, изображенный на рис. 4.

В основе концептуального образа уникального многофункционального комплекса лежат две зеркально стоящие высотные башни, образованные гофрированной поверхностью и соединенные в основании общим стилобатом, который представляет собой эллиптический цилиндр с совмещенной завершающей верхней частью в виде циклической поверхности вращения, форма и параметрические характеристики которой представлены на рис. 5.

Заключительный вариант внешнего облика уникального комплекса получен в результате сочетания четырех поверхностей с такими геометрическими

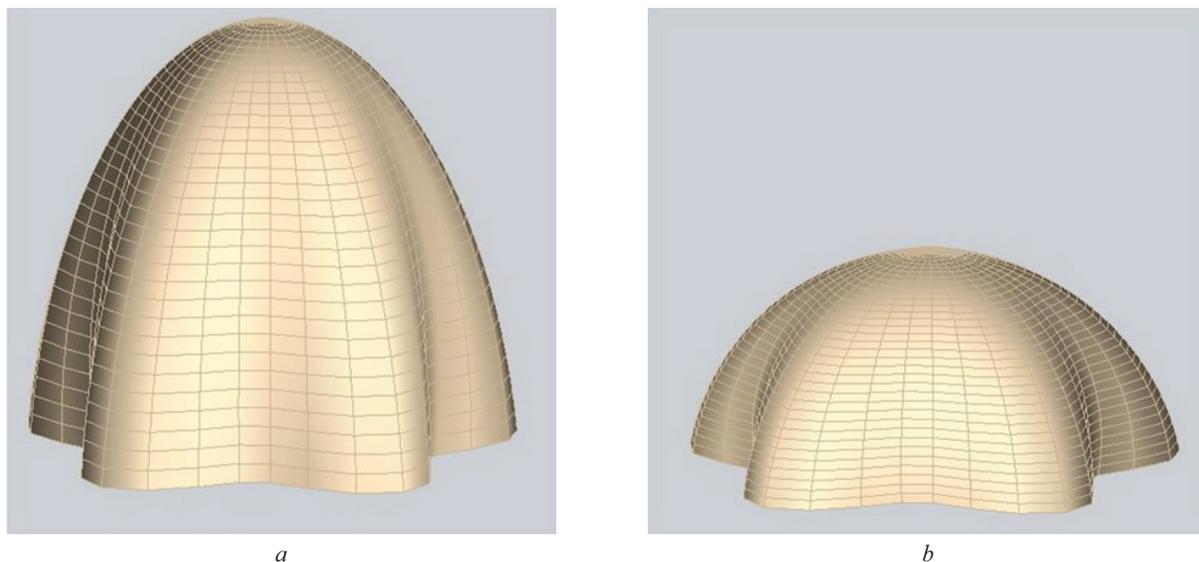


Рис. 3. Влияние параметра h на исходную форму поверхности: a — учтен параметр h , $h = 10$, $R = 5$, $a = 1$, $n = 5$; b — параметр h не учитывался, $R = 5$, $a = 1$, $n = 5$

Fig. 3. Influence of parameter h on the initial shape of the surface: a — parameter h is taken into account, $h = 10$, $R = 5$, $a = 1$, $n = 5$; b — parameter h was not taken into account, $R = 5$, $a = 1$, $n = 5$

параметрами, которые бы не противоречили расчетным, конструктивным и эстетическим требованиям при дальнейшей разработке проекта (рис. 6).

При разработке конструктивных решений поверхность разделяется по вертикали на эксплуатируемые и технические этажи, выбирается наиболее

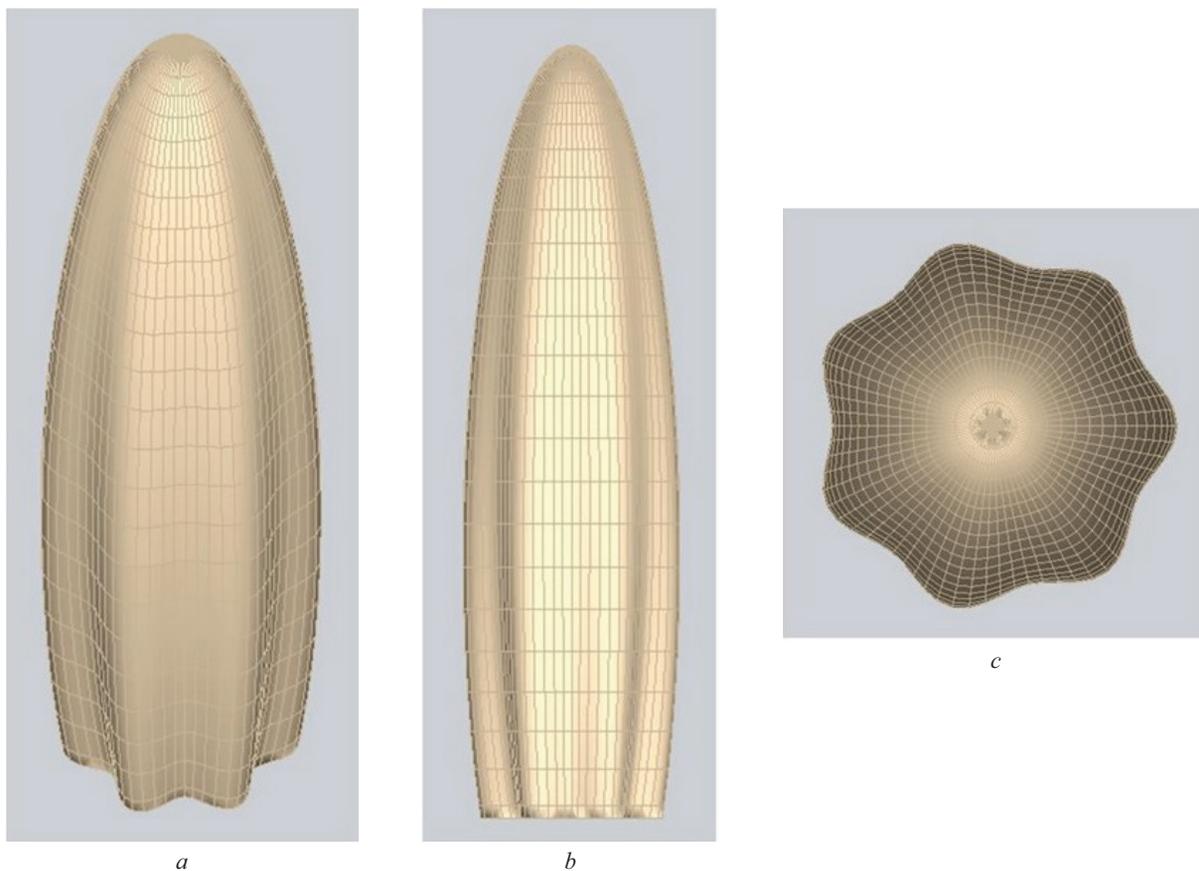


Рис. 4. Итоговая форма высотной части здания: a — изометрия; b — вид сбоку; c — вид сверху

Fig. 4. The final form of the high-rise part of the building: a — isometric; b — side view; c — top view

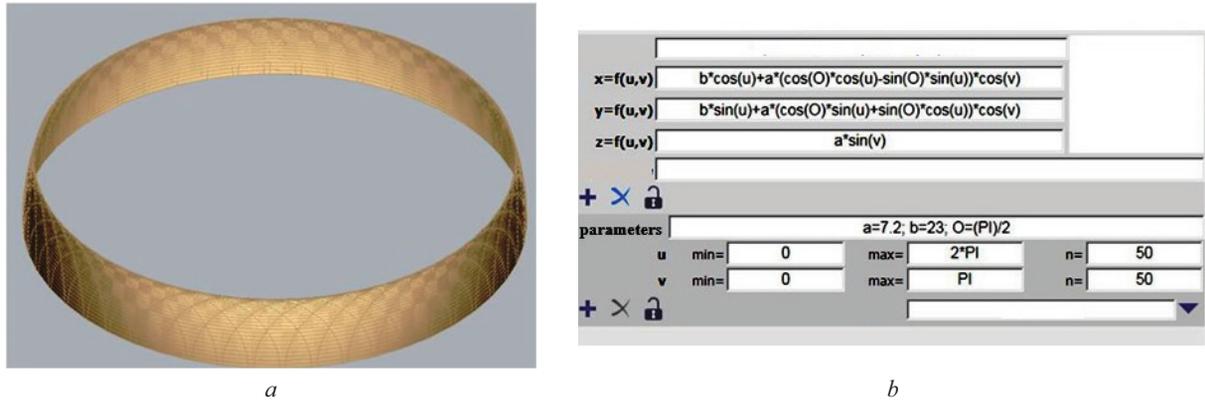


Рис. 5. Параметрическая форма задания циклической поверхности: *a* — поверхность; *b* — параметрические характеристики

Fig. 5. Parametric form of defining a cyclic surface: *a* — surface; *b* — parametric characteristics

рациональная конструктивная система и прорабатывается несущий каркас, который при расчете на статические и динамические нагрузки обязан соответствовать необходимым требованиям по устойчивости и несущей способности [7–9]. Лестнично-лифтовой узел формирует ядро жесткости, в плитах перекры-

тия предусматриваются отверстия для лифтовых шахт и лестниц, в стенах создаются проемы для выхода на кровлю и в машинное отделение грузовых и пассажирских лифтов. Конструкция переходной галереи выполнена в виде пространственной фермы из металлического профиля различного сечения.

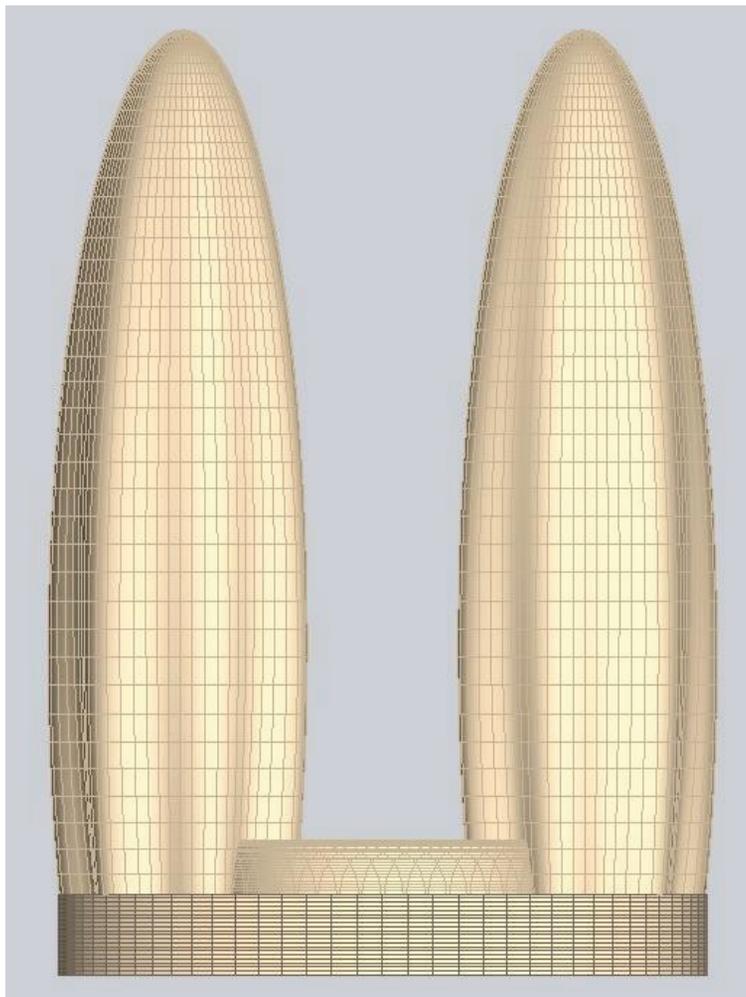


Рис. 6. Результат совмещения поверхностей

Fig. 6. Result of combining surfaces



Рис. 7. Итоговая модель: *a* — общий вид; *b* — вид на эксплуатируемую кровлю на отметке +18,000

Fig. 7. Final model: *a* — general view; *b* — view of the exploited roof at the +18.000 mark

В итоговом варианте была получена модель с монолитной каркасно-ствольной конструктивной системой (рис. 7, *a*).

Модель комплекса включает плитно-свайный фундамент, один подземный этаж высотой 3,3 м и 34 надземных этажа высотой по 3,6 м, из которых два этажа (19-й и 29-й) являются техническими, а первые пять этажей относятся к общему стилобату с эксплуатируемой кровлей на отметке +18,000 (рис. 7, *b*).

Расчетная конечно-элементная модель получена последующим экспортом итоговой модели в ПК

ЛИРА-САПР 2016 [10, 11]. Модель содержит 347 649 узлов, 398 842 элемента и 1 609 609 неизвестных (рис. 8). В расчетных моделях учтены статические и динамические нагрузки: собственный вес конструкций здания, постоянные нагрузки от веса пола и кровли, полезная нагрузка, длительная нагрузка от перегородок, снеговая нагрузка на покрытие, нагрузка от ветра с учетом пульсации.

При построении конечно-элементной модели использованы следующие типы конечных элементов (КЭ): универсальный пространственный стержневой КЭ, универсальные треугольный и четырехугольный пластинчатый КЭ. Шаг триангуляции пластин принят 0,5 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модальный анализ здания позволяет определить частоты и периоды его собственных колебаний, а также главные формы, по которым оценивается эффективность несущего каркаса на этапе проектирования. На формы колебаний влияют жесткость здания и его масса. Для проведения такого анализа создается отдельное нагружение, в котором составляется согласованная матрица масс от всех вертикальных нагрузок, учитывающая как возможность линейного перемещения масс, так и их кручение.

Анализ результатов расчета показал, что влияние на расчет каркаса здания будут оказывать первые шесть форм колебаний с частотами 0,31; 0,32; 0,34; 0,51; 0,60; 0,66 Гц соответственно, которые удовлетворяют условию $f < 1,14$. Характер 1–4-й форм собственных колебаний — поступательный; 5–6-й форм — крутильный вокруг оси Z (рис. 9).

Такое распределение главных форм колебаний позволяет судить о том, что каркас здания обеспечен



Рис. 8. Расчетная модель

Fig. 8. Calculation model

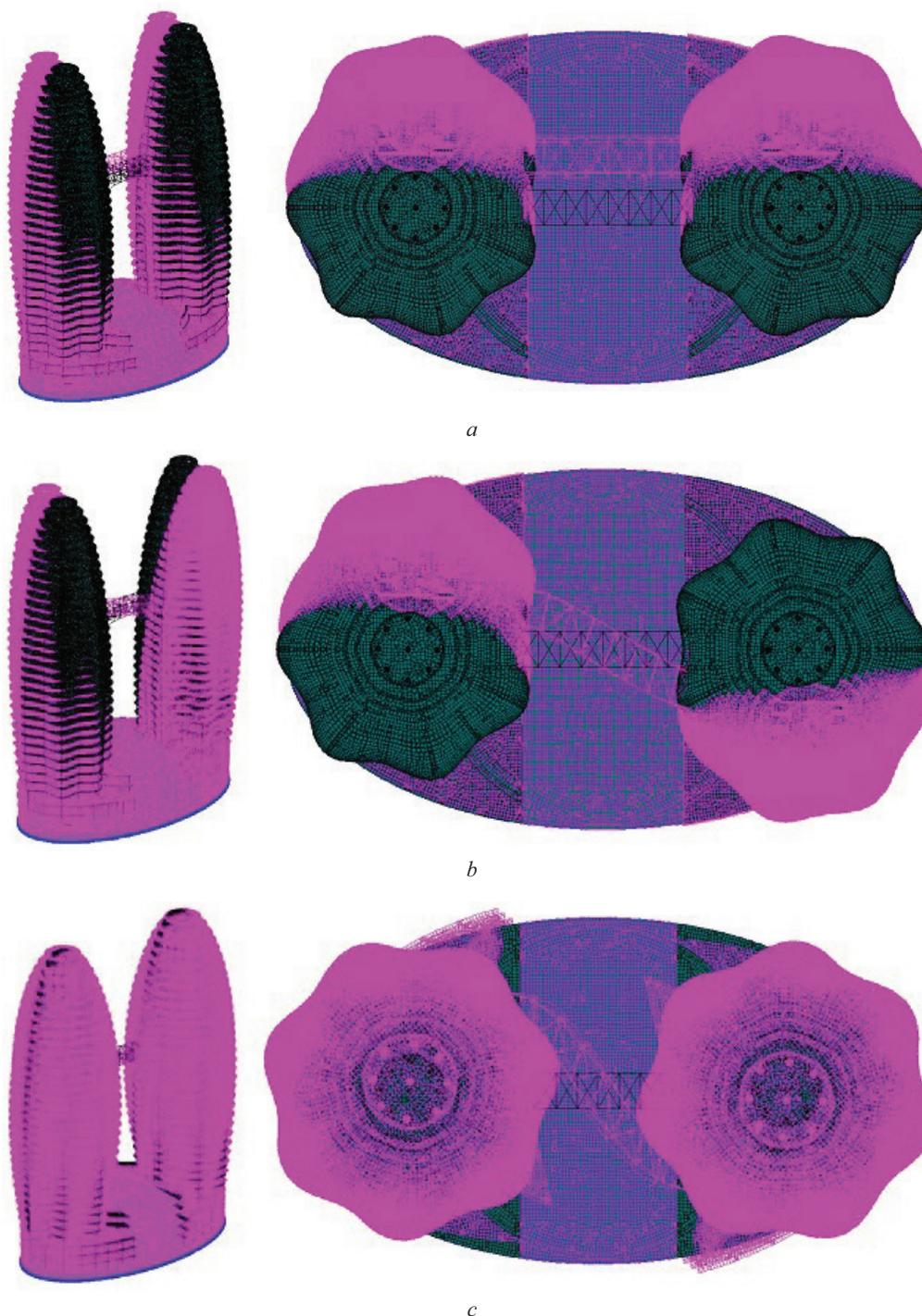


Рис. 9. Формы собственных колебаний: *a* — 1-я форма; *b* — 2-я форма; *c* — 6-я форма

Fig. 9. Forms of natural oscillations: *a* — 1 form; *b* — 2 form; *c* — 6 form

достаточной вертикальной жесткостью, введение дополнительных диафрагм не требуется.

Рассмотрены несколько вариантов моделей каркаса высотной части уникального многофункционального комплекса для проведения сравнительного анализа НДС и динамических характеристик. Расположение аутригерных этажей предусмотрено в различных уровнях [12–14]:

- модель 1 без аутригерных этажей (рис. 10, *a*);

- модель 2 с аутригерным этажом, расположенным на 19-м этаже (рис. 10, *b*);
- модель 3 с аутригерным этажом, расположенным на 29-м этаже (рис. 10, *c*);
- модель 4 с двумя аутригерными этажами, расположенными на 19-м и 29-м этажах (рис. 10, *d*).

Максимальные горизонтальные перемещения каркаса здания с вариантами расположения аутригерных этажей приведены на графике (рис. 11) [15, 16].



Рис. 10. Модели для численного эксперимента: *a* — вариант 1; *b* — вариант 2; *c* — вариант 3; *d* — вариант 4
 Fig. 10. Models for the numerical experiment: *a* — option 1; *b* — option 2; *c* — option 3; *d* — option 4

Анализ форм колебаний продемонстрировал, что первая и вторая форма колебаний всех расчетных моделей — поступательная, третья — крутильная [17, 18].

На рис. 12 представлены полученные горизонтальные деформации от сочетаний нагрузок с воздействием пульсационной составляющей ветровой нагрузки на каркас уникального комплекса с двумя аутригерными этажами в каждой высотной части [19, 20].

Анализ частот собственных колебаний показал, что во всех вариантах динамические характеристики соответствуют нормам проектирования, а горизонтальные максимальные перемещения каркаса здания не превышают предельных. На основе полученных данных сделан вывод о том, что оптимальным вариантом является решение с двумя аутригерными этажами на технических этажах, позволяющее не только увеличить общую устойчивость и пространственную

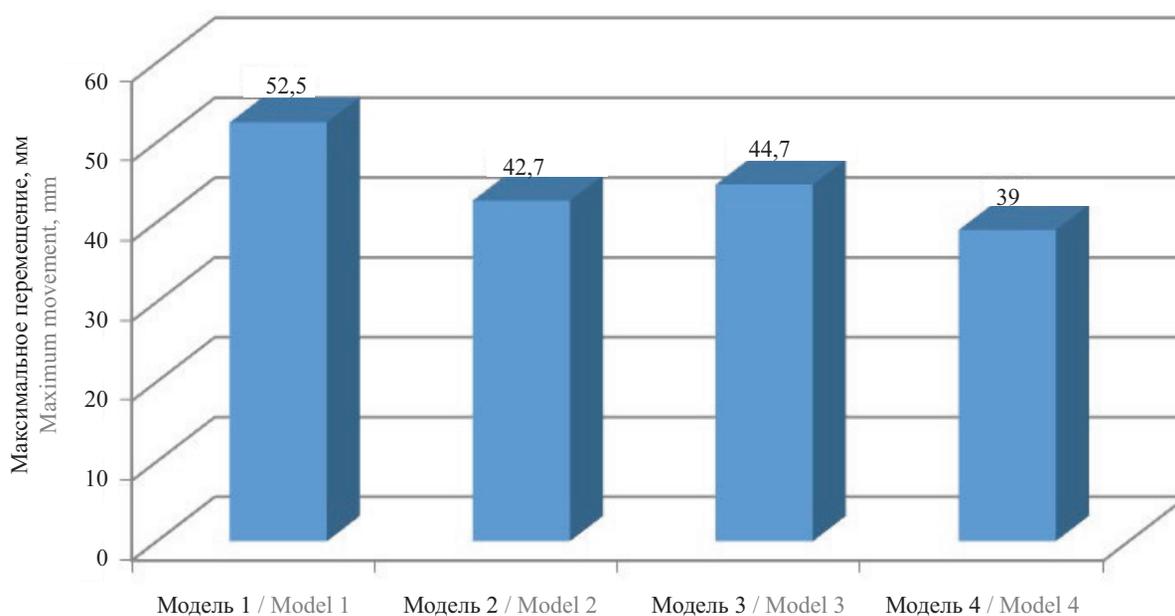


Рис. 11. График изменения горизонтальных перемещений каркаса здания

Fig. 11. Graph of changes in horizontal displacements of the building frame

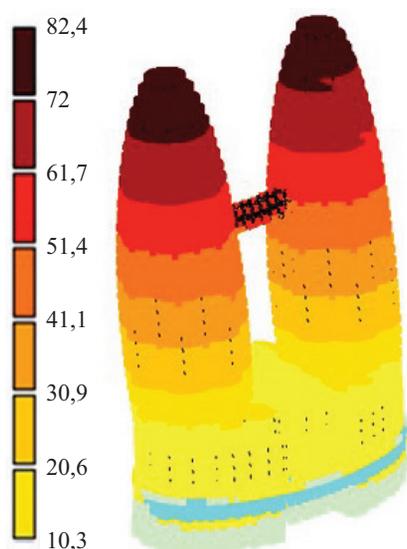


Рис. 12. Мозаика горизонтальных перемещений каркаса здания с аутригерами

Fig. 12. Mosaic of horizontal displacements of the building frame with outriggers

жесткость каркаса здания, но также уменьшить горизонтальные перемещения на 25 % по сравнению с вариантом без аутригеров.

Принятые конструктивные решения каркаса здания улучшили динамический отклик сооружения. В расчетах пульсационной составляющей учитываются только первые три формы собственных колебаний с соответствующими им значениями частот и периодов колебаний. Третья форма колебаний в исходном варианте каркаса здания была поступательной, кручение появлялось на шестой форме. Для окончательного варианта конструктивного решения крутильная форма колебаний — третья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен анализ эволюции формообразования гофрированной поверхности, в результате которого получена концепция проектируемого объекта. На основе полученного концепта разработаны ключевые архитектурно-планировочные и конструктивные решения 34-этажного многофункционального комплекса.

В ходе работы проанализированы несколько вариантов расположения аутригерных этажей. Включение в расчетную схему данных конструкций позволило уменьшить горизонтальные перемещения каркаса и обеспечило общую устойчивость здания. Требования норм по предельным перемещениям и частотам собственных колебаний объекта обеспечиваются.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Надыршин Н.М.* Параметризм как стиль в архитектурном дизайне // Вестник Оренбургского государственного университета. 2013. № 1 (150). С. 53–57. EDN PYNUPH.
2. *Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Agakhanov M.K., Trufanova E.V.* Simulation of an emergency situation of a digital architecture object // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 410. P. 02040. DOI: 10.1051/e3sconf/202341002040
3. *Кравченко Г.М., Манойленко А.Ю., Литовка В.В.* Параметрическая архитектура // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2 (49). С. 211. EDN MAJQNZ.
4. *Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Полтаев М.В., Пуданова Л.И.* Эволюция формообразования здания параметрической архитектуры с учетом аэродинамики // Инженерный вестник Дона. 2021. № 9 (81). С. 268–277. EDN QTXQKL.
5. *Шенцова О.М., Казанева Е.К.* Композиционное формообразование высотных зданий и сооружений // Евразийский союз ученых. 2017. № 11–1 (44). С. 5–12. EDN YLDKQL.
6. *Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Данилейко И.Ю., Забейворота В.А.* Исследование принципов формообразования объектов параметрической архитектуры // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 130. EDN USRXDK.
7. *Доствал Г., Хая В.* Применение высокопрочных бетонов в конструкциях современных высотных зданий // StudNet. 2022. Т. 5. № 6. С. 126. EDN DBAMWZ.
8. *Баранов А.О.* Конструктивные решения высотных зданий // AlfaBuild. 2018. № 3 (5). С. 33–51. EDN CYPMBH.
9. *Плетнев В.И.* О проектировании зданий повышенной этажности, стойких к прогрессирующему разрушению // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 1 (30). С. 115–116. EDN PANVFP.
10. *Агаханов Э.К.* О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2013. № 2 (29). С. 39–45. EDN SCMJQR.
11. *Агаханов Э.К.* Развитие комплексных методов в механике деформируемого твердого тела // Современные строительные материалы, технологии и конструкции : мат. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию ФГБОУ ВПО «ГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». 2015. С. 99–105. EDN TUBAXV.
12. *Малыгин А.Б.* Применение аутригерных этажей в высотном строительстве // Инженерный вестник Дона. 2022. № 4 (88). С. 444–452. EDN ZTJMYC.
13. *Барабаш М.* Методика моделирования прогрессирующего обрушения на примере реальных высотных зданий // Mokslas – Lietuvos Ateitis Science – Future of Lithuania. 2014. № 6 (5). С. 520–530.

14. Закиева Н.И., Гранкина Д.В., Ким К.А., Васильева Д.К. Процесс прогрессирующего обрушения высотных зданий и анализ решений, противодействующих ему // Инженерный вестник Дона. 2019. № 3 (54). С. 30. EDN PQYFFD.
15. Алмазов В.О. Проблемы прогрессирующего разрушения // Строительство и реконструкция. 2014. № 6 (56). С. 3–10. EDN TCWPWJ.
16. Алмазов В.О., Плотников А.И., Расторгуев Б.С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // Вестник МГСУ. 2011. № 2–1. С. 16–20. EDN OUVYJV.
17. Травуш В.И., Колчунов В.И., Леонтьев Е.В. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 46–54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.46-54. EDN YXLQNV.
18. Домарова Е.В. Оценка устойчивости к прогрессирующему разрушению монолитных железобетонных каркасных зданий с отдельными усиленными этажами // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 22–29. EDN RWMQDJ.
19. Пономарев В.Н., Травуш В.И., Бондаренко В.М., Еремин К.И. О необходимости системного подхода к научным исследованиям в области комплексной безопасности и предотвращения аварий зданий и сооружений // Архитектура. Строительство. Образование. 2014. № 2 (4). С. 7–16. EDN SABFSR.
20. Агаханов Э.К., Агаханов М.К., Труфанова Е.В. Моделирование поведения большепролетного уникального сооружения при динамическом воздействии // Системные технологии. 2023. № 4 (49). С. 17–24. DOI: 10.55287/22275398_2023_4_17. EDN RGSNAM.

Поступила в редакцию 17 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 24 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 2 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Элифхан Керимханович Агаханов** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой транспортных сооружений и строительных материалов; **Дагестанский государственный технический университет (ДГТУ)**; 367029; г. Махачкала, пр-т Имама Шамиля, д. 70; РИНЦ ID: 254858, Scopus: 57192378702, ResearcherID: L-2840-2017, ORCID: 0000-0001-7706-8044; elifhan@bk.ru;

Мурад Кириллович Агаханов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 254857, Scopus: 57192378440, ResearcherID: AAD-5554-2022, ORCID: 0000-0001-6564-370X; muradak@mail.ru;

Елена Васильевна Труфанова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики и теории сооружений; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; РИНЦ ID: 651996, Scopus: 37058153900, ResearcherID: ACX-5869-2022, ORCID: 0000-0003-3998-6041; El.Trufanova@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Nadyrshina N.M. Parametrizm as a style in architectural design. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2013; 1(150):53-57. EDN PYNUPH. (rus.).
2. Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Agakhanov M.K., Trufanova E.V. Simulation of an emergency situation of a digital architecture object. *E3S Web of Conferences*. 2023; 410:02040. DOI: 10.1051/e3s-conf/202341002040
3. Kravchenko G., Manoilenko A., Litovka V. Parametric architecture. *Engineering journal of Don*. 2018; 2(49):211. EDN MAJQHZ. (rus.).
4. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Poletaev M.V., Pudanova L.I. Formation evolution of the building of parametric architecture with regard to aerodynamics. *Engineering journal of Don*. 2021; 9(81):268-277. EDN QTXQKL. (rus.).
5. Shentsova O., Kazaneva E. Compositional Formation of High-Rise Buildings and Structures. *Eurasian Union of Scientists*. 2017; 11-1(44):5-12. EDN YLDKQL. (rus.).
6. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Danilevko I.Yu., Zabayvorota V.A. The principles of formation of parametric architecture objects. *Engineering journal of Don*. 2019; 1(52):130. EDN USRXDK. (rus.).
7. Dostval G., Haya W. Application of high-strength concrete in the structures of modern high-rise buildings. *StudNet*. 2022; 5(6):126. EDN DBAMWZ. (rus.).
8. Baranov A.O. Constructions of high-rise buildings. *AlfaBuild*. 2018; 3(5):33-51. EDN CYPMBH. (rus.).
9. Pletnev V.I. About constructive designing of tall buildings with increased number of stories resistant to progressive destroying. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 1(30):115-116. EDN PANVFP. (rus.).

10. Agakhanov E.K. About development of complex decision methods of the problems of deformable solid body mechanics. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2013; 2(29):39-45. EDN SCMJQR. (rus.).
11. Agakhanov E.K. Development of complex methods in mechanics of deformable solids. *Modern construction materials, technologies and structures : materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "GGNTU named after Academician M.D. Milionshchikov"*. 2015; 99-105. EDN TUBAXV. (rus.).
12. Malygin A.B. The use of outrigger floors in high-rise construction. *Engineering journal of Don*. 2022; 4(88):444-452. EDN ZTJMYC. (rus.).
13. Barabash M. Methodology for modeling progressive collapse using the example of real high-rise buildings. *Mokslas – Lietuvos Ateitis Science – Future of Lithuania*. 2014; 6(5):520-530. (rus.).
14. Zakieva N.I., Grankina D.V., Kim K.A., Vasileva D.K. The process of progressive collapse of high-rise buildings and analysis of decisions that counteract it. *Engineering journal of Don*. 2019; 3(54):30. EDN PQYFFD. (rus.).
15. Almazov V. The problems of progressive collapse. *Building and Reconstruction*. 2014; 6(56):3-10. EDN TCWPWJ. (rus.).
16. Almazov V.O., Plotnikov A.I., Rastorguev B.S. Problems of resistance of buildings to progressive collapse. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 2-1:16-20. EDN OUVYJV. (rus.).
17. Travush V.I., Kolchunov V.I., Leont'yev E.V. Protection of buildings and structures against progressive collapse within the framework of legislative and regulatory requirements. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 2:46-54. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.02.46-54. EDN YXLQNV. (rus.).
18. Domarova E.V. Evaluation of the Resistance to Progressive Collapse of Monolithic Reinforced Concrete Frame Buildings with Separate Amplified Floors. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 2:22-29. EDN RWMQDJ. (rus.).
19. Ponomarev V.N., Travush V.I., Bondarenko V.M., Eremin K.I. The necessity of systematic approach to scientific research in the field of comprehensive security and prevention of buildings and structures accidents. *Architecture. Construction. Education*. 2014; 2(4):7-16. EDN SABFSR. (rus.).
20. Agahanov E.K., Agahanov M.K., Trufanova E.V. Modeling the behavior of a long-span unique structure under dynamic impact. *System Technologies*. 2023; 4(49):17-24. DOI: 10.55287/22275398_2023_4_17. EDN RGSHAM. (rus.).

Received September 17, 2024.

Adopted in revised form on September 24, 2024.

Approved for publication on October 2, 2024.

B I O N O T E S : **Elifhan K. Agahanov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Structures and Construction Materials; **Dagestan State Technical University (DSTU)**; 70 Imam Shamil Avenue, Makhachkala, 367029, Russian Federation; ID RSCI: 254858, Scopus: 57192378702, ResearcherID: L-2840-2017, ORCID: 0000-0001-7706-8044; elifhan@bk.ru;

Murad K. Agahanov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 254857, Scopus: 57192378440, ResearcherID: AAD-5554-2022, ORCID: 0000-0001-6564-370X; muradak@mail.ru;

Elena V. Trufanova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation; ID RSCI: 651996, Scopus: 37058153900, ResearcherID: ACX-5869-2022, ORCID: 0000-0003-3998-6041; El.Trufanova@mail.ru.

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

Исследование механизма фотокаталитической активности оксида цинка в присутствии синтетического цеолита

Валентина Ивановна Логанина¹, Антон Дмитриевич Рыжов¹,
Игорь Александрович Пронин², Андрей Андреевич Карманов²,
Надежда Дмитриевна Якушова²

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС); г. Пенза, Россия;

² Пензенский государственный университет (ПГУ); г. Пенза, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследованы закономерности изменения фотокаталитической активности оксида цинка ZnO в присутствии синтетического цеолита. Приведены сведения о фотокаталитических свойствах поверхности известкового покрытия на основе состава с добавкой оксида цинка и синтетического цеолита.

Материалы и методы. Использован комплекс общенаучных методов исследования. При разработке рецептуры отделочного состава применяли известь с активностью 83 %. В качестве синтетического цеолита — алюмосиликатную добавку, полученную добавлением микродисперсных порошков алюминия в натриевое жидкое стекло с силикатным модулем 2,9 при температуре 60 °C в течение 90 мин. Фотокаталитическая активность ZnO с применением синтетического цеолита изучалась путем фотодеструкции красителя метиленового синего под действием УФ-света. Использованы методы, представленные в научно-технической литературе. Спектроскопические исследования образцов проводили на ИК-Фурье-спектрометре ФСМ 1201 (ООО «Инфраспек», Россия) и спектрофотометре СФ-56.

Результаты. Установлено повышение фотокаталитических свойств поверхности известкового покрытия на основе состава с применением оксида ZnO и синтетического цеолита. Определена оптическая ширина запрещенной зоны ZnO. Выявлено, что оптическая ширина запрещенной зоны оксида цинка в сочетании с синтетическим цеолитом составляет 2,96 и 2,70 эВ, что существенно меньше значения 3,37 эВ, характерного для оксида цинка.

Выводы. Для придания самоочищающихся свойств известкового покрытия предложено вводить в рецептуру фотокатализатор оксид цинка совместно с добавкой на основе синтетического цеолита.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фотокатализ, оксид цинка, синтетический цеолит, известковое покрытие, УФ-облучение, оптическая ширина запрещенной зоны, легирование цинка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Логанина В.И., Рыжов А.Д., Пронин И.А., Карманов А.А., Якушова Н.Д. Исследование механизма фотокаталитической активности оксида цинка в присутствии синтетического цеолита // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1758–1769. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1758-1769

Автор, ответственный за переписку: Валентина Ивановна Логанина, loganin@mail.ru.

Study of the mechanism of photocatalytic activity of zinc oxide in the presence of synthetic zeolite

Valentina I. Loganina¹, Anton D. Ryzhov¹, Igor A. Pronin², Andrej A. Karmanov²,
Nadezhda D. Yakushova²

¹ Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC); Penza, Russian Federation;

² Penza State University; Penza, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The regularities of changes in the photocatalytic activity of zinc oxide ZnO in the presence of synthetic zeolite are investigated. The data on the photocatalytic properties of the surface of lime coating based on the composition with the addition of zinc oxide and synthetic zeolite are presented.

Materials and methods. A complex of general scientific research methods was used. Lime with activity of 83 % was used in the development of the formulation of the finishing composition. An aluminosilicate additive was used as a synthetic zeolite, obtained by adding microdispersed aluminum powders to sodium liquid glass with silicate module of 2.9 at a temperature of 60 °C for 90 minutes. The photocatalytic activity of ZnO using synthetic zeolite was studied by photodegradation of methylene blue dye under the action of UV light. The methods presented in the scientific and technical literature were used. Spectroscopic studies of the specimens were carried out on an FSM 1201 IR Fourier spectrometer (LLC "Infraspek", Russia) and an SF-56 spectrophotometer.

Results. An increase in the photocatalytic properties of the surface of a lime coating based on a composition using ZnO oxide and synthetic zeolite was established. The optical band gap of ZnO was determined. It was revealed that the optical

band gap of zinc oxide in combination with synthetic zeolite is 2.96 and 2.70 eV, which is significantly less than the value of 3.37 eV characteristic of zinc oxide.

Conclusions. To impart self-cleaning properties to lime coatings, it is proposed to introduce zinc oxide into the formulation of the photocatalyst together with an additive based on synthetic zeolite.

KEYWORDS: photocatalysis, zinc oxide, synthetic zeolite, lime coating, UV irradiation, optical band gap, zinc doping

FOR CITATION: Loganina V.I., Ryzhov A.D., Pronin I.A., Karmanov A.A., Yakushova N.D. Study of the mechanism of photocatalytic activity of zinc oxide in the presence of synthetic zeolite. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1758-1769. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1758-1769 (rus.).

Corresponding author: Valentina I. Loganina, loganin@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях внешних воздействий на поверхность в ряде случаев наблюдается частичное разрушение штукатурного покрытия, проявляющееся в виде загрязнений, изменения цвета, отслоений или сетки из мелких волосяных трещин. Экологические проблемы, такие как загрязнение воздуха, побудили к применению в строительстве самоочищающихся покрытий. Одно из ключевых преимуществ — их способность уменьшать уровни загрязнения воздуха. Исследования показывают, что фасады многоэтажных домов, обработанные этим покрытием, могут эффективно уменьшать концентрации вредных газов. Существует два типа самоочищающегося покрытия: гидрофобное и гидрофильное [1–4]. Самоочищающееся гидрофобное покрытие отталкивает пыль и грязь, скатывая частицы со своей поверхности. Самоочищающееся гидрофильное покрытие с помощью механизма фотокатализа уменьшает количество загрязняющих веществ и пыли на его поверхности под воздействием УФ-излучения [5, 6].

Механизм фотокаталитической реакции базируется на образовании электронно-дырочной пары. При освещении фотокатализатора фотовозбужденный электрон мигрирует из валентной зоны в зону проводимости и образуются дырки в валентной группе, эти дырки могут генерировать гидроксильные радикалы.

Существует множество полупроводников, которые можно использовать в качестве фотокатализаторов, это TiO_2 , ZnO , WO_3 и Fe_2O_3 . Для создания самоочищающихся покрытий широкое применение в рецептуре отделочных составов нашел оксид титана (TiO_2) [7, 8]. TiO_2 имеет ширину запрещенной зоны 3,2 эВ и поглощает свет в широком диапазоне частот. Известны также композиционные фотокаталитические добавки, в частности системы $\text{TiO}_2\text{--SiO}_2$. Их фотокаталитическая активность не уступает активности промышленных фотокатализаторов на основе анатаза. Попытки перейти от УФ-излучения к видимому свету привели к созданию технологии легирования TiO_2 . Для улучшения фотокаталитических характеристик под прямыми солнечными лучами TiO_2 часто легируют или смешивают с различными материалами, например, неметаллами, металлами, оксидами металлов и т.д. [9, 10].

Например, пленки TiO_2 , легированные 5%-ным Ni, демонстрируют повышенное светопропускание в видимой и ближней ИК-областях и более низкий коэффициент отражения. Легирование TiO_2 атомами металлов, таких как V, изменяет его электронную структуру и влияет на его фотоактивность. Кроме того, в результате восстановления O_2 на поверхности TiO_2 образуются супероксидные свободные радикалы (O^{2-}), которые являются сильными окислителями органических загрязнений.

В последние годы привлекает большое внимание в применении фотокаталитических технологий полупроводник оксид цинка ZnO , поскольку он дешевле, имеет более высокую квантовую эффективность, экологически безопасен и обладает хорошей фотокаталитической активностью. Однако ZnO имеет большую запрещенную зону, около 3,37 эВ, так что он может поглощать только УФ-свет с длиной волны менее 387 нм [11, 12]. Чтобы увеличить активность ZnO в видимой области можно использовать различную модификацию поверхности, включая легирование металлами, неметаллическими элементами и оксидами металлов. Легирование переходными (Cu, Ni, Co, Mn и др.) или благородными металлами (Ag, Pd) — эффективный метод изменения физических, химических и поверхностных свойств фотокатализатора оксида цинка ZnO . Активированный ZnO , легированный медью (1,5 мас. %), проявляет большие фотокаталитические свойства при обесцвечивании красителя за счет более высокой удельной поверхности и улучшения разделения носителей заряда. Модифицированный серебром ZnO показывает примерно в четыре раза большую фотокаталитическую активность.

Наноккомпозит $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}$ характеризуется увеличенной шириной запрещенной зоны и активен при освещении видимым светом [13]. Наноккомпозиты $\text{ZnO}/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ проявляют превосходную фотокаталитическую активность при разложении красителя родамина В под воздействием естественного солнечного излучения. Деградация за 3 ч была достигнута на 95 % [14].

Для повышения эффективности самоочищения покрытий предложено применение в рецептуре фотокатализаторов, полученных путем осаждения их частиц на инертные носители [15–22].

Интересно исследование возможности использования синтетических цеолитов в качестве носи-

телей при получении фотокатализатора на основе оксида цинка. Авторами разработана технология синтеза синтетических цеолитов, заключающаяся в добавлении микродисперсных порошков алюминия в натриевое жидкое стекло при температуре 60–90 °С в течение 30–120 мин [23, 24]. Синтезируемая добавка представляет собой легкий порошок светло-серого цвета (размер частиц 2–20 мкм), с насыпной плотностью $0,55 \pm 0,05$ г/см³. Рентгенофазовый анализ показал, что минеральный состав образца в основном представлен наноструктурированным кремнеземом и алюмосиликатами натрия. Аморфная фаза — алюминатом натрия. Содержание аморфной фазы составляет 83 %. Выявлено высокое содержание оксидов Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O , составляющее соответственно 51,03; 36,36; 11,89 %. Изучен характер энергетических свойств поверхности добавки. Установлено, что кислотно-основный центр поверхности образца добавки характеризуется преобладанием центров по Бренстеду. Проведенные исследования подтвердили эффективность применения данной добавки в известковых сухих строительных смесях. Определено, что максимальная прочность известковых композитов достигается при введении добавки в количестве 10 % от массы извести, составляющей в возрасте 28 сут воздушно-го твердения $R_{сж} = 2,71$ МПа [25–27].

Высокое содержание SiO_2 , Al_2O_3 , а также результаты исследований кислотно-основных свойств поверхности алюмосиликатной добавки указывают на способность к активному взаимодействию с фотокатализатором. Полученные данные позволяют сделать вывод, что синтезируемая добавка на основе алюмосиликатов способна выступать в качестве носителя для фотокатализатора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отделочный состав готовили с использованием следующих материалов: известь с активностью 83 % с удельной поверхностью 13 478 см²/г. В качестве наполнителя применяли перлитовый песок (ГОСТ 10832–91 «Песок и щебень перлитовые вспученные. Технические условия»). Содержание песка составляло 15 % от массы извести.

В качестве синтетического цеолита применяли алюмосиликатную добавку, полученную путем добавления микродисперсных порошков алюминия в натриевое жидкое стекло с силикатным модулем 2,9 при температуре 60 °С в течение 90 мин. При оценке свойств добавки был проведен анализ гранулометрического состава с помощью Fritsch particle sizer Analysette 22. Полученные данные показывают, что 2,48 % составляют частицы размером менее 0,010–2,0 мкм, содержание частиц размером 2,0–80,0 мкм — 68,18 %.

Фотокатализатором в работе служил оксид цинка ZnO. Для исследования закономерностей измене-

ния фотокаталитической активности оксида цинка в зависимости от удельной поверхности применяли механический помол в планетарной мельнице. Удельную поверхность ZnO определяли с помощью прибора ПСХ-10а.

Применяли два способа получения фотокатализатора, иммобилизованного на носителе. Первый способ — механическое смешивание оксида цинка с алюмосиликатной добавкой, второй — добавление ZnO в процессе синтеза алюмосиликатной добавки.

Фотокаталитическую активность ZnO исследовали путем фотодеструкции красителя метиленового синего (МС) под действием УФ-света. Эксперименты проводили с применением УФ-лампы с диапазоном излучения 315–400 нм мощностью 18 Вт, которую помещали непосредственно над раствором на расстоянии 10 см от образца. Концентрация красителя составляла 0,1–0,2 г/л. Для определения степени деградации МС в зависимости от удельной поверхности и концентрации ZnO через равные промежутки времени отбирали от суспензии пробы и определяли значение оптической плотности раствора с помощью спектрофотометра при длине волны 664 нм.

Дополнительно для оценки фотокаталитической активности изготовили образцы покрытия на базе известкового состава с добавкой на основе синтезируемых алюмосиликатов и оксида цинка. Фотокатализатор вводился в состав вместе с водой затворения. После отверждения покрытий приготовленный раствор красителя МС наносился на подготовленную поверхность образцов. Образцы помещали в установку с диапазоном УФ-излучения 315–400 нм (рис. 1).

Спектроскопические исследования качественного состава образцов выполнили на ИК-Фурье-спектрометре ФСМ 1201 (ООО «Инфраспек», Россия). Образцы для измерений готовили в виде прессован-

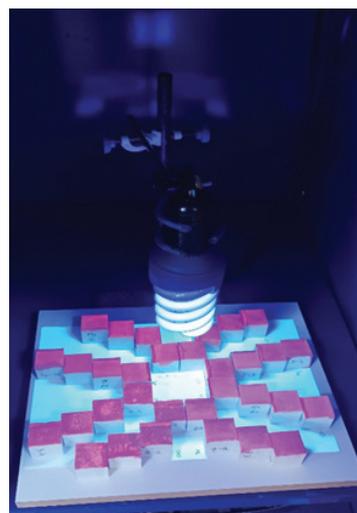


Рис. 1. УФ-установка с облучаемыми образцами покрытия
Fig. 1. UV installation with irradiated coating specimens

ных с бромидом калия таблеток (усилие прессования 10 т) при массовом соотношении $x:30x$, где x — масса исходной навески, $30x$ — масса КВr. Непосредственно перед прессованием порошки бромида калия и исследуемых образцов перетирали в агатовой ступке в течение двух минут. Дегазация образцов в процессе прессования не осуществлялась.

Для оценки достоверности полученных экспериментальных данных проводилась их статистическая обработка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследований показывают, что с увеличением концентрации оксида цинка наблюдается большая скорость обесцвечивания раствора. Установлено, что наибольшей фотокаталитической активностью обладает оксид цинка, удельная поверхность которого составляет $8,5 \text{ м}^2/\text{г}$. Максимальная скорость обесцвечивания раствора красителя МС отмечается, если применяется фотокатализатор, иммобилизованный на поверхности алюмосиликатной добавки (рис. 2).

Проанализирована кинетика деградации метиленового синего при применении в качестве фотокатализатора оксида цинка и фотокатализатора, полученного путем осаждения оксида цинка на алюмосиликатную добавку. Установлено, что фотокатализатор, полученный путем осаждения оксида цинка на алюмосиликатную добавку, способствует наибольшей степени деградации МС.

Полученные экспериментальные данные кинетики деградации свидетельствуют, что существует линейная зависимость между временем УФ-облучения и $\ln(C_0/C_t)$. На рис. 3 приведена линейная зависимость между $\ln(C_0/C_t)$ и временем облучения t . Кинетика разложения метиленового синего с различными фотокатализаторами протекает по механизму

псевдопервого порядка. Процесс является кинетическим и описывается уравнением:

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) = k_a t, \quad (1)$$

где C_0 — концентрация в момент времени $t = 0$ облучения; C_t — концентрация в момент времени t ; k_a — кажущаяся константа скорости первого порядка (мин^{-1}).

Результаты испытаний и расчетов свидетельствуют, что константа скорости деградации МС в случае применения в качестве фотокатализатора оксида цинка составляет $0,045 \text{ мин}^{-1}$, а при применении оксида цинка с алюмосиликатной добавкой — $0,060 \text{ мин}^{-1}$.

Дополнительно для оценки фотокаталитической активности оксида цинка с добавкой синтезируемого цеолита изготовили образцы покрытия на основе известкового состава и после отверждения в течение 28 сут помещали в установку с диапазоном УФ-излучения 315–400 нм. Результаты представлены на рис. 4.

Результаты испытаний показывают, что наличие синтезированной алюмосиликатной добавки в составе фотокатализатора способствует более ранней деградации МС в процессе фотокатализа (рис. 4, ряд 3). Применение в качестве фотокатализатора только оксида цинка приводит к большему времени деградации метиленового синего (рис. 4, ряд 1 и 2).

Для изучения механизма деградации МС в присутствии оксида цинка и алюмосиликатной добавки были определены ИК-спектры пропускания исследуемых образцов. На рис. 5 представлены ИК-спектры пропускания исследуемых образцов. Измерения проводили в спектральном диапазоне $450\text{--}4450 \text{ см}^{-1}$ со спектральным разрешением 4 см^{-1} . Для удобства восприятия ИК-спектры нормировались и аддитивно смещались относительно нулевой точки по оси ординат.

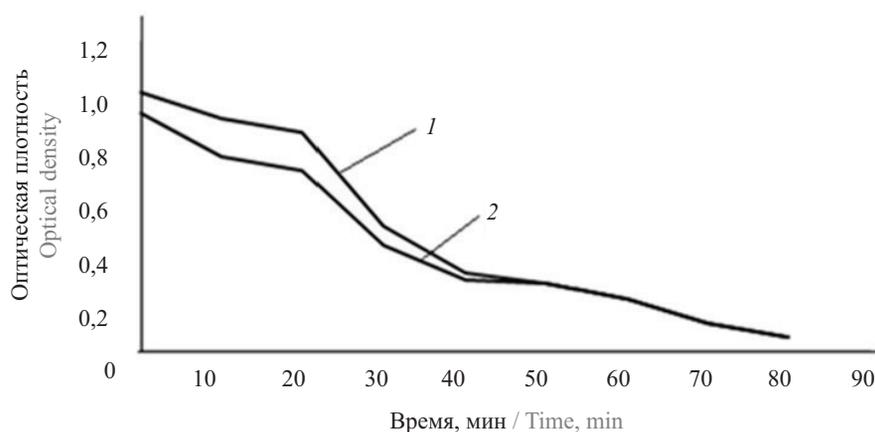


Рис. 2. Зависимость оптической плотности раствора красителя метиленового синего от времени облучения при содержании оксида цинка с удельной поверхностью $S = 6,2 \text{ м}^2/\text{г}$: 1 — 1,0 %; 2 — 1 % + 1 % алюмосиликатной добавки

Fig. 2. Dependence of optical density of methylene blue dye solution on the irradiation time with a content of zinc oxide with specific surface area $S = 6.2 \text{ м}^2/\text{g}$: 1 — 1.0 %; 2 — 1 % + 1 % aluminosilicate additive

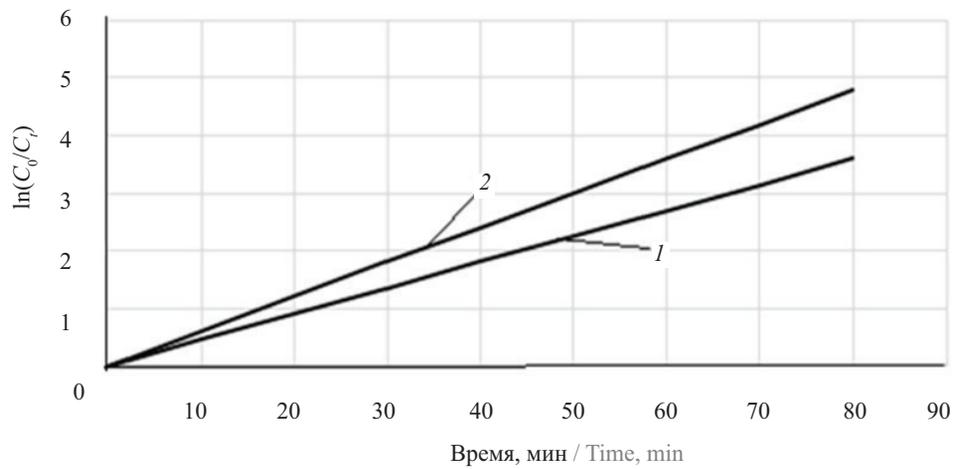


Рис. 3. Зависимость $\ln(C_0/C_t)$ от времени реакции t : 1 — оксид цинка с удельной поверхностью $S = 6,2 \text{ м}^2/\text{г}$; 2 — оксид цинка с алюмосиликатной добавкой

Fig. 3. Dependence of $\ln(C_0/C_t)$ on reaction time t : 1 — zinc oxide with specific surface $S = 6.2 \text{ м}^2/\text{г}$; 2 — zinc oxide with aluminosilicate additive

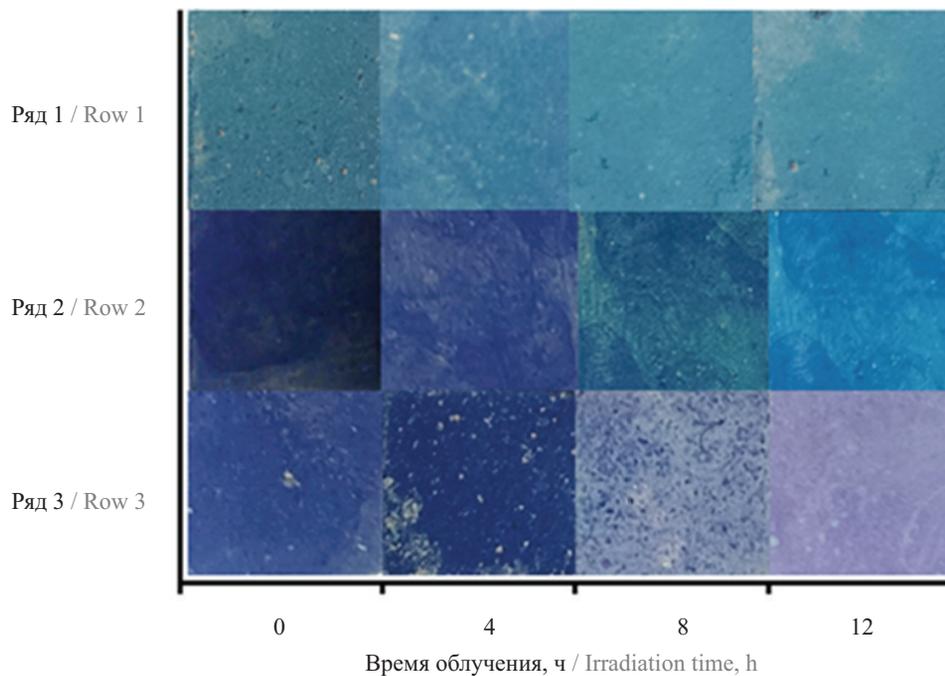


Рис. 4. Дegradация раствора метиленового синего на поверхности известкового покрытия. Состав содержит: ряд 1 — 5 % ZnO ($S = 6,2 \text{ м}^2/\text{г}$); ряд 2 — 10 % ZnO ($S = 6,2 \text{ м}^2/\text{г}$); ряд 3 — 10 % алюмосиликатной добавки + 10 % ZnO ($S = 6,2 \text{ м}^2/\text{г}$)

Fig. 4. Degradation of methylene blue solution on the surface of a lime coating. The composition contains: row 1 — 5 % ZnO ($S = 6.2 \text{ м}^2/\text{г}$); row 2 — 10 % ZnO ($S = 6.2 \text{ м}^2/\text{г}$); row 3 — 10 % aluminosilicate additive + 10 % ZnO ($S = 6.2 \text{ м}^2/\text{г}$)

Ключевой особенностью анализируемых ИК-спектров является наличие полос и пиков поглощения, отвечающих не только алюмосиликатной добавке, но ультрадисперсному порошку ZnO. Непосредственно качественному составу алюмосиликатной добавки отвечают несколько характеристических полос и пиков поглощения, так, например, широкая интенсивная полоса поглощения около 1010 см^{-1} соответствует валентным симметричным и асимметричным колебаниям связей Si-O-Si. Пик

поглощения малой интенсивности с максимумом 706 см^{-1} , наиболее вероятно, отвечает псевдорешеточным колебаниям колец, построенных из алюмо- и кремнекислородных тетраэдров. Слабоинтенсивные пики поглощения при 870 и 1396 см^{-1} принадлежат соответственно валентным колебаниям связей Al-O⁻ и Si-O⁻ в комплексном анионе алюмосиликата. Также все исследуемые образцы содержат воду как в связанном, так и свободном виде, на что указывает широкая полоса поглощения $3050\text{--}3650 \text{ см}^{-1}$,

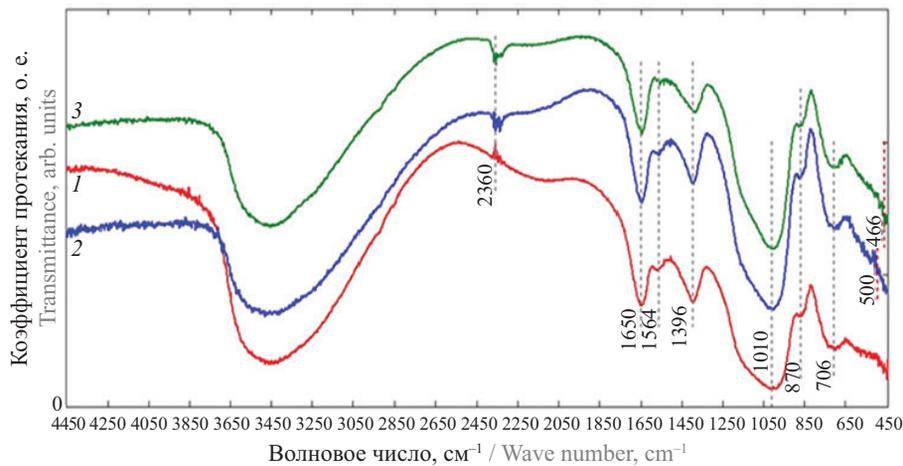


Рис. 5. ИК-спектры пропускания исследуемых образцов: 1 — алюмосиликатная добавка; 2 — смешение ультрадисперсного порошка ZnO и алюмосиликатной добавки; 3 — алюмосиликатная добавка с внесенным в процессе синтеза ультрадисперсным порошком оксида цинка ZnO, волновое число, см⁻¹

Fig. 5. IR transmission spectra of the specimens under study: 1 — aluminosilicate additive; 2 — mixing ultrafine ZnO powder and aluminosilicate additive; 3 — aluminosilicate additive with ultrafine ZnO powder introduced during the synthesis process, cm⁻¹

отвечающая валентным колебаниям OH-групп, а также пики поглощения 1650 см⁻¹, которые относятся к деформационным колебаниям Н-О-Н. Кроме того, в объеме и на поверхности образцов активно адсорбируется углекислый газ, о чем свидетельствует пик поглощения при 2360 см⁻¹, а также слабые пики поглощения 1564 см⁻¹, которые достоверно не идентифицируются и предположительно могут принадлежать валентным асимметричным колебаниям CO²⁻ группы.

В таблице обобщены результаты анализа качественного состава исследуемых образцов.

Характерными пиками поглощения, соответствующими оксиду цинку, смешанному с алюмосиликатной добавкой, являются полосы поглощения при 500 см⁻¹ (кривая 2 на рис. 5), отвечающие деформационным решеточным колебаниям связей Zn = O. Следует отметить, что для объемного кристалла ZnO характерно положение полос поглощения около 450 см⁻¹ и их сильное смещение

Интерпретация ИК-спектров пропускания исследуемых образцов

Interpretation of IR transmission spectra of the specimens under study

Положение полос и пиков поглощения, см ⁻¹ Position of absorption bands and peaks, cm ⁻¹	Интерпретация Interpretation
466, 500	Деформационные решеточные колебания связей Zn = O Deformation lattice vibrations of Zn = O bonds
706	Псевдорешеточные колебания колец, построенных из алюмо- и кремнекислородных тетраэдров Pseudolattice vibrations of rings built from aluminum- and silicon-oxygen tetrahedra
870	Валентные колебания связей Al-O ⁻ Stretching vibrations of Al-O ⁻ bonds
1010	Валентные симметричные и асимметричные колебания связей Si-O-Si Stretching symmetric and asymmetric vibrations of Si-O-Si bonds
1396	Валентные колебания связей Si-O ⁻ Stretching vibrations of Si-O ⁻ bonds
1564	Валентные асимметричные колебания CO ²⁻ группы Stretching asymmetric vibrations of the CO ²⁻ group
1650	Деформационные колебания Н-О-Н Bending vibrations Н-О-Н
2360	Атмосферный CO ₂ Atmospheric CO ₂
3050–3650	Валентные колебания OH-групп Stretching vibrations of OH groups

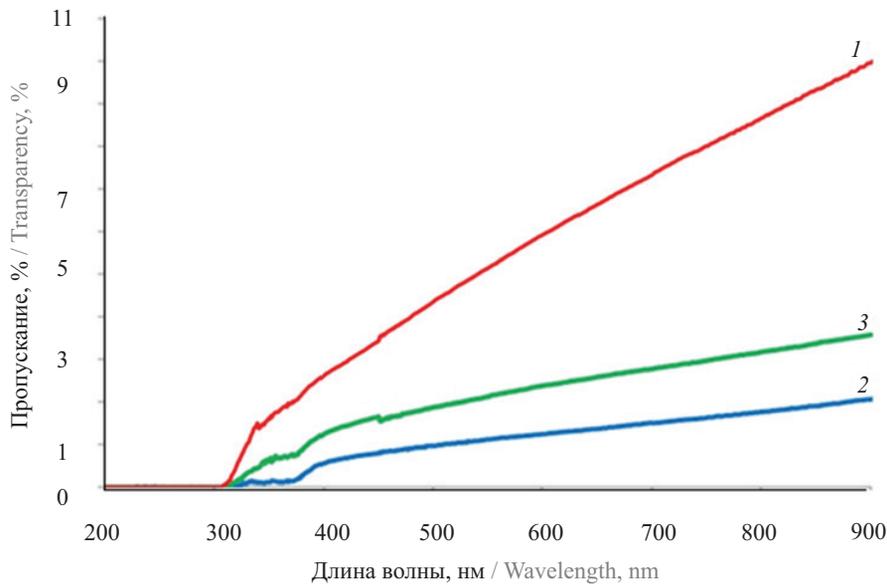


Рис. 6. Оптические спектры пропускания исследуемых образцов: 1 — алюмосиликатная добавка; 2 — смешение ультрадисперсного порошка ZnO и алюмосиликатной добавки; 3 — алюмосиликатная добавка с внесенным в процессе синтеза ультрадисперсным порошком ZnO

Fig. 6. Optical transmission spectra of the specimens under study: 1 — aluminosilicate additive; 2 — mixing ultrafine ZnO powder and aluminosilicate additive; 3 — aluminosilicate additive with ultrafine ZnO powder introduced during the synthesis process

(до 500 см^{-1}) может быть объяснено дефектами и микродеформациями кристаллической решетки в процессе механического высокоэнергетического размолла порошка. В свою очередь, для оксида цинка, добавляемого к алюмосиликатной добавке непосредственно в процессе синтеза, характерен пик поглощения с максимумом 466 см^{-1} (кривая 3 на рис. 6). Наблюдаемое смещение данных пиков поглощения существенно более слабое и вероятно указывает либо на уменьшение микродеформаций кристаллической решетки за счет реконструкции поверхности частиц ультрадисперсного порошка ZnO, либо на уменьшение концентрации дефектов.

Для подтверждения этого предположения проводились спектрофотометрические измерения образцов. Измерения выполнялись на спектрофотометре СФ-56 (ОКБ Спектр, Россия) в диапазоне длин волн излучения 200–900 нм, шаг дискретизации 1 нм. Так же как и для анализа качественного состава образцы для измерений готовили в виде прессованных с бромидом калия таблеток (усилие прессования 10 т) при массовом соотношении $x:30x$, где x — масса исходной навески; $30x$ — масса KBr.

На рис. 7 приведены спектры пропускания излучения через исследуемые образцы в видимом и ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Слабое поглощение излучения бромидом калия (при длинах волн более 200 нм) позволяет проводить исследования образцов непосредственно в виде спрессованных таблеток.

Анализ представленных на рис. 6 спектров показывает, что все исследуемые образцы оптически

прозрачны при длинах волн более 300 нм, что дает возможность использовать метод Тауца для определения оптической ширины запрещенной зоны ZnO, основываясь на следующей формуле [27]:

$$(ah\nu)^n = A(h\nu - E_g), \quad (2)$$

где α — коэффициент поглощения; h — постоянная Планка; ν — частота колебаний; A — энергия фотона; E_g — оптическая ширина запрещенной зоны.

Оптическую ширину запрещенной зоны рассчитывали путем построения графика зависимости $(ah\nu)^2$ от E_g , и экстраполируя линейную аппроксимацию прямого участка на ось $(ah\nu)^2 = 0$ (рис. 7).

Для прямозонного полупроводника коэффициент $n = 2$, в то время как для непрямозонного $n = 0,5$. В рамках настоящего исследования предполагалось, что оксид цинка является прямозонным полупроводником.

На рис. 7 представлены результаты определения оптической ширины запрещенной зоны ZnO в исследуемых образцах по методу Тауца.

Анализ полученных результатов показывает, что оптическая ширина запрещенной зоны оксида цинка составляет 2,96 и 2,70 эВ, что существенно меньше типичного значения 3,37 эВ, характерного для объемного материала. Это обстоятельство, по всей видимости, может быть связано с легированием высокодефектного ультрадисперсного порошка ZnO ионами алюминия или кремния в процессе синтеза или смешения с алюмосиликатной добавкой, что коррелирует с данными инфракрасной спектроскопии.

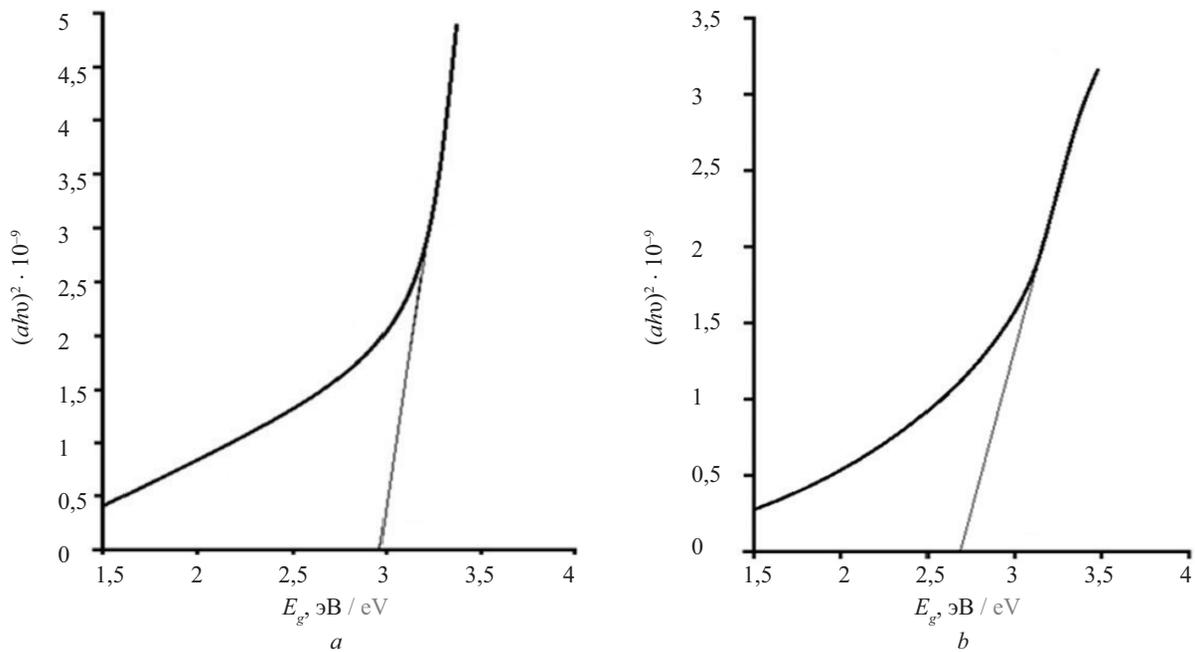


Рис. 7. Определение оптической ширины запрещенной зоны ZnO по методу Тауца в исследуемых образцах: *a* — смешение ультрадисперсного порошка ZnO и алюмосиликатной добавки; *b* — алюмосиликатная добавка с внесенным в процессе синтеза ультрадисперсным порошком ZnO

Fig. 7. Determination of the optical band gap of ZnO using the Tauc method in the specimens under study: *a* — mixing ultrafine ZnO powder and aluminosilicate additive; *b* — aluminosilicate additive with ultrafine ZnO powder introduced during the synthesis process

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложено для получения самоочищающихся известковых покрытий применение оксида цинка, полученного путем осаждения его частиц на синтезированные гидроалюмосиликаты кальция. Установлено повышение фотокаталитической активности оксида цинка, иммобилизованного на поверхности алюмосиликатной добавки. Выявлено смещение характеристической моды, соответствующей оксиду цинку, смешан-

ному с алюмосиликатной добавкой, что указывает либо на уменьшение микродеформаций кристаллической решетки за счет реконструкции поверхности частиц ультрадисперсного порошка ZnO, либо на уменьшение концентрации дефектов. Использован метод спектрофотометрии для определения оптической ширины запрещенной зоны. Определено уменьшение оптической ширины запрещенной зоны оксида цинка в присутствии синтезированного цеолита до 2,7–2,9 эВ в зависимости от технологии получения фотокатализатора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Glagolev E.S., Vodopyanov I.O. Self-restoration hardening systems of high-strength concrete of a new generation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. Issue 1. P. 012156. DOI: 10.1088/1757-899x/560/1/012156
2. Фаликман В.Р., Вайнер А.Я. Новые высокоэффективные нанодобавки для фотокаталитических бетонов: синтез и исследование // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2015. Т. 7. № 1. С. 18–28. DOI: 10.15828/2075-8545-2015-7-1-18-28. EDN TIXUVD.
3. Лукутцова Н.П., Постникова О.А., Соболева Г.Н., Ротарь Д.В., Оглоблина Е.В. Фотокаталитическое покрытие на основе добавки нанодисперс-

- ного диоксида титана // Строительные материалы. 2015. № 11. С. 5–8. EDN VCIDUF.
4. Фаликман В.Р. Фотокаталитически активные строительные материалы с наночастицами диоксида титана — новая концепция улучшения экологии мегаполисов. М. : МГСУ, 2015. 49 с.
5. Kiriakidou F., Kondarides D.I., Verykios X.E. The effect of operational parameters and TiO₂-doping on the photocatalytic degradation of azo-dyes // Catalysis Today. 1999. Vol. 54. Issue 1. Pp. 119–130. DOI: 10.1016/s0920-5861(99)00174-1
6. Umebayashi T., Yamaki T., Itoh H., Asai K. Analysis of electronic structures of 3d transition metal-doped TiO₂ based on band calculations // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2002. Vol. 63. Is-

sue 10. Pp. 1909–1920. DOI: 10.1016/s0022-3697(02)-00177-4

7. Степанов А.Ю., Сотникова Л.В., Владимиров А.А., Дягилев Д.В., Ларичев Т.А., Пугачев В.М. и др. Синтез и исследование фотокаталитических свойств материалов на основе TiO_2 // Вестник КемГУ. 2013. № 2–1 (54). С. 249–255. EDN OLMIVS.

8. Самченко С.В., Козлова И.В., Коршунов А.В., Земскова О.В., Дударева М.О., Агафонова Н.З. Исследование физико-механических и фотокаталитических свойств цементных композитов, модифицированных промышленным диоксидом титана // Техника и технология силикатов. 2023. Т. 30. № 2. С. 152–161. EDN LFEMUW.

9. Козлова И.В., Земскова О.В., Самченко С.В., Дударева М.О. Варианты синтеза фотокаталитически активной добавки для цементных систем // Техника и технология силикатов. 2023. Т. 30. № 3. С. 206–216. EDN HJAAJE.

10. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Korshunov A.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O. Synthesis and evaluation of properties of an additive based on bismuth titanates for cement systems // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 18. P. 6262. DOI: 10.3390/ma16186262

11. Лашкова Н.А., Максимов А.И., Рябко А.А., Бобков А.А., Мошников В.А., Теруков Е.И. Синтез наноструктур на основе оксида цинка для создания гетероструктурных фотовольтаических элементов // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. № 9. С. 1276–1282. EDN XAXUWV.

12. Аверин И.А., Пронин И.А., Якушова Н.Д., Карманов А.А., Сычев М.М., Вихман С.В. и др. Анализ структурной эволюции порошков оксида цинка, полученных методом механического высокоэнергетического размола // Журнал технической физики. 2019. Т. 89. № 9. С. 1406–1411. DOI: 10.21883/JTF.2019.09.48067.437. EDN OHCSAR.

13. Nikazar M., Alizadeh M., Lalavi R., Rostami M.H. The optimum conditions for synthesis of Fe_3O_4/ZnO core/shell magnetic nanoparticles for photodegradation of phenol // Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2014. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1186/2052-336x-12-21

14. Elshypany R., Selim H., Zakaria K., Moustafa A.H., Sadeek S.A., Sharaa S.I. et al. Elaboration of Fe_3O_4/ZnO nanocomposite with highly performance photocatalytic activity for degradation methylene blue under visible light irradiation // Environmental Technology & Innovation. 2021. Vol. 23. P. 101710. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101710

15. Губарева Е.Н., Баскаков П.С., Строчкова В.В., Лабузова М.В. Особенности структуры зольей диоксида титана и морфологии пленок на их основе // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2019. № 48 (74). С. 78–83. EDN KFLTUQ.

16. Zhang J., Liu Z. Fabrication and characterization of Eu^{2+} -doped lanthanum-magnesium-gallium/ TiO_2 -based composition as photocatalytic materials for cement concrete-related methyl orange (MO) degradation // Ceramics International. 2019. Vol. 45. Issue 8. Pp. 10342–10347. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.02.090

17. Sreethawong T., Suzuki Y., Yoshikawa S. Photocatalytic evolution of hydrogen over mesoporous TiO_2 supported NiO photocatalyst prepared by single-step sol-gel process with surfactant template // International Journal of Hydrogen Energy. 2005. Vol. 30. Issue 10. Pp. 1053–1062. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2004.09.007

18. Li G., Mang C., Xing L., Cao P., Cai Y., Luo J. et al. Surfactant-assisted synthesis of Mo-doped TiO_2/FAC (fly ash cenosphere) for degradation of methylene blue dye under visible light irradiation // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2022. Vol. 651. P. 129669. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129669

19. Yan Y., Li C., Wu Y., Gao J., Zhang Q. From isolated Ti-oxo clusters to infinite Ti-oxo chains and sheets: Recent advances in photoactive Ti-based MOFs // Journal of Materials Chemistry A. 2020. Vol. 8. Issue 31. Pp. 15245–15270. DOI: 10.1039/d0ta03749d

20. Cheng W., Li C., Ma X., Yu L., Liu G. Effect of SiO_2 -doping on photogenerated cathodic protection of nano- TiO_2 films on 304 stainless steel // Materials & Design. 2017. Vol. 126. Pp. 155–161. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.04.041

21. Liu W., Li C., Mao J., Hu L., Li M., Yun Y. et al. Synergistic effect of xSi- TiO_2 ceramic membrane on photocatalytic oxidation and water vapor recovery of high humidity NO // Separation and Purification Technology. 2023. Vol. 318. P. 123928. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.123928

22. Vezbicke B.D., Patel S., Davis B.E., Birnie D.P. Evaluation of the Tauc method for optical absorption edge determination: ZnO thin films as a model system // Physica status solidi (b). 2015. Vol. 252. Issue 8. Pp. 1700–1710. DOI: 10.1002/pssb.201552007

23. Loganina V.I., Ryzhov A.D. Structure and properties of synthesized additive based on amorphous aluminosilicates // Case Studies in Construction Materials. 2015. Vol. 3. Pp. 132–136. DOI: 10.1016/j.cscm.2015.10.005

24. Loganina V.I., Ryzhov A.D. Properties of limy composites with the addition aluminosilicates // Contemporary Engineering Sciences. 2015. Vol. 8. Pp. 409–413. DOI: 10.12988/ces.2015.5237

25. Loganina V.I., Skachkov Y.P., Ryzhov A.D. Additive based on aluminosilicates for lime dry mortar mixes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 441. P. 012028. DOI: 10.1088/1757-899x/441/1/012028

26. Loganina V.I., Makarova L.V., Tarasov R.V., Ryzhov A.D. The limy composite binder with the use of the synthesized aluminosilicates // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 662. Pp. 11–14. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.662.11

27. Ellerbrock R., Stein M., Schaller J. Comparing amorphous silica, short-range-ordered silicates and silicic acid species by FTIR // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-022-15882-4

Поступила в редакцию 1 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 июля 2024 г.

Одобрена для публикации 23 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Валентина Ивановна Логанина** — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой управления качеством и технологий строительного производства; **Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС)**; 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28; РИНЦ ID: 369481, Scopus: 6602801860, ResearcherID: N-5558-2015, ORCID: 0000-0001-7532-0074; loganin@mail.ru;

Антон Дмитриевич Рыжов — старший преподаватель кафедры информационно-вычислительных систем; **Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС)**; 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28; РИНЦ ID: 818457, Scopus: 56500199300, ORCID: 0000-0003-4861-7352; penza48@yandex.ru;

Игорь Александрович Пронин — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой нано- и микроэлектроники; **Пензенский государственный университет (ПГУ)**; 440026, г. Пенза, ул. Красная, д. 40; nano-micro@pnzgu.ru;

Андрей Андреевич Карманов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры нано- и микроэлектроники; **Пензенский государственный университет (ПГУ)**; 440026, г. Пенза, ул. Красная, д. 40; РИНЦ ID: 652871, Scopus: 55597544400, ResearcherID: S-5175-2016, ORCID: 0000-0001-8318-8149; starosta07km@mail.ru;

Надежда Дмитриевна Якушова — кандидат технических наук, доцент кафедры нано- и микроэлектроники; **Пензенский государственный университет (ПГУ)**; 440026, г. Пенза, ул. Красная, д. 40; nano-micro@pnzgu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Glagolev E.S., Vodopyanov I.O. Self-restoration hardening systems of high-strength concrete of a new generation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 560(1):012156. DOI: 10.1088/1757-899x/560/1/012156
2. Falikman V.R., Vainer A.Ya. New high performance nanoadditives for photocatalytic concrete: synthesis and study. *Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal*. 2015; 7(1):18-28. DOI: 10.15828/2075-8545-2015-7-1-18-28. EDN TIXUVD. (rus.).
3. Lukutsova N.P., Postnikova O.A., Soboleva G.N., Rotar' D.V., Ogloblina E.V. Photo-catalytic pavement on the basis of additive of nano-disperse titanium dioxide. *Construction Materials*. 2015; 11:5-8. EDN VCIDUF. (rus.).
4. Falikman V.R. *Photocatalytically active building materials with titanium dioxide nanoparticles — a new concept for improving the ecology of megacities*. Moscow, MGSU, 2015; 49. (rus.).
5. Kiriakidou F., Kondarides D.I., Verykios X.E. The effect of operational parameters and TiO₂-doping on the photocatalytic degradation of azo-dyes. *Catalysis Today*. 1999; 54(1):119-130. DOI: 10.1016/s0920-5861(99)00174-1
6. Umebayashi T., Yamaki T., Itoh H., Asai K. Analysis of electronic structures of 3d transition metal-doped TiO₂ based on band calculations. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2002; 63(10):1909-1920. DOI: 10.1016/s0022-3697(02)00177-4
7. Stepanov A.Yu., Sotnikova L.V., Vladimirov A.A., Dyagilev D.V., Larichev T.A., Pugachev V.M. et al. Synthesis and research of photocatalytic properties of TiO₂ based materials. *Bulletin of Kemerovo State University*. 2013; 2-1(54):249-255. EDN OLMIVS. (rus.).
8. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Korshunov A.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O., Agafonova N.Z. Investigation of physico-mechanical and photocatalytic properties of cement composites modified with industrial titanium dioxide. *Technique and Technology of Silicates*. 2023; 30(2):152-161. EDN LFEMUW. (rus.).
9. Kozlova I.V., Zemskova O.V., Samchenko S.V., Dudareva M.O. Methods of synthesis of a photocatalytic additive for cement systems. *Technique and Technology of Silicates*. 2023; 30(3):206-216. EDN HJAAJE. (rus.).
10. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Korshunov A.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O. Synthesis and Evaluation of Properties of an Additive Based on Bismuth Titanates for Cement Systems. *Materials*. 2023; 16(18):6262. DOI: 10.3390/ma16186262
11. Lashkova N.A., Maximov A.I., Ryabko A.A., Bobkov A.A., Moshnikov V.A., Terukov E.I. Synthesis of ZNO-based nanostructures for heterostructure photo-

voltaic cells. *Semiconductors*. 2016; 50(9):1276-1282. EDN XAXUWV. (rus.).

12. Averin I.A., Pronin I.A., Yakushova N.D., Karmanov A.A., Moshnikov V.A., Sychev M.M. et al. Analysis of the structural evolution of zinc oxide powders obtained by mechanical high-energy grinding. *Technical Physics*. 2019; 89(9):1406-1411. DOI: 10.21883/JTF.2019.09.48067.437. EDN OHCSAR. (rus.).

13. Nikazar M., Alizadeh M., Lalavi R., Rostami M.H. The optimum conditions for synthesis of Fe₃O₄/ZnO core/shell magnetic nanoparticles for photodegradation of phenol. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2014; 12(1). DOI: 10.1186/2052-336x-12-21

14. Elshypany R., Selim H., Zakaria K., Moustafa A.H., Sadeek S.A., Sharaa S.I. et al. Elaboration of Fe₃O₄/ZnO nanocomposite with highly performance photocatalytic activity for degradation methylene blue under visible light irradiation. *Environmental Technology & Innovation*. 2021; 23:101710. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101710

15. Gubareva E.N., Baskakov P.S., Strokova V.V., Labuzova M.V. Features of the structure of sols of titanium dioxide and morphology of the films based on them. *News of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*. 2019; 48(74):78-83. EDN KFLTUQ. (rus.).

16. Zhang J., Liu Z. Fabrication and characterization of Eu²⁺-doped lanthanum-magnesium-gallium/TiO₂-based composition as photocatalytic materials for cement concrete-related methyl orange (MO) degradation. *Ceramics International*. 2019; 45(8):10342-10347. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.02.090

17. Sreethawong T., Suzuki Y., Yoshikawa S. Photocatalytic evolution of hydrogen over mesoporous TiO₂ supported NiO photocatalyst prepared by single-step sol-gel process with surfactant template. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2005; 30(10):1053-1062. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2004.09.007

18. Li G., Mang C., Xing L., Cao P., Cai Y., Luo J. et al. Surfactant-assisted synthesis of Mo-doped TiO₂/FAC (fly ash cenosphere) for degradation of methylene blue dye under visible light irradiation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*

Aspects. 2022; 651:129669. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.129669

19. Yan Y., Li C., Wu Y., Gao J., Zhang Q. From isolated Ti-oxo clusters to infinite Ti-oxo chains and sheets: Recent advances in photoactive Ti-based MOFs. *Journal of Materials Chemistry A*. 2020; 8(31):15245-15270. DOI: 10.1039/d0ta03749d

20. Cheng W., Li C., Ma X., Yu L., Liu G. Effect of SiO₂-doping on photogenerated cathodic protection of nano-TiO₂ films on 304 stainless steel. *Materials & Design*. 2017; 126:155-161. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.04.041

21. Liu W., Li C., Mao J., Hu L., Li M., Yun Y. et al. Synergistic effect of xSi-TiO₂ ceramic membrane on photocatalytic oxidation and water vapor recovery of high humidity NO. *Separation and Purification Technology*. 2023; 318:123928. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.123928

22. Vierzicke B.D., Patel S., Davis B.E., Birnie D.P. Evaluation of the Tauc method for optical absorption edge determination: ZnO thin films as a model system. *Physica status solidi (b)*. 2015; 252(8):1700-1710. DOI: 10.1002/pssb.201552007

23. Loganina V.I., Ryzhov A.D. Structure and properties of synthesized additive based on amorphous aluminosilicates. *Case Studies in Construction Materials*. 2015; 3:132-136. DOI: 10.1016/j.cscm.2015.10.005

24. Loganina V.I., Ryzhov A.D. Properties of limy composites with the addition aluminosilicates. *Contemporary Engineering Sciences*. 2015; 8:409-413. DOI: 10.12988/ces.2015.5237

25. Loganina V.I., Skachkov Y.P., Ryzhov A.D. Additive based on aluminosilicates for lime dry mortar mixes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 441:012028. DOI: 10.1088/1757-899x/441/1/012028

26. Loganina V.I., Makarova L.V., Tarasov R.V., Ryzhov A.D. The limy composite binder with the use of the synthesized aluminosilicates. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 662:11-14. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.662.11

27. Ellerbrock R., Stein M., Schaller J. Comparing amorphous silica, short-range-ordered silicates and silicic acid species by FTIR. *Scientific Reports*. 2022; 12(1). DOI: 10.1038/s41598-022-15882-4

Received April 1, 2024.

Adopted in revised form on July 27, 2024.

Approved for publication on September 23, 2024.

BIONOTES: **Valentina I. Loganina** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Quality Management and Construction Production Technologies; **Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC)**; 28 German Titov st., Penza, 440028, Russian Federation; ID RSCI: 369481, Scopus: 6602801860, ResearcherID: N-5558-2015, ORCID: 0000-0001-7532-0074; loganin@mail.ru;

Anton D. Ryzhov — senior lecturer of the Department of Information and Computing Systems; **Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC)**; 28 German Titov st., Penza, 440028, Russian Federation; ID RSCI: 818457, Scopus: 56500199300, ORCID: 0000-0003-4861-7352; penza48@yandex.ru;

Igor A. Pronin — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Nano- and Microelectronics; **Penza State University**; 40 Krasnaya st., Penza, 440026, Russian Federation; nano-micro@pnzgu.ru;

Andrej A. Karmanov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Nano- and Microelectronics; **Penza State University**; 40 Krasnaya st., Penza, 440026, Russian Federation; ID RSCI: 652871, Scopus: 55597544400, ResearcherID: S-5175-2016, ORCID: 0000-0001-8318-8149; starosta07km@mail.ru;

Nadezhda D. Yakushova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Nano- and Microelectronics; **Penza State University**; 40 Krasnaya st., Penza, 440026, Russian Federation; nano-micro@pnzgu.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

Информационное и математическое моделирование в строительстве при разработке строительных изделий для обнаружения пожара в соседнем здании

Александр Александрович Лазарев¹, Сергей Викторович Федосов^{2,3},
Виталий Геннадьевич Котлов³, Дмитрий Евгеньевич Цветков¹,
Андрей Юрьевич Комлёв¹

¹ Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы
Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий (ИПСА ГПС МЧС России); г. Иваново, Россия;

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

³ Поволжский государственный технологический университет (ПГТУ); г. Йошкар-Ола, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведенный анализ научной литературы и патентной документации показал наличие значительного количества алгоритмов и решений по моделированию отдельных элементов, конструкций, перегородок, перекрытий и стен для обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений. Основные подходы к решению этих проблем связаны с теорией теплопереноса. При этом практически отсутствуют разработки алгоритмов применения строительных изделий для обнаружения пожара в соседнем здании.

Материалы и методы. Используются информационные технологии для решения практических задач алгоритмизации при строительстве.

Результаты. Разработанный алгоритм применения строительных изделий предполагает проверку двух определенных условий. Это делается для избегания ложного срабатывания пожарного извещателя из-за попадания солнечных лучей и установления факта исправности изделия после пожара. Практическая значимость проведенного исследования заключается также в полученных результатах численного эксперимента. С учетом основ теории и математического моделирования механических и тепловых процессов рассмотрен случай равномерного начального распределения температуры в стальном диске строительного изделия для обнаружения пожара в соседнем здании.

Выводы. Полученные уравнения дают возможность определить температурные поля в стальном диске термочувствительного элемента строительного изделия для обнаружения пожара в соседнем здании в процессе теплоотдачи среде различных газов. Проведенное исследование позволило также выполнить сравнительный анализ динамики изменения полей температур в зависимости от числа Фурье рассматриваемого термочувствительного элемента строительного изделия для разных сред по отдельности: аргона, криптона, ксенона, углекислого газа, а также в вакууме 10^{-5} мм рт. ст.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: алгоритм, датчик, моделирование, температурные поля, пожарный извещатель, пожарная безопасность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лазарев А.А., Федосов С.В., Котлов В.Г., Цветков Д.Е., Комлёв А.Ю. Информационное и математическое моделирование в строительстве при разработке строительных изделий для обнаружения пожара в соседнем здании // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1770–1778. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1770-1778

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Евгеньевич Цветков, svetkov-dmitrii@mail.ru.

Information and mathematical modelling in construction in the development of building products for fire detection in a neighboring building

Alexander A. Lazarev¹, Sergei V. Fedosov^{2,3}, Vitalii G. Kotlov³, Dmitry E. Tsvetkov¹,
Andrey Yu. Komlev¹

¹ Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil
Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters; Ivanovo, Russian Federation;

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

³ Volga State Technological University; Yoshkar-Ola, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The analysis of scientific literature and patent documentation has shown the presence of a significant number of algorithms and solutions for modelling individual elements, structures, partitions, floors and walls to ensure fire safety of buildings and structures. The main approaches to solving these problems are related to the theory of heat transfer. At the same time, there is practically no development of algorithms for the use of building products to detect a fire in a neighboring building.

Materials and methods. Information technologies are used to solve practical problems of algorithmization in construction. **Results.** The algorithm developed by the authors for the application of building products involves checking two specific conditions. This is done to avoid false triggering of the fire detector due to sunlight and to establish the fact that the product is serviceable after a fire. The practical significance of the conducted research also lies in the results of the numerical experiment. Taking into account the basics of theory and mathematical modelling of mechanical and thermal processes, the case of uniform initial temperature distribution in a steel disc of a building product for fire detection in an adjacent building was considered.

Conclusions. The obtained equations make it possible to determine the temperature fields in the steel disc of a thermosensitive element of a building product for fire detection in a neighboring building in the process of heat transfer to the medium of various gases. The conducted research also made it possible to perform a comparative analysis of the dynamics of changes in temperature fields depending on the Fourier number of the thermosensitive element of the construction product under consideration for different media separately: argon, krypton, xenon, carbon dioxide, as well as in a vacuum of 10^{-5} mm Hg.

KEYWORDS: algorithm, sensor, simulation, temperature fields, fire detector, fire safety

FOR CITATION: Lazarev A.A., Fedosov S.V., Kotlov V.G., Tsvetkov D.E., Komlev A.Yu. Information and mathematical modeling in construction in the development of building products for fire detection in a neighboring building. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1770-1778. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1770-1778 (rus.).

Corresponding author: Dmitry E. Tsvetkov, cvetkov-dmitrii@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

С целью защиты зданий от пожаров применяются различные полезные модели и изобретения [1–17]. В основном эти решения связаны с обеспечением пассивной защиты от пожара. В основе их разработки лежит теория теплопереноса. Так, например, предложенная Р.А. Ибрагимовым и Ю.В. Евстигнеевой перегородка [1] может использоваться при строительстве зданий с установленными требованиями к степени их огнестойкости, а также к теплоизоляции и звукоизоляции помещений в данных зданиях. При создании перегородки применяются стеклодоломитовые листы для обшивки наружной ее части. Для заполнения пространства между листами используется теплоизоляционный материал на основе минеральной ваты, дополнительный слой шумоизоляции выполняется на базе алюмосиликатного волокна. Скрепление стеклодоломитовых листов между собой осуществляется при помощи Z-образного оцинкованного профиля. Комплексный подход к обеспечению пожарной безопасности и шумоизоляции реализуется также при изготовлении и других подобных строительных материалов [2–4].

Для обеспечения водостойкости, огнестойкости, теплоизоляции и качества отделки Ю. Чжан, Ч. Чжан, С. Хуан предложили пеностекольную плиту [5]. В плите ее связующий слой находится на внутренней стороне, а покрывающий слой располагается на внешней поверхности. Закрепление пеностекольной плиты на стеновой поверхности выполняется при помощи связующего слоя, который создается при применении анкерного болта и быстроотверждаемого органического адгезива. Сырьевой основой для данной плиты

служат остатки промышленных или строительных отходов.

Следующие решения направлены на ограничение распространения пожара по фасаду здания. М.Р. Петриченко, Д.В. Немовой, В.Я. Ольшевским, Е.В. Котовым предложена полезная модель [6], предназначенная для замедления распространения огня при пожаре в зданиях и сооружениях по навесным вентилируемым фасадам. Модель предусматривает беспрепятственное протекание воздушных потоков в штатном режиме эксплуатации и значительное уменьшение подачи кислорода воздуха при помощи расчески на пружинах при пожаре.

Современная градостроительная практика часто характеризуется увеличением удельной площади фасадного остекления многоэтажных зданий. В отдельных случаях красота и величественность их внешнего вида достигается сплошным остеклением. В этих условиях представляет значительный интерес решение, представленное А.А. Дайловым, В. Дайче, Ш. Линд для ограничения междуэтажного распространения пламени [7]. С этой целью вблизи оконных проемов здания оборудуются устройства с вертикальным развертыванием шибера ограждения, которое включает в себя удлиненные, последовательно соединенные металлические пластины. Указанные пластины выдвигаются или раскрываются гармошкой.

Следующие решения в области пожарной безопасности зданий предполагают создание огнезащитной стальной балки с гофрированной стенкой [8]; огнестойкой бетонной конструкции, армированной композитной арматурой, с выполнением комбинированного защитного слоя [9]; огнезащитной двутавровой колонны здания [10]; покрытие строи-

тельных конструкций противопожарной облицовкой, состоящей из скрепленных между собой плиточных противопожарных элементов, укрепленных на листе гибкого материала, находящегося на строительной конструкции [11].

Изобретателями также предлагалось создавать огнестойкую перегородку, содержащую профилированный каркас [12]; конструкцию огнезащитного перекрытия здания [13], которая включает в себя засыпку песком по слою кровельного картона, укладываемого на поверхности деревянного наката внутри полости перекрытия на стальные балки; выполнение штукатурки по драни, нанесенной на нижнюю сторону деревянного перекрытия (или выполнением огнезащитной облицовки, на которую укладываются теплоизоляционные маты из негорючего волокна). При этом стенки и полки стальных балок внутри воздушной полости перекрытия защищаются от воздействия высокой температуры возможного пожара огнепреградительными поясами, прикрепляемыми к боковым граням стенок и внутренним сторонам полок стальных балок в заданной последовательности [13].

В определенных случаях для защиты от пожара рассматривалось возведение специальных стен. Так, например, предложенная А.Б. Акопяном и А.А. Шухардиным противопожарная стена [14] состоит из несущей конструкции с закреплением на ней не менее одного трехслойного элемента. При этом несущая конструкция размещается внутри указанного трехслойного элемента. Она содержит вертикально устанавливаемые фермы, для изготовления которых использован стальной гнутый холоднотянутый профиль С-образного сечения. Панели из листового материала использованы для создания трехслойных элементов. Застывшей пенобетонной смесью заполняется пространство между панелями. П.В. Шарупичем, В.П. Шарупичем, С.Ю. Королевым, С.В. Шарупичем, Т.С. Шарупич представлен грин-брандмауэр [15]. Это изобретение представляет собой защитную зону для ограничения распространения пожара и его быстрой ликвидации, выращивание растений в жилых и производственных зданиях. Оно включает в себя ограждение, устройство для выращивания растений, систему вентиляции, которая связана с жилыми или производственными этажами. Это ограждение выполняется в виде перекрытий и стен здания [15].

Для создания препятствий в распространении пожара через щели и отверстия изобретателями также рекомендовались различные решения. К ним можно отнести применение подушки противопожарной уплотнительной для заполнения пустот, например кабельных проходов, внутри строительных конструкций зданий и сооружений в целях создания препятствий распространению пожара. Эта подушка изготавливается в виде мешочка из стеклоткани, заполняется смесью вспученного вермикулита и грану-

лированного базальтового волокна в заданных пропорциях.

Ю. Татани, М. Секи, Т. Хебииси, Е. Курода, В. Охути, Т. Ямасита, К. Ямаката продемонстрировали решение для создания конструкции с огнестойким покрытием для проходной части. Оно заключалось в укладке стопкой значительного количества гипсокартонных деталей в направлении по толщине проходной части. Указанные детали соединялись между собой [16].

С целью противопожарной защиты строительных тросов Н. Фабри и Р. Гишето представлено устройство, включающее напряженные металлические элементы усиления [17]. Это устройство имеет два участка. Между ними находится соединительная зона муфты. При этом предусмотрено защитное покрытие вокруг строительного троса на первом и втором участках, которое прерывается в соединительной зоне. Также имеется теплоизолирующее кольцо, которое является более жестким, чем защитное покрытие, располагаемое между элементами усиления и муфтой в соединительной зоне.

Однако описанные выше решения по обеспечению пожарной безопасности [1–17] не предполагают обнаружения пожара в соседнем здании. Указанное обстоятельство обуславливает необходимость информационного и математического моделирования в строительстве при разработке соответствующих строительных изделий.

Объект исследования — алгоритм работы строительных изделий для обнаружения пожара в соседнем здании.

Предмет исследования — установление динамики изменения зависимости безразмерной температуры от толщины стального диска термочувствительного элемента строительного изделия для обнаружения пожара в соседнем здании в процессе теплообмена с окружающей средой.

Задачи исследования:

1. В рамках информационного моделирования разработать алгоритм применения строительных изделий для обнаружения пожара в соседнем здании.
2. В рамках математического моделирования получить уравнение для расчета полей температур в стальном диске, создаваемом в целях модификации пожарного извещателя в строительных изделиях для обнаружения пожара в соседнем здании.
3. Произвести численный эксперимент для обоснования заполнения инертным газом пространства вокруг стального диска со стороны размещения пожарного извещателя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использование информационных технологий для решения практических задач алгоритмизации при строительстве известно довольно давно. В.Т. Ерофеевым, В.В. Афониним, Н.В. Черушовой, М.М. Зоткиной, Е.А. Митиной, В.Б. Зоткиным,

И.В. Ерофеевой для оценивания качества поверхности строительных изделий и конструкций предложены соответствующие методы и алгоритмы [18]. П.Б. Каган и Р.Г. Поляков применяли для решения задач технологической комплектации в строительстве генетические алгоритмы [19]. Алгоритмы контроля свободных фенолов в строительных полимерах изучались Е.А. Хорохординой, Х.Д. Чаном, О.Б. Рудаковым [20]. На основе определения плотности древесины М.Ф. Лавровым и Д.К. Чаховым представлен алгоритм прогнозирования ее физико-механических показателей [21]. Д.А. Корольченко, А.А. Комаровым, С.Г. Цариченко проводились расчеты для анализа динамики пожара [22, 23]. С учетом изложенного опыта проведения аналогичных исследований [24] разрабатывается алгоритм применения строительных изделий для обнаружения

пожара в соседнем здании, а также на основании теории теплопереноса выводится выражение, характеризующее равномерное начальное распределение температуры в стальном диске данного строительного изделия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 приведен алгоритм применения строительных изделий для обнаружения пожара в соседнем здании.

Описанный на рис. 1 алгоритм предполагает проверку условий в двух случаях. В первом случае падение солнечных лучей на термочувствительный элемент. Конструкция изделия предполагает исключение такого попадания $\angle\alpha \neq 0$. Благодаря установленной выпуклой линзе солнечные лучи попадут на побочный фокус и не нагреют термочувстви-

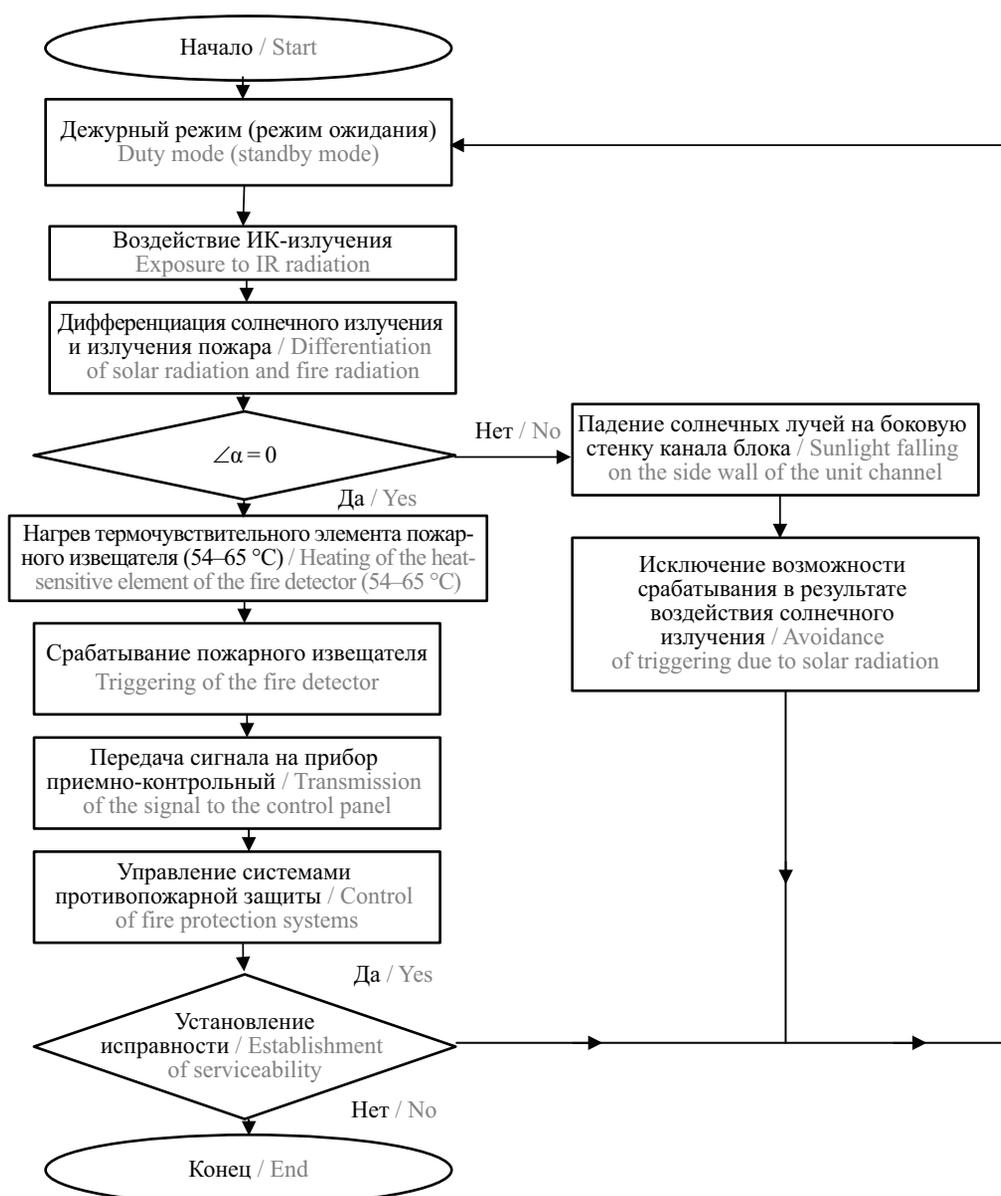


Рис. 1. Алгоритм применения строительных изделий для обнаружения пожара в соседнем здании

Fig. 1. Algorithm for using building products to detect a fire in a neighboring building

тельный элемент. При воздействии пожара $\angle\alpha = 0$. В этом случае инфракрасное излучение будет нагревать термочувствительный элемент. Во втором случае проверяется условие: исправность изделия. Если изделие исправно, оно приводится в дежурный режим. Если изделие неисправно, то производится его ремонт или замена. Программное обеспечение для контроллеров изделия предполагается создать на языке программирования Python.

Выполнение данного алгоритма позволяет формировать сигнал «Пожар» на прибор приемно-контрольный. При этом наблюдаются следующие параметры:

1) отсутствует ложное срабатывание пожарного извещателя в результате воздействия солнечных лучей;

2) обеспечивается срабатывание пожарного извещателя при достижении заданного температурного значения стального диска.

При этом важно учесть основы теории и математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных изделий [25]. Для этого рассматривался частный случай равномерного начального распределения температуры в стальном диске строительного изделия для обнаружения пожара в соседнем здании. С учетом результатов исследования [26] он представлен выражением:

$$T(\bar{x}, Fo) = Ki \left[(1 - \bar{x}) - \sum_{n=1}^3 \frac{8 \cos(\pi n \bar{x})}{\pi^2 n^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2}{4} Fo\right) \right], \quad (1)$$

где

$$Ki = \frac{q \delta_d}{\lambda_d \Delta T_\delta} \text{ — критерий Кирпичева}; \quad (2)$$

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{\delta_d^2} \text{ — число Фурье}; \quad (3)$$

\bar{x} — заданная координата; n — количество членов ряда; q — тепловой поток на диск термочувствительного элемента строительного изделия для обнаружения пожара в соседнем здании, Вт/м², опре-

деляется в зависимости от излучения в системе «факел – изделие»; δ_d — толщина диска, м; λ_d — коэффициент теплопроводности диска Вт/(м·К); α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), определяется в зависимости от движения среды у поверхности диска; τ — время воздействия инфракрасного излучения на диск термочувствительного элемента, с.

Уравнение (1) описывает зависимость безразмерной температуры от толщины стального диска термочувствительного элемента строительного изделия для обнаружения пожара в соседнем здании в процессе теплоотдачи среде в течение 600 с. Для данного диска проведен расчет динамики изменения числа Фурье по координате для разных сред: в вакууме 10⁻⁵ мм рт. ст., а также по отдельности в среде аргона, криптона, ксенона, углекислого газа. Результаты указанного расчета представлены на рис. 2.

Результаты расчета по уравнению (1) показывают, что создание вакуума в пространстве вокруг стального диска (за исключением поверхности, на которую воздействует тепло) или заполнение этого пространства специальными газами замедляет процесс теплоотдачи газовой среде при нагреве стального диска термочувствительного элемента строительного изделия для обнаружения пожара в соседнем здании [24, 26]. Наименьшее значение теплопотерь достигнуто в случае создания вакуума 10⁻⁵ мм рт. ст.

На основе сравнительного анализа полученных в рамках численного эксперимента результатов и расчетных значений, полученных А.С. Шибeko [27] при исследовании вертикальных стеклопакетов с различными газовыми прослойками, можно сделать вывод об адекватности расчетных данных по термочувствительному элементу строительного изделия для обнаружения пожара в соседнем здании. Следовательно, уравнение (1) может быть использовано для моделирования таких строительных изделий специального назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках информационного и математического моделирования в строительстве при разработке строительных изделий для обнаружения пожара в со-

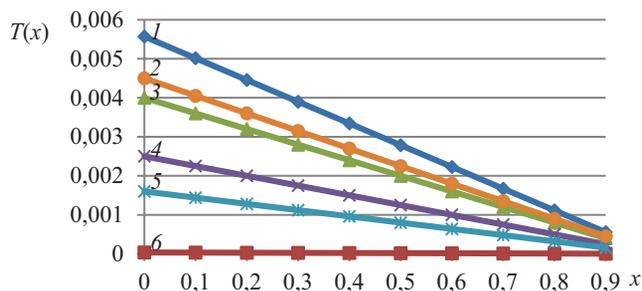


Рис. 2. Распределение безразмерных температур по толщине стального диска в зависимости от характеристик среды (Fo = 120): 1 — воздух; 2 — углекислый газ; 3 — аргон; 4 — криптон; 5 — ксенон; 6 — вакуум

Fig. 2. Distribution of dimensionless temperatures over the thickness of the steel disc depending on the characteristics of the medium (Fo = 120): 1 — air; 2 — carbon dioxide; 3 — argon; 4 — krypton; 5 — xenon; 6 — vacuum

седнем здании проведен анализ существующих решений, направленных на обеспечение пожарной безопасности и ограничение распространения пожара. Получен результат, который позволяет сделать следующие выводы:

- алгоритм применения строительных изделий для обнаружения пожара в соседнем здании представляет совокупность последовательных действий, направленных на получение информации о возникновении пожара без возникновения ложных срабатываний из-за воздействия солнечных лучей;

- указанный алгоритм предполагает проверку двух условий. В первом случае падение солнечных лучей на термочувствительный элемент. Конструкция изделия предполагает исключение такого попадания ($\angle\alpha \neq 0$). Благодаря установленной выпуклой линзе солнечные лучи попадут на побочный фокус и не нагреют термочувствительный элемент. При воздействии пожара $\angle\alpha = 0$. В этом случае инфракрас-

ное излучение будет нагревать термочувствительный элемент. Проверяется условие: исправность изделия. При исправности изделия осуществляется его перевод в дежурный режим. Если изделие неисправно, то производится его ремонт или замена;

- полученное уравнение (1) описывает зависимость температуры стального диска термочувствительного элемента строительного изделия для обнаружения пожара от его толщины, что важно для вероятного обнаружения пожара;

- результаты расчета по уравнению (1) показывают, что создание вакуума в пространстве вокруг стального диска (за исключением поверхности, на которую воздействует тепло) или заполнение этого пространства специальными газами замедляет процесс теплоотдачи газовой среде при нагреве стального диска термочувствительного элемента строительного изделия для обнаружения пожара в соседнем здании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент RU № 209365 U1, МПК E04B 1/88, E04B 1/94, E04C 2/24. Теплоизоляционная и звукоизоляционная перегородка / *Ибрагимов Р.А., Евстигнеева Ю.В.*; заявл. № 2021119756 от 05.07.2021; опубл. 15.03.2022. Бюл. № 8.

2. Патент RU № 196984 U1, МПК E04B 1/82, E04B 1/94, E04F 13/075, E04F 13/077, B32B 7/12. Звукоизоляционная противопожарная панель / *Меняшкин Д.Г.*; заявл. № 2019136854 от 15.11.2019; опубл. 23.03.2020. Бюл. № 9.

3. Патент RU № 171102 U1, МПК E04B 1/14, E04B 1/84, E04B 1/94, E04C 2/292, E04B 2/92. Звукоизолирующее ограждение пониженной пожарной опасности / *Бобылёв В.Н., Гребнев П.А., Мониц Д.В., Тишков В.А., Печников А.В., Печников М.А.*; заявл. № 2016122737, 08.06.2016; опубл. 22.05.2017. Бюл. № 15.

4. Патент RU № 2698677 C2 МПК E04B 1/94, E04F 13/16, E04C 2/26, B32B 27/04. Огнестойкая и устойчивая к провисанию акустическая панель / *Вайкер Э.Л., Ванг М.Кс., Гирхарт Дж.Х. (US)*; заявл. № 2015132744 от 16.11.2009; опубл. 28.08.2019. Бюл. № 25.

5. Патент RU № 2655550 C2, МПК E04F 13/075, E04B 1/90, E04B 1/94. Интегрированная пеностекольная плита, эффективная для обеспечения водо- и огнестойкости, теплоизоляции и отделке / *Чжан Ю., Чжан Ч., Хуан С.*; заявл. № 2016118820 от 02.12.2014; опубл. 28.05.2018. Бюл. № 16.

6. Патент RU № 205396 U1, МПК E04B 1/94, A62C 2/10, A62C 2/24. Усовершенствованная конструкция противопожарной рассечки с термопарой в системах навесных вентилируемых фасадов / *Петриченко М.Р., Немова Д.В., Ольшевский В.Я., Ко-*

тов Е.В.; заявл. № 2020143850 от 29.12.2020; опубл. 13.07.2021. Бюл. № 20.

7. Патент RU № 203746 U1, МПК E04B 1/94. Устройство вертикального разворачивания шиберного ограждения отсеки пламени пожара / *Дайлов А.А., Дайче В., Линд Ш.*; заявл. № 2020116588 12.05.2020; опубл. 19.04.2021. Бюл. № 11.

8. Патент RU № 172541 U1, МПК E04B 1/94, E04C 3/02. Конструкция огнезащитной стальной балки / *Ильин Н.А., Панфилов Д.А., Ильдияров Е.В., Лукин А.О.*; заявл. № 2017109525 от 21.03.2017; опубл. 11.07.2017. Бюл. № 20.

9. Патент RU № 151580 U1, МПК E04B 1/94, E04B 1/16. Огнестойкая бетонная конструкция, армированная композитной арматурой, с комбинированным защитным слоем / *Лысов В.С.*; заявл. № 2014136422/03 от 09.09.2014; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.

10. Патент RU № 128223 U1, МПК E04B 1/94. Огнезащитная двутавровая колонна здания / *Ильин Н.А., Славкин П.Н., Шепелев А.П.*; заявл. № 2012147103/03 от 06.11.2012; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 14.

11. Патент RU № 127777 U1, МПК E04B 1/94. Противопожарная облицовка / *Зоткин И.И., Зоткина Н.Н.*; заявл. № 2013103662/03 от 28.01.2013; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13.

12. Патент RU № 14950 U1, МПК E04B 1/94. Огнестойкая перегородка / *Епешин В.В.*; заявл. № 2000110855/20 от 06.05.2000; опубл. 10.09.2000. Бюл. № 25.

13. Патент RU № 63820 U1, МПК E04B 1/94. Конструкция огнезащитного перекрытия здания / *Ильин Н.А., Беликов А.П., Шипко И.В.*; заявл.

№ 2006141369/22 от 22.11.2006; опубл. 16.06.2007. Бюл. № 16.

14. Патент RU № 112695 U1, МПК E04B 1/94. Противопожарная стена / *Акопян А.Б., Шухардин А.А.*; заявл. № 2011137650/03 от 14.09.2011; опубл. 20.01.2012. Бюл. № 2.

15. Патент RU № 2599678 C2, МПК E04B 1/94. Грин-брандмауэр / *Шарупич П.В., Шарупич В.П., Королев С.Ю., Шарупич С.В., Шарупич Т.С.*; заявл. № 2014116292/03 от 22.04.2014; опубл. 10.10.2016. Бюл. № 28.

16. Патент RU № 2762869 C1, МПК E04B 1/94. Конструкция с огнестойким покрытием для проходной части / *Татани Ю., Секи М., Хебииси Т., Курода Е., Охути В., Ямасита Т., Ямаката К.*; заявл. № 2020121399 от 20.12.2018; опубл. 23.12.2021. Бюл. № 36.

17. Патент RU № 2751322 C2, МПК E04B 1/94, E01D 19/16, D07B 1/06. Устройство противопожарной защиты строительных тросов / *Фабри Н., Гишето Р.*; заявл. № 2017144197 от 18.12.2017; опубл. 13.07.2021. Бюл. № 20.

18. *Ерофеев В.Т., Афонин В.В., Черушова Н.В., Зоткина М.М., Митина Е.А., Зоткин В.Б. и др.* Методы и алгоритмы оценки качества поверхности строительных изделий и конструкций // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 4–1. С. 33–40. EDN VVYINH.

19. *Каган П.Б., Поляков Р.Г.* Применение генетических алгоритмов для решения задач технологической комплектации в строительстве // *Научное обозрение*. 2017. № 10. С. 15–19. EDN ZHETOP.

20. *Хорохордина Е.А., Чан Х.Д., Рудаков О.Б.* Сравнительная характеристика методик контроля свободных фенолов в строительных полимерах // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета*. Строи-

тельство и архитектура. 2015. № 1 (37). С. 124–130. EDN TJYMPZ.

21. *Лавров М.Ф., Чахов Д.К.* Зависимость механических характеристик древесины от ее плотности и макроструктуры // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 8. С. 34–37. EDN UBLYQV.

22. *Власов К.С., Цариченко С.Г.* Математическая модель применения робототехнических средств на пожаре // *Актуальные проблемы пожарной безопасности: мат. XXVII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 25-летию МЧС России в 3 частях*. 2015. С. 329–335. EDN TYHFNL.

23. *Комаров А.А., Корольченко Д.А., Громов Н.В.* Особенности гидродинамических расчетов при проведении технической экспертизы аварийного взрыва // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 10. С. 36–42. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.36-42. EDN ZUFYAZ.

24. Патент RU № 198053 U1, МПК E04C 1/39, E04B 1/94. Совмещенный с пожарным извещателем бетонный блок / *Федосов С.В., Лазарев А.А., Торопова М.В., Маличенко В.Г.*; заявл. № 2020101506 от 11.02.2020; опубл. 16.06.2020. Бюл. № 17.

25. *Федосов С.В., Мизонов В.Е.* Основы теории и математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2020. 256 с. EDN LGOPFZ.

26. *Лазарев А.А.* Наружные стеновые изделия для дистанционной диагностики пожарной безопасности малоэтажных зданий: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2021. 181 с. EDN CPWNMA.

27. *Шибекко А.С.* Некоторые способы экономии тепловой энергии при производстве вертикальных стеклопакетов // *Наука и техника*. 2018. Т. 17. № 2. С. 157–164. EDN VLYJNT.

Поступила в редакцию 14 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 30 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 30 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Александрович Лазарев — кандидат педагогических наук, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры правового обеспечения надзорной деятельности; **Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ИПСА ГПС МЧС России);** 153040, г. Иваново, пр-т Строителей, д. 33; РИНЦ ID: 823026; kpond@edufire37.ru;

Сергей Викторович Федосов — доктор технических наук, профессор, академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; профессор; **Поволжский государственный технологический университет (ПГТУ);** 424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3; РИНЦ ID: 105900; fedosov-academic53@mail.ru;

Виталий Геннадьевич Котлов — доктор технических наук, доцент, проректор по воспитательной работе; **Поволжский государственный технологический университет (ПГТУ);** 424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3; РИНЦ ID: 604094; kotlov.vitaliy@mail.ru;

Дмитрий Евгеньевич Цветков — соискатель ученой степени кандидата технических наук; **Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской**

Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ИПСА ГПС МЧС России); 153040, г. Иваново, пр-т Строителей, д. 33; РИНЦ ID: 1254655; cvetkov-dmitrii@mail.ru;

Андрей Юрьевич Комлёв — соискатель ученой степени кандидата технических наук; **Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ИПСА ГПС МЧС России);** 153040, г. Иваново, пр-т Строителей, д. 33; mchs04@mail.ru.

Вклад авторов:

Лазарев А.А. — идея, сбор материала.

Федосов С.В. — научное руководство.

Котлов В.Г. — научное редактирование текста.

Цветков Д.Е. — обработка материала, написание исходного текста.

Комлёв А.Ю. — доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Patent RU No. 209365 U1, IPC E04B 1/88, E04B 1/94, E04C 2/24. *Heat-insulating and sound-insulating partition* / Ibragimov R.A., Evstigneeva Yu.V.; appl. No. 2021119756 05.07.2021; publ. 15.03.2022. Bull. No. 8.
2. Patent RU No. 196984 U1, IPC E04B 1/82, E04B 1/94, E04F 13/075, E04F 13/077, B32B 7/12. *Soundproof fireproof panel* / Menyashkin D.G.; appl. No. 2019136854 15.11.2019; publ. 23.03.2020. Bull. No. 9.
3. Patent RU No. 171102 U1, IPC E04B 1/14, E04B 1/84, E04B 1/94, E04C 2/292, E04B 2/92. *Soundproof fencing with reduced fire hazard* / Bobylev V.N., Grebnev P.A., Monich D.V., Tishkov V.A., Pechnikov A.V., Pechnikov M.A.; appl. No. 2016122737 08.06.2016; publ. 22.05.2017. Bull. No. 15.
4. Patent RU No. 2698677 C2 IPC E04B 1/94, E04F 13/16, E04C 2/26, B32B 27/04. *Fire-resistant and sag-resistant acoustic panel* / Weiker E.L., Wang M.X., Gearhart J.H. (US); appl. No. 2015132744 16.11.2009; publ. 28.08.2019. Bull. No. 25.
5. Patent RU No. 2655550 C2, IPC E04F 13/075, E04B 1/90, E04B 1/94. *Integrated foam glass board, effective for water and fire resistance, thermal insulation and decoration* / Zhang Yu., Zhang Z., Huang S.; appl. No. 2016118820 02.12.2014; publ. 28.05.2018. Bull. No. 16.
6. Patent RU No. 205396 U1, IPC E04B 1/94, A62C 2/10, A62C 2/24. *Improved design of a fireproof cut with a thermocouple in systems of suspended ventilated facades* / Petrichenko M.R., Nemova D.V., Olshevsky V.Ya., Kotov E.V.; appl. No. 2020143850 29.12.2020; publ. 13.07.2021. Bull. No. 20.
7. Patent RU No. 203746 U1, IPC E04B 1/94. *Device for vertical deployment of a slide gate to cut off fire flames* / Dailov A.A., Daiche V., Lind Sh.; appl. No. 2020116588 12.05.2020; publ. 19.04.2021. Bull. No. 11.
8. Patent RU No. 172541 U1, IPC E04B 1/94, E04C 3/02. *Design of a fireproof steel beam* / Ilyin N.A., Panfilov D.A., Ildiyarov E.V., Lukin A.O.; appl. No. 2017109525 21.03.2017; publ. 11.07.2017. Bull. No. 20.
9. Patent RU No. 151580 U1, IPC E04B 1/94, E04B 1/16. *Fire-resistant concrete structure, reinforced with composite reinforcement, with a combined protective layer* / Lysov V.S.; appl. No. 2014136422/03 09.09.2014; publ. 10.04.2015. Bull. No. 10.
10. Patent RU No. 128223 U1, IPC E04B 1/94. *Fireproof I-beam column of a building* / Ilyin N.A., Slavkin P.N., Shepelev A.P.; appl. No. 2012147103/03 06.11.2012; publ. 20.05.2013. Bull. No. 14.
11. Patent RU No. 127777 U1, IPC E04B 1/94. *Fireproof cladding* / Zotkin I.I., Zotkina N.N.; appl. No. 2013103662/03 28.01.2013; publ. 10.05.2013. Bull. No. 13.
12. Patent RU No. 14950 U1, IPC E04B 1/94. *Fire-resistant partition* / Epeshin V.V.; appl. No. 2000110855/20 06.05.2000; publ. 10.09.2000. Bull. No. 25.
13. Patent RU No. 63820 U1, IPC E04B 1/94. *Design of the fireproof ceiling of a building* / Ilyin N.A., Belikov A.P., Shipko I.V.; appl. No. 2006141369/22 22.11.2006; publ. 16.06.2007. Bull. No. 16.
14. Patent RU No. 112695 U1, IPC E04B 1/94. *Fire wall* / Akopyan A.B., Shukhardin A.A.; appl. No. 2011137650/03 14.09.2011; publ. 20.01.2012. Bull. No. 2.
15. Patent RU No. 2599678 C2, IPC E04B 1/94. *Green firewall* / Sharupich P.V., Sharupich V.P., Korolev S.Yu., Sharupich S.V., Sharupich T.S.; appl. No. 2014116292/03 22.04.2014; publ. 10.10.2016. Bull. No. 28.
16. Patent RU No. 2762869 C1, IPC E04B 1/94. *Fire-retardant coating design for passage part* / Tatani Yu., Seki M., Hebiishi T., Kuroda E., Ohuti V., Yamashita T., Yamakata K.; appl. No. 2020121399 20.12.2018; publ. 23.12.2021. Bull. No.
17. Patent RU No. 2751322 C2, IPC E04B 1/94, E01D 19/16, D07B 1/06. *Fire protection device for construction cables* / Fabry N., Guicheteau R.; appl. No. 2017144197 18.12.2017; publ. 13.07.2021. Bull. No. 20.
18. Erofeev V.T., Afonin V.V., Cherushova N.V., Zotkina M.M., Mitina E.A., Zotkin V.B. et al. Methods

and algorithms of assessing the quality of the surface of building products and constructions. *Fundamental Research*. 2016; 4-1:33-40. EDN VVYINH. (rus.).

19. Kagan P.B., Polyakov R.G. Using genetic algorithms for solving the problems of technological provision in construction. *Science Review*. 2017; 10:15-19. EDN ZHETOP. (rus.).

20. Horohordina E.A., Chan X.D., Rudakov O.B. Comparison of methods for control of free phenol in the construction polymers. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering*. *Construction and Architecture*. 2015; 1(37):124-130. EDN TJYMPZ. (rus.).

21. Lavrov M.F., Chakhov D.K. Dependence of mechanical characteristics of wood on its density and macrostructure. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 8:34-37. EDN UBLYQV. (rus.).

22. Vlasov K.S., Tsarichenko S.G. A mathematical model of the use of robotic tools in a fire. *Actual problems of fire safety : materials of the XXVII International scientific and practical conference dedicated to the 25th anniversary of the Ministry of Emergency Situations of Russia in 3 parts*. 2015; 329-335. EDN TYHFNL. (rus.).

23. Komarov A.A., Korolchenko D.A., Gromov N.V. Features of the hydrodynamic calculations for technical expertise of accidental explosion. *Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(10):36-42. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.36-42. EDN ZUFYAZ. (rus.).

24. Patent RU No. 198053 U1, IPC E04C 1/39, E04B 1/94. *Concrete block combined with a fire detector* / Fedosov S.V., Lazarev A.A., Toropova M.V., Malichenko V.G.; appl. No. 2020101506 11.02.2020; publ. 16.06.2020. Bull. No. 17.

25. Fedosov S.V., Mizonov V.E. *Fundamentals of theory and mathematical modeling of mechanical and thermal processes in the production of building materials*. Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, 2020; 256. EDN LGOPFZ. (rus.).

26. Lazarev A.A. *External wall products for remote diagnostics of fire safety of low-rise buildings : dis. ... cand. of technical sciences*. Ivanovo, 2021; 181. EDN CPWNMA. (rus.).

27. Shibeko A.S. Some methods for saving heat energy while manufacturing vertical insulating glass units. *Science and Technique*. 2018; 17(2):157-164. EDN VLYJNT. (rus.).

Received May 14, 2024.

Adopted in revised form on September 30, 2024.

Approved for publication on September 30, 2024.

B I O N O T E S : **Alexander A. Lazarev** — Candidate of Pedagogical Sciences, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Legal Support for Supervisory Activities; **Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters**; 33 Stroiteley ave., Ivanovo, 153040, Russian Federation; ID RSCI: 823026; kpond@edufire37.ru;

Sergei V. Fedosov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Professor; **Volga State Technological University**; 3 Lenin square, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; ID RSCI: 105900; fedosov-academic53@mail.ru;

Vitalii G. Kotlov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Educational Work; **Volga State Technological University**; 3 Lenin square, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; ID RSCI: 604094; kotlov.vitaliy@mail.ru;

Dmitry E. Tsvetkov — candidate for the degree of candidate of technical sciences; **Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters**; 33 Stroiteley ave., Ivanovo, 153040, Russian Federation; ID RSCI: 1254655; cvetkov-dmitrii@mail.ru;

Andrey Yu. Komlev — candidate for the degree of candidate of technical sciences; **Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters**; 33 Stroiteley ave., Ivanovo, 153040, Russian Federation; mchs04@mail.ru.

Contribution of the authors:

Alexander A. Lazarev — idea, collection of material.

Sergei V. Fedosov — scientific guidance.

Vitalii G. Kotlov — scientific text editing.

Dmitry E. Tsvetkov — processing of the material, writing the source text.

Andrey Yu. Komlev — revision of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Эмиссия CO₂ при работе автономных водяных систем теплоснабжения

Алексей Леонидович Торопов

Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Эмиссия CO₂ при работе тепловых генераторов автономных систем теплоснабжения — один из важнейших показателей техногенного воздействия на атмосферу Земли. Генерация тепла выполняется тепловыми насосами (ТН), газовыми и электрическими котлами, системами на твердом и жидком углеводородном топливе. Цель исследования — оценка показателя эмиссии CO₂ на киловатт тепловой энергии указанных генераторов систем теплоснабжения при реальной энергетической эффективности работы тепловых генераторов (ТГ) систем теплоснабжения с отопительными приборами радиаторного типа.

Материалы и методы. Используются официальные сведения Росстата РФ, доклады министерств энергетики, экономического развития, действующие ГОСТы и нормативные документы. При расчете коэффициентов энергетической эффективности ТГ автономных систем теплоснабжения применялись экспериментальные данные. Расчеты проводились методами математического моделирования.

Результаты. Определены значения эмиссии CO₂ на киловатт тепловой энергии для автономных систем водяного теплоснабжения при генерации тепловой энергии ТН (воздух–вода) (ASHP), газовыми конденсационными и конвекционными котлами, котлами на твердом и жидком топливе.

Выводы. Оценка эмиссии CO₂ тепловых генераторов автономного водяного теплоснабжения показала зависимость от структуры производства и транспортировки электрической энергии, климата и используемых отопительных приборов. Все указанные параметры отличаются для разных стран. При анализе данных по конкретным странам минимальный углеродный след имеют разные тепловые агрегаты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: углеродный след, углеродоемкость, эмиссия CO₂, тепловой насос, газовый котел, электрический котел, гибридный тепловой насос, энергетическая эффективность

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Торопов А.Л. Эмиссия CO₂ при работе автономных водяных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1779–1788. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1779-1788

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

CO₂ emissions during the operation of autonomous water heating systems

Alexey L. Toropov

Engineering Center “April”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. CO₂ emissions during the operation of heat generators of autonomous heat supply systems is one of the most important indicators of the man-made impact on the Earth’s atmosphere. Heat generation is carried out by heat pumps, gas and electric boilers, solid and liquid hydrocarbon fuel systems. The purpose of the work — Assessment of the CO₂ emission indicator per kilowatt of heat energy of the specified generators of heat supply systems with real energy efficiency of heat generators of heat supply systems with radiator-type heating devices.

Materials and methods. Official data of the Federal State Statistics Service of the Russian Federation, reports of the Ministry of Energy, the Ministry of Economic Development, current GOST and regulatory documents are used. Experimental data were used to calculate the energy efficiency coefficients of heat generators of autonomous heat supply systems. The calculations were carried out by methods of mathematical modelling.

Results. The values of CO₂ emissions per kilowatt of heat energy for autonomous water heating systems in the generation of heat energy by heat pumps (ASHP), gas condensing and convection boilers, solid and liquid fuel boilers were determined.

Conclusions. The assessment of CO₂ emissions of heat generators of autonomous water heat supply showed dependence on the structure of production and transportation of electric energy, climate and heating devices used. All of these parameters are different for different countries. When analyzing country-specific data, different thermal units have minimal carbon footprint.

KEYWORDS: carbon footprint, carbon intensity, CO₂ emissions, heat pump, gas boiler, electric boiler, hybrid heat pump, energy efficiency

Acknowledgements. The author thanks the reviewers for their comments, both in terms of the style of presentation and the scientific and technical essence, which contribute to a deeper disclosure of the topic of scientific work.

FOR CITATION: Toropov A.L. CO₂ emissions during the operation of autonomous water heating systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1779-1788. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1779-1788 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Эмиссия CO₂ при работе тепловых генераторов (ТГ) автономных систем теплоснабжения — один из важнейших показателей техногенного воздействия на атмосферу Земли. Величина данного показателя, выраженная в килограммах CO₂ на произведенный тепловым генератором киловатт тепловой энергии, определяет тенденции в развитии современной отопительной техники. В настоящее время в качестве основных типов генераторов тепла для автономных систем водяного теплоснабжения домохозяйств применяются:

- настенные газовые конвекционные котлы с атмосферной горелкой;
- настенные газовые конденсационные котлы с горелкой полного предварительного смешивания;
- электрические котлы;
- котлы на жидком и твердом углеводородном топливе;
- тепловые насосы (ТН);
- гибридные установки, использующие разные виды топлива при работе в различных температурных диапазонах атмосферного воздуха.

В общепринятой терминологии гибридная (двухтопливная) система теплоснабжения сочетает в себе газовый котел и ТН. Сегодня эти системы теплоснабжения домохозяйств считаются наиболее энергетически эффективными. Гибридные системы в автоматическом режиме переключают работу на наиболее эффективный вид топлива, дающий минимальный углеродный след при генерации тепловой мощности. Считается, что применение ТН для систем теплоснабжения снижает зависимость человечества от углеводородного топлива, а гибридная установка с газовыми котлами — вынужденная мера для работы при низких температурах окружающей среды, когда эффективность ТН падает. Тепловые насосы используют электрическую энергию, которая в первичном виде на планете не существует и является вторичной энергией, полученной в результате генерации с частичным применением углеводородного топлива. Структура использования первичного топлива в получении электрической энергии для каждой страны разная. Без комплексного анализа углеродоемкости производства электрической энергии и анализа энергоэффективности работы ТГ невозможно сделать однозначное заявление об экологичности того или иного способа теплоснабжения помещений. Структура потребления первичной энергии в каждой стране формируется ее

историко-технологическим развитием. По данным на 2018 г., в РФ доля газа составляет 60 %, угля — 16 %, нефтепродуктов — 13 %, ядерного топлива — 8 %, гидроэнергии — 3 %, все виды возобновляемых источников энергии составляют 0,03 %¹. В период с 2010 по 2016 г. углеродоемкость российской электроэнергии снизилась на 59,5 г CO₂/кВт·ч до 358 г CO₂/кВт·ч (–9 %), что эквивалентно снижению выбросов CO₂ в электроэнергетике за указанный период на 42,7 млн т (–10 %) при увеличении ее выработки на 51 млрд кВт·ч (+5 %) [1]. В 2021 г. общая годовая выработка электроэнергии в США электростанциями коммунального масштаба происходила при выбросе CO₂ 388 г/кВт·ч², в Китае — 660, в ФРГ — 435, в среднем по миру — 520 г CO₂/кВт·ч [2, 3]. Указанные значения соответствуют углеродному следу при производстве электрической энергии. При анализе влияния воздействия техногенных факторов на атмосферу Земли, связанных с теплоснабжением помещений, необходимо учитывать потери электрической энергии при ее транспортировке от места производства до места конечного потребления. Эти потери делятся на отчетные, технологические, коммерческие. В ходе анализа углеродного следа при работе систем теплоснабжения целесообразно учитывать только технологические потери, связанные с физическими процессами в электрооборудовании при передаче электроэнергии и расходами на собственные нужды подстанций, поскольку они носят объективный характер. Приемлемый уровень потерь — 4–5 %, но он зависит от расстояния транспортировки электрической энергии, температуры воздуха, напряжения в сети [4]. Предельный уровень технологических потерь при транспортировке электроэнергии составляет по оценкам специалистов 10 % [5]. При больших значениях есть вероятность неучтенного забора энергии. Величина потерь электри-

¹ О состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации : государственный доклад // Министерство экономического развития Российской Федерации. М., 2020. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c3901dba442f8e361d68bc019d7ee83f/Energyefficiency2020.pdf>

² How much carbon dioxide is produced per kilowatthour of U.S. electricity generation? // U.S. Energy Information Administration. URL: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>

ческой энергии — целевой нормативный показатель, устанавливаемый документами Правительства³.

При изучении вопросов эмиссии CO₂ тепловых генераторов автономных систем теплоснабжения в РФ следует учитывать, что наиболее распространенные приборы отопления — радиаторы и конвекторы, имеющие эффективную температуру теплоносителя напорной магистрали, равную 55–65 °С. Именно эти отопительные приборы наиболее применимы в системах водяного теплоснабжения, поскольку равномерно прогревают помещение, бесшумны и не создают большого движения воздушных масс. Другой особенностью, по сравнению с работой систем отопления в Европе, Северной Америке, Китае, Турции, Англии и других стран, служит климат — продолжительность и средняя температура атмосферного воздуха. Водяное отопление домохозяйства может быть выполнено низкотемпературными приборами типа «теплый пол», и в ряде случаев этот способ дает экономический эффект и возможность использовать ТН воздух–вода при температуре атмосферы до –10 °С [6]. Но «теплый пол» обладает высокой тепловой инерционностью и стандартные системы управления отоплением, такие как термостат температуры воздуха в помещении, при данном типе отопительных приборов неэффективен. К тому же «теплый пол», как единственный тепловой прибор в отапливаемом помещении, неприменим при температурах атмосферы ниже –15–20 °С,

³ Об утверждении нормативов потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций : Приказ Минэнерго России от 26.09.2017 № 887.

поскольку для компенсации теплопотерь помещения при стандартных значениях теплопроводности ограждающих конструкций требуется температура «теплого пола» выше 40 °С, что вызывает проблемы с точки зрения комфорта пребывания человека в таком помещении и ряд технических вопросов, связанных с используемыми материалами поверхности пола, расстановкой мебели и др. Сравнение эффективности нагрева помещений радиаторами и «теплым полом» проводилось многими авторами [7–12], но они не показали однозначного преимущества одного перед другим, кроме того, они выполнялись для более мягкого климата, чем в России.

В настоящем исследовании рассматривается нагрев помещений наиболее распространенным в РФ способом — отопительными приборами радиаторного типа. Для сравнения углеродного следа при работе разных ТГ автономных систем теплоснабжения в качестве единицы сравнения возьмем количество углекислого газа, выделяемого при сжигании природного газа при выделении одного киловатта тепловой энергии в час, равное 197 г [13, 14]. Энергоэффективность котлов на углеводородном топливе в диапазоне изменения тепловой нагрузки непостоянна. При использовании радиаторов отопления коэффициент энергетической эффективности у конвекционных газовых котлов составляет 80–82 % (GCV) и соответствует максимальной номинальной тепловой нагрузке. Настенные газовые конвекционные котлы с атмосферной горелкой имеют коэффициент модуляции не более 2,5 и неспособны работать в режиме плавной модуляции при тепловой нагрузке менее 40 % от номинальной [15–17]. При функционировании в диапазоне плавной модуляции тепловой мощ-

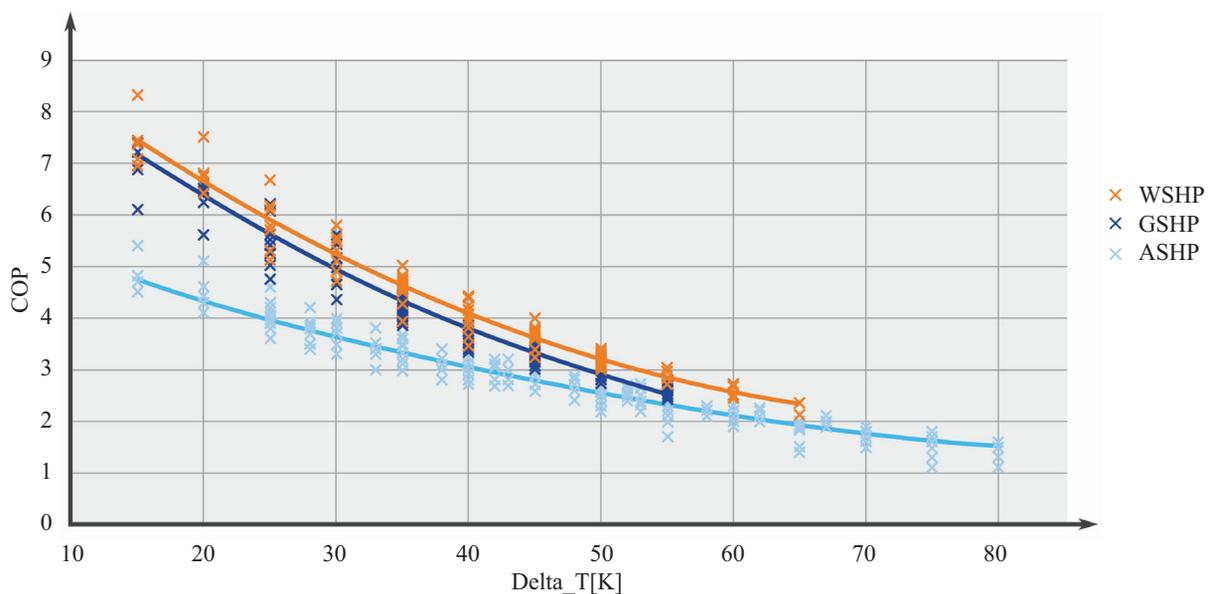


Рис. 1. Графики изменения COP в зависимости от разницы температуры атмосферы и температуры теплоносителя системы теплоснабжения: ASHP — тепловой насос с воздушным источником энергии; GSHP — тепловой насос с грунтовым источником энергии; WSHP — тепловой насос с водяным источником энергии

Fig. 1. Graphs of changes in COP depending on the difference in atmospheric temperature and heat carrier temperature of the heating system: ASHP — air source heat pump; GSHP — ground-source heat pump; WSHP — groundwater-source heat pump

ности газовых конвекционных котлов с атмосферными горелками эмиссия CO_2 составляет 240–250 г на киловатт тепловой мощности. При использовании конденсационных газовых котлов в режиме плавной модуляции тепловой мощности при радиаторном варианте отопительных приборов в атмосферу выделяется не менее 220 г CO_2 на киловатт. Конденсационные настенные газовые котлы при использовании радиаторных приборов отопления при номинальных нагрузках имеют КПД 84–86 % (GCV) [18–23].

Анализу COP (Coefficient of Performance — отношение произведенного тепла к потребленной электроэнергии) тепловых насосов при эксплуатации в разных климатических условиях посвящены работы [24–30]. Обобщенные графики зависимости COP тепловых насосов от температуры атмосферы представлены в работах [31, 32]. При использовании в качестве тепловых приборов радиаторов отопления особый интерес представляют ТН класса воздух–вода. Вариант применения воздушного источника энергии теплового насоса (ASHP) имеет наименьшую стоимость и может быть установлен в индивидуальном домохозяйстве как при новом строительстве, так и при реконструкции существующих объектов. График зависимости COP от перепада температур, полученный при анализе большого ряда ТН разных производителей, представлен на рис. 1 [33].

Цель исследования — оценка эмиссии CO_2 при работе генераторов тепла различного типа, используемых в автономных водяных системах теплоснабжения, установленных на территории РФ, с учетом полной эмиссии CO_2 при производстве и транспортировке электрической энергии до места ее применения, реальной энергетической эффективности работы тепловых генераторов систем теплоснабжения с отопительными приборами радиаторного типа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе используются официальные сведения Росстата РФ, доклады министерств энергетики, экономического развития, действующие ГОСТы и нормативные документы. При расчете коэффициентов энергетической эффективности ТГ автономных систем теплоснабжения использовались экспериментальные данные. Расчеты проводились методами математического моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Коэффициент энергетической эффективности конвекционных газовых котлов при максимальной номинальной нагрузке составляет 80–82 % (GCV). При работе в нижнем диапазоне пропорциональной модуляции тепловой мощности до 40 % от максимальной номинальной мощности он понижается до значения 77–79 % (GCV). Соответственно, при работе в диапазоне плавной модуляции тепловой мощности газовых конвекционных котлов с атмосферны-

ми горелками эмиссия CO_2 составляет 255–240 грамм на киловатт тепловой мощности. При отоплении домохозяйств малой площади (до 100 m^2) и особенно маломерных квартир в многоэтажных домах теплопотери на отопление составляют 1–4 кВт·ч [15, 34, 35]. Работа конвекционных газовых котлов при такой тепловой нагрузке переходит в режим циклической работы, при которой КПД котла может снижаться до 60 % (GCV). Алгоритм функционирования всех настенных конвекционных котлов в циклическом режиме заключается в обязательной технологической паузе между соседними пусками, длительностью от 1 до 3 мин. При этом у низкотемпературных конвекционных настенных котлов с принудительным дымоудалением пауза в работе горелочного устройства сопровождается принудительным обдуванием и охлаждением первичного теплообменника котла, а следовательно, и теплоносителя в системе теплоснабжения. Сгенерированная ранее тепловая энергия в период пауз выбрасывается через дымоход в атмосферу. Средний за отопительный период времени коэффициент энергетической эффективности при работе конвекционных настенных котлов при площади отапливаемого помещения до 100 m^2 составляет не более 65–70 % (GCV), что эквивалентно эмиссии 300 г CO_2 на киловатт произведенной тепловой энергии. При использовании конденсационных настенных газовых котлов в режиме плавной модуляции тепловой мощности при радиаторном варианте отопительных приборов в атмосферу выделяется не менее 220 г $\text{CO}_2/\text{кВт}$. Конденсационные настенные газовые котлы при использовании радиаторных приборов отопления при номинальных нагрузках имеют КПД 84–86 % (GCV). Коэффициент устойчивой модуляции конденсационных настенных газовых котлов с «пневматическим» газовым клапаном не превышает 5–6 раз, соответственно, при котле с номинальной мощностью 24 кВт·ч минимальная мощность не может быть ниже 4–5 кВт·ч. На объектах с маленькой отапливаемой площадью при температурах атмосферного воздуха выше -5 – -10 °C возможен выход работы конденсационного котла в тактовый режим, при этом эмиссия CO_2 также будет выше, чем при номинальной работе, достигая значений 270–280 г на киловатт тепловой энергии.

С целью использования электрической энергии для производства тепловой энергии в системе автономного теплоснабжения в основном применяются электрические котлы резисторного нагрева трубчатými электрическими нагревательными элементами (ТЭН) с высоким коэффициентом энергетической эффективности во всем диапазоне изменения тепловой нагрузки, равным 94–99 % [36, 37]. Для оценки углеродного следа в системах теплоснабжения с электрическим ТГ используем усредненное значение коэффициента энергетической эффективности 98 %. При электрическом водяном теплоснабжении необходимо учитывать технологические потери на транспортировку энергии

от источника до места потребления. В общем случае технологические потери зависят от напряжения в сети и их предельные значения составляют 220–110 кВ — до 6 %; 35 кВ — до 8 %; 6(10) кВ — до 10 %; 0,4 кВ — 14 % [38]. В связи с тем, что ТГ автономных систем теплоснабжения устанавливаются на конечных точках использования электрической энергии при напряжении трехфазной сети 0,4 кВ, принимаем в расчете значение технологических потерь, равное 14 %. При значении эмиссии CO₂ при выработке 1 кВт электрической энергии для РФ, равном 358 г, с учетом КПД электрических котлов, технологических потерь на транспортировку до конечного потребителя эмиссия CO₂ при производстве тепловой энергии автономного водяного электрического теплогенератора резисторного типа составит 410 г CO₂/кВт·ч.

На рис. 2 представлены графики углеродоемкости основных тепловых генераторов, применяемых для автономных систем теплоснабжения домохозяйств. Тепловые генераторы с использованием твердого и жидкого углеводородного топлива имеют высокий углеродный след и не могут конкурировать по этому показателю с газовыми, электрическими котлами, тепловыми насосами и гибридными установками. Их значения углеродоемкости приведены в справочном порядке на основании данных, представленных в труде [39]. Для угля (антрацит) — 1100 г CO₂/кВт·ч, для жидкого топлива (дизель, мазут) — 550–800 г CO₂/кВт·ч.

При работе тепловых насосов (ASHP) ниже нулевой отметки температуры атмосферного воздуха возникает необходимость в дополнительных затратах электроэнергии на размораживание конденсата, воз-

никающего на внешнем блоке. Если до температуры –5–7 °С эти вопросы решаются с помощью электрического нагревателя-размораживателя, то при более низких температурах целесообразен переход на отопление газовым котлом — гибридным тепловым насосом. Именно этот гибридный ТГ является наиболее эффективным с точки зрения минимальной эмиссии и минимального техногенного воздействия на атмосферу в рассматриваемых устройствах. На рис. 2 график эмиссии CO₂ для гибридного ТН автономной водяной системы теплоснабжения с радиаторами представлен фиолетовым цветом. Для выводов об уровне углеродоемкости при работе автономных систем теплоснабжения и преимуществах той или иной системы следует оценивать эмиссию CO₂ производства и транспортировки электрической энергии в конкретной стране и эмиссию CO₂ газовых генераторов тепловой энергии. К примеру, углеродоемкость производства электроэнергии в ФРГ кардинально изменилась. В 2021 г. она составляла 435 г CO₂/кВт·ч, в 2022 г. — 745 г CO₂/кВт·ч. Эти показатели выше, чем в ЮАР или Индии⁴. Доля ветряной энергетики снизилась до 21 %, газовая генерация возросла до 24 %, угольная до 47 %. Относительный коэффициент сравнения эмиссии CO₂, при котором показатели газовых и электрических ТГ равны, составил 3,35. При данном соотношении никакой ТН неспособен конкурировать с газовым котлом по эмиссии CO₂ при работе автономного те-

⁴ «Незеленая энергетика»: Германия опередила Индию по выбросам CO₂. URL: <https://topcor.ru/29871-nezelenaja-jenergetika-germanija-operedila-indiju-po-vybrosam-so2.html>

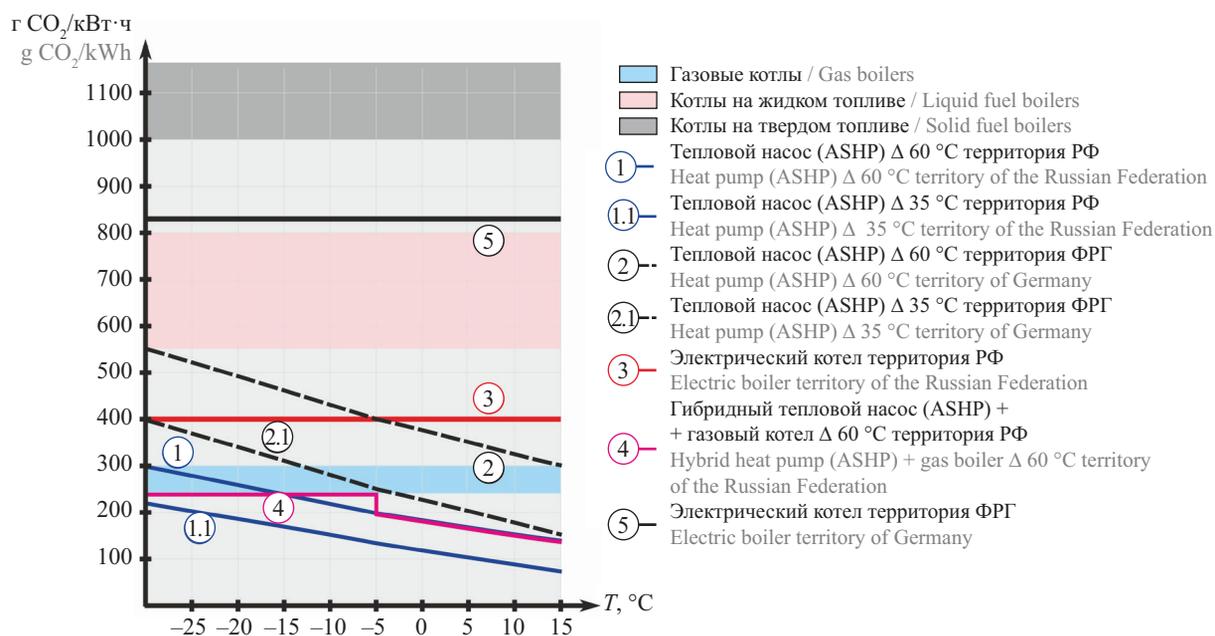


Рис. 2. Графики эмиссии CO₂ при работе тепловых генераторов автономных систем теплоснабжения в зависимости от температуры окружающего атмосферного воздуха

Fig. 2. Graphs of CO₂ emissions during the operation of heat generators of autonomous heat supply systems depending on the ambient air temperature

плоснабжения. Выбросы CO₂ при работе ТН в ФРГ превышают выбросы CO₂ при работе газовых котлов при любой температуре отопительного периода.

В РФ относительный коэффициент равенства эмиссии CO₂ для электрических устройств и газовых котлов составил около 1,5. Для тепловых насосов воздух–вода (ASHP) этот коэффициент при использовании радиаторов отопления с температурой 60 °С соответствует температуре атмосферного воздуха практически всего отопительного периода. Однако на практике эффективность воздушных ТН при температурах ниже –5 °С из-за наледи снижается и фактическое значение COP стремится к 1. В регионах, где средняя температура отопительного периода выше –5 °С, ТН работают с эмиссией ниже, чем у газовых котлов. Тепловые насосы работают на охлаждение помещений более эффективно, чем на отопление. Их целесообразно устанавливать, когда летом возникает вопрос о кондиционировании помещений, а зимой, если средняя температура отопительного периода выше нуля, для отопления. Если температура окружающего воздуха ниже –5 °С и есть ограничения на величину выделенной на домохозяйство электрической мощности, особенно при площади помещений более 100 м², целесообразно устанавливать гибридные системы (тепловой насос + газовый котел). Данные устройства обладают наивысшей энергетической эффективностью и минимальным углеродным следом. Температура перехода работы гибридных систем теплоснабжения с одного вида топлива на другой (с электричества ТН на газ котла) с экологической точки зрения для рассматриваемых систем составляет для РФ –5 °С. Для помещений площадью менее 100 м² установка газовых котлов при наличии ТН не имеет смысла. Возможна установка ТН и электрического котла, подключаемого при температурах атмосферы ниже –5 °С. При ограничениях по мощности электрической энергии, выделенной на объект, единственный путь решения — утепление зданий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В расчете эмиссии CO₂ при производстве электрической энергии необходимо учитывать исторически сложившуюся структуру производства и типа электростанций. Различие в данных показателях для разных стран может составлять до трех раз. Стоит учитывать потери на транспортировку электрической энергии до конечной точки потребления — домохозяйство. Величина технологических потерь на транспортировку при напряжении 0,4 кВ на точке потребления энергии — не менее 10 %.

Энергетическая эффективность ТГ в отопительный период непостоянна и зависит от многих параметров, включая погодные условия, размеры и теплоизоляцию ограждающих конструкций, и систем управления тепловой мощностью генератора тепла. В РФ с тепловыми приборами радиаторного типа для газовых конвекционных котлов уровень выбросов CO₂ на 1 кВт·ч произведенной тепловой энергии составляет от 240 до 300 г, для конденсационных газовых котлов — 220–280 г, для электрических котлов с резисторными нагревательными элементами — 410 г CO₂/кВт·ч.

Вывод о преимуществах эмиссии CO₂ при работе автономных систем теплоснабжения того или иного ТГ возможен только после анализа углеродоемкости производства электрической энергии, которая может отличаться в разных странах в несколько раз. К примеру, в ФРГ после 2022 г. эмиссия CO₂ при работе ТН (воздух–вода) в качестве генераторов тепловой энергии выше эмиссии при работе газовых котлов. Применительно к территории РФ для объектов с отапливаемой площадью более 100 м² с точки зрения энергоэффективности и углеродоемкости лучшими являются установки гибридного типа тепловой насос + конденсационный газовый котел, имеющие углеродный след в среднем 160–180 г CO₂/кВт·ч тепловой энергии за весь отопительный период.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гимади В., Амирагян А., Поминова И., Курдин А., Колобов О., Мартынюк А. и др. Углеродоемкость электроэнергии в мире и России // Энергетический бюллетень. 2019. № 72. С. 82–85.
2. Белобородов С.С. Снижения эмиссии CO₂; развитие когенерации или строительство ВИЭ? // Энергосовет. 2018. № 1 (51). С. 16–25.
3. Hussy C., Klaassen E., Koornneef J., Wigand F. International comparison of fossil power efficiency and CO₂ intensity — Update 2014. Netherlands : ECOFYS, 2014. 84 p.
4. Киселёв Г.Ю., Троценко В.М., Петрова Е.В., Криволапов В.А., Гиришин С.С., Бубенчиков А.А. и др. Потери электрической энергии в электрических сетях // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 80–85. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-80-85. EDN TIXHEB.
5. Шведов Г.В., Сутачева О.В., Савченко О.В. Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение. М. : Издательский дом «МЭИ», 2013. 424 с. EDN SUOPLV.
6. Vadiie A., Dodoo A., Jalilzadehazhari E. Heat supply comparison in a single-family house with radiator and floor heating systems // Buildings. 2019. Vol. 10. Issue 1. P. 5. DOI: 10.3390/buildings10010005
7. Sarbu I., Sebarchievici C. A study of the performances of low-temperature heating systems // Energy Efficiency. 2014. Vol. 8. Issue 3. Pp. 609–627. DOI: 10.1007/s12053-014-9312-4

8. Sarbu I., Sebarchievici C. Performance evaluation of radiator and radiant floor heating systems for an office room connected to a ground-coupled heat pump // *Energies*. 2016. Vol. 9. Issue 4. P. 228. DOI: 10.3390/en9040228
9. Livonen M. The guide to radiators for low temperature heating. Zonhoven, Belgium : Radson, 2012. 85 p.
10. Persson T. Lågtemperaturvärmsystem: En kunskapsöversikt. Falun, Sweden : Högskolan Dalarna, 2000. 103 p.
11. Myhren J.A., Holmberg S. Design considerations with ventilation-radiators: Comparisons to traditional two-panel radiators // *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. Issue 1. Pp. 92–100. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.07.014
12. Olesen B.W., de Carli M. Calculation of the yearly energy performance of heating systems based on the European Building Energy Directive and related CEN standards // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Issue 5. Pp. 1040–1050. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.009
13. Casasso A., Capodaglio P., Simonetto F., Sethi R. Environmental and economic benefits from the phase-out of residential oil heating: a study from the Aosta valley region (Italy) // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Issue 13. P. 3633. DOI: 10.3390/su11133633
14. Ravina M., Gamberini C., Casasso A., Panepinto D. Environmental and health impacts of Domestic Hot Water (DHW) boilers in urban areas: a case study from Turin, NW Italy // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17. Issue 2. P. 595. DOI: 10.3390/ijerph17020595
15. Торопов А.Л. Исследование работы газовых клапанов конвекционных котлов малой мощности // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2020. № 3. С. 58–71. EDN VZQWKW.
16. Хаванов П.А. Атмосферные газовые горелки автономных генераторов // *АВОК*. 2003. № 1. С. 54.
17. Торопов А.Л. Гидравлическая и тепловая устойчивость работы автономных систем поквартирного теплоснабжения // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 7. С. 944–953. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.944-953
18. Наумов Н.Р., Марьяндышев П.А., Попов А.Н., Любовь 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. EDN ZCDJEB.
19. Хаванов П.А., Чуленев А.С. Климатические параметры и эффективность конденсационных котлов // *АВОК*. 2016. № 3. С. 56–63. EDN VRANFD.
20. Хаванов П.А., Чуленев А.С. Результаты испытаний конденсационного котла при различных режимах эксплуатации // *Научное обозрение*. 2015. № 10–1. С. 45–49. EDN UHPQER.
21. Табунициков Ю.А. Конденсационные котлы в автономном теплоснабжении // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, тепло-*
- снабжение и строительная теплофизика. 2016. № 4. С. 26–31. EDN WANDZV.
22. Bonaros V., Gelegenis J., Haris D., Giannakidis G., Zeryas K. Analysis of the energy and cost savings caused by using condensing boilers for heating dwellings in Greece // *5th International Conference on Applied Energy ICAE2013*. 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.2731.4406
23. Aksenov A.K., Kosorukov D.P. Application of condensation economizers in order to increase the energy efficiency of gas boilers of a traditional type // *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/fareastcon50210.2020.9271452
24. Leonzio G., Fennell P.S., Shah N. Air-source heat pumps for water heating at a high temperature: State of the art // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 54. P. 102866. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102866
25. Tabatabaei S.A., Treur J. Comparative Analysis of the Efficiency of Air Source Heat Pumps in Different Climatic Areas of Iran // *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 34. Pp. 547–558. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.04.048
26. Xu Y., Huang Y., Jiang N., Song M., Xie X., Xu X. Experimental and theoretical study on an air-source heat pump water heater for northern China in cold winter: Effects of environment temperature and switch of operating modes // *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 191. Pp. 164–173. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.03.028
27. Kul O., Ugural M.N. Comparative economic and experimental assessment of air source heat pump and gas-fired boiler: a case study from Turkey // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Issue 21. P. 14298. DOI: 10.3390/su142114298
28. Pieper H., Krupenski I., Markussen W.B., Ommen T., Siirde A., Volkova A. Method of linear approximation of COP for heat pumps and chillers based on thermodynamic modelling and off-design operation // *Energy*. 2021. Vol. 230. P. 120743. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120743
29. Колечкина А.Ю., Захаров А.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет использования систем горизонтальных теплообменников // *Construction and Geotechnics*. 2016. Т. 7. № 1. С. 112–122. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.1.13
30. Чичерин С.В. Место теплоснабжения в современном городе // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2018. Т. 9. № 3. С. 79–87. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.08. EDN YKKDLF.
31. Pollard A., Berg B. Heat pump performance. Jungferd, New Zealand : BRANZ Ltd, 2018. 24 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.25116.13449
32. Rossi di Schio E., Ballerini V., Dongellini M., Valdiserri P. Defrosting of air-source heat pumps: effect of real temperature data on seasonal energy performance

for different locations in Italy // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 17. P. 8003. DOI: 10.3390/app11178003

33. Ruhnau O., Hirth L., Praktiknjo A. Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling // *Scientific Data*. 2019. Vol. 6. Issue 1. DOI: 10.1038/s41597-019-0199-y

34. Myhren J.A., Holmberg S. Design considerations with ventilation-radiators: Comparisons to traditional two-panel radiators // *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. Issue 1. Pp. 92–100. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.07.014

35. Olesen B.W., de Carli M. Calculation of the yearly energy performance of heating systems based on the European Building Energy Directive and related CEN standards // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Issue 5. Pp. 1040–1050. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.009

36. Торопов А.Л. Применение электрических котлов для водяного поквартирного теплоснабжения // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 9. С. 1451–1465. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1451-1465

37. Торопов А.Л. Энергетическая эффективность электрического котла с косвенным поверхностным резисторным нагревом теплоносителя // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 6. С. 927–934. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.927-934

38. Пузырев Е.В. Детерминированный и стохастический подходы в расчетах и анализе потерь электрической энергии при оценке эффективности функционирования распределительных сетей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2019. 20 с.

39. Проконова Л.В., Волков Ю.В. Экологические проблемы при производстве электрической и тепловой энергии : практикум. СПб., 2019. 101 с.

Поступила в редакцию 26 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 25 июня 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: Алексей Леонидович Торопов — кандидат технических наук, генеральный директор — главный конструктор; Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); 105122, г. Москва, Щелковское шоссе, д. 13; РИНЦ ID: 1030472, Scopus: 58406665800, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

REFERENCES

1. Gimadi V., Amiryagyan A., Pominova I., Kurdin A., Kolobov O., Martynyuk A. et al. Carbon intensity of electricity in the world and Russia. *Energy Bulletin*. 2019; 72:82-85. (rus.).

2. Beloborodov S.S. Reducing CO₂ emissions: development of cogeneration or construction of renewable energy sources? *Energy Council*. 2018; 1(51):16-25. (rus.).

3. Hussy C., Klaassen E., Koornneef J., Wigand F. *International comparison of fossil power efficiency and CO₂ intensity — Update 2014*. Netherlands, ECOFYS, 2014; 84.

4. Kiselyov G.Yu., Trotsenko V.M., Petrova E.V., Krivolapov V.A., Girshin S.S., Bubenchikov A.A. et al. Losses of electrical energy in electrical networks. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023; 1(185):80-85. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-80-85. EDN TIXXEB. (rus.).

5. Shvedov G.V., Sipacheva O.V., Savchenko O.V. *Electricity losses during its transport through electrical networks: calculation, analysis, rationing and reduction*. Moscow, Publishing House “MPEI”, 2013; 424. EDN SUOPLV. (rus.).

6. Vadiee A., Dodoo A., Jalilzadehazhari E. Heat supply comparison in a single-family house with radiator and floor heating systems. *Buildings*. 2019; 10(1):5. DOI: 10.3390/buildings10010005

7. Sarbu I., Sebarchievici C. A study of the performances of low-temperature heating systems. *Energy Efficiency*. 2014; 8(3):609-627. DOI: 10.1007/s12053-014-9312-4

8. Sarbu I., Sebarchievici C. Performance evaluation of radiator and radiant floor heating systems for an office room connected to a ground-coupled heat pump. *Energies*. 2016; 9(4):228. DOI: 10.3390/en9040228

9. Livonen M. *The Guid to Radiators for Low Temperature Heating*. Zonhoven. Belgium, Radson, 2012; 85.

10. Persson T. *Lågtemperaturvärmesystem: En kunskapsöversikt*. Falun, Sweden, Högskolan Dalarna, 2000; 103.

11. Myhren J.A., Holmberg S. Design considerations with ventilation-radiators: Comparisons to traditional two-panel radiators. *Energy and Buildings*. 2009; 41(1):92-100. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.07.014

12. Olesen B.W., de Carli M. Calculation of the yearly energy performance of heating systems based on the European Building Energy Directive and related CEN standards. *Energy and Buildings*. 2011; 43(5):1040-1050. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.009

13. Casasso A., Capodaglio P., Simonetto F., Sethi R. Environmental and economic benefits from the phase-out of residential oil heating: a study from the Aosta Valley

- Region (Italy). *Sustainability*. 2019; 11(13):3633. DOI: 10.3390/su11133633
14. Ravina M., Gamberini C., Casasso A., Panepinto D. Environmental and health impacts of Domestic Hot Water (DHW) boilers in urban areas: a case study from Turin, NW Italy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17(2):595. DOI: 10.3390/ijerph17020595
15. Toropov A.L. Analysis of operation of gas valves of low-power convection boilers. *ABOK*. 2020; 3:58-71. EDN VZQWKW. (rus.).
16. Havanov P.A. Atmospheric gas burners of autonomous heat generators. *ABOK*. 2003; 1:54. (rus.).
17. Toropov A.L. Hydraulic and thermal stability of independent systems of apartment heating. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(7):944-953. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.944-953 (rus.).
18. 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. EDN ZCDJEB. (rus.).
19. Havanov P.A., Chulenev A.S. Climatic parameters and efficiency of condensation boilers. *ABOK*. 2016; 3:56-63. EDN VRANFD. (rus.).
20. Havanov P.A., Chulenev A.S. Results of condensing boiler tests under different operational regimes. *Scientific Review*. 2015; 10-1:45-49. EDN UHPQER. (rus.).
21. Tabunshchikov Y.A. Condensing boilers in autonomous heat supply. *ABOK*. 2016; 4:26-31. EDN WANDZV. (rus.).
22. Bonaros V., Gelegenis J., Haris D., Giannakidis G., Zeryas K. Analysis of the energy and cost savings caused by using condensing boilers for heating dwellings in Greece. *5th International Conference on Applied Energy ICAE2013*. 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.2731.4406
23. Aksenov A.K., Kosorukov D.P. Application of condensation economizers in order to increase the energy efficiency of gas boilers of a traditional type. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020; 1-4. DOI: 10.1109/fareastcon50210.2020.9271452
24. Leonzio G., Fennell P.S., Shah N. Air-source heat pumps for water heating at a high temperature: State of the art. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022; 54:102866. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102866
25. Tabatabaei S.A., Treur J. Comparative analysis of the efficiency of air source heat pumps in different climatic areas of Iran. *Procedia Environmental Sciences*. 2016; 34:547-558. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.04.048
26. Xu Y., Huang Y., Jiang N., Song M., Xie X., Xu X. Experimental and theoretical study on an air-source heat pump water heater for northern China in cold winter: Effects of environment temperature and switch of operating modes. *Energy and Buildings*. 2019; 191:164-173. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.03.028
27. Kul O., Ugural M.N. Comparative economic and experimental assessment of air source heat pump and gas-fired boiler: a case study from Turkey. *Sustainability*. 2022; 14(21):14298. DOI: 10.3390/su142114298
28. Pieper H., Krupenski I., Markussen W.B., Ommen T., Siirde A., Volkova A. Method of linear approximation of COP for heat pumps and chillers based on thermodynamic modelling and off-design operation. *Energy*. 2021; 230:120743. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120743
29. Kolechkina A.Yu., Zaharov A.V. Increasing the energy efficiency of buildings through the use of horizontal heat exchanger systems. *Construction and Geotechnics*. 2016; 7(1):112-122. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.1.13 (rus.).
30. Chicherin S.V. District heating for a urban sustainable future. *Construction and Geotechnics*. 2018; 9(3):79-87. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.08. EDN YKKDLF. (rus.).
31. Pollard A., Berg B. *Heat pump performance*. Jungferd, New Zealand, BRANZ Ltd, 2018; 24. DOI: 10.13140/RG.2.2.25116.13449
32. Rossi di Schio E., Ballerini V., Dongellini M., Valdiserri P. Defrosting of air-source heat pumps: effect of real temperature data on seasonal energy performance for different locations in Italy. *Applied Sciences*. 2021; 11(17):8003. DOI: 10.3390/app11178003
33. Ruhnau O., Hirth L., Praktijnjo A. Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling. *Scientific Data*. 2019; 6(1). DOI: 10.1038/s41597-019-0199-y
34. Myhren J.A., Holmberg S. Design considerations with ventilation-radiators: Comparisons to traditional two-panel radiators. *Energy and Buildings*. 2009; 41(1):92-100. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.07.014
35. Olesen B.W., de Carli M. Calculation of the yearly energy performance of heating systems based on the European Building Energy Directive and related CEN standards. *Energy and Buildings*. 2011; 43(5):1040-1050. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.009
36. Toropov A.L. Application of electric boilers for water apartment heat supply. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(9):1451-1465. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1451-1465 (rus.).
37. Toropov A.L. Energy efficiency of an electric boiler with indirect surface resistive heating of the heat carrier. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construc-

tion and Architecture]. 2023; 18(6):927-934. DOI: 10.22227/19970935.2023.6.927-934 (rus.).

38. Puzyrev E.V. *Deterministic and stochastic approaches in calculations and analysis of electrical energy losses when assessing the efficiency of distribution*

networks : abstract of thesis for the degree of candidate of technical sciences. Krasnoyarsk, 2019; 20. (rus.).

39. Prokopova L.V., Volkov Yu.V. *Environmental problems in the production of electrical and thermal energy : workshop*. St. Petersburg, 2019; 101. (rus.).

Received March 26, 2024.

Adopted in revised form on March 26, 2024.

Approved for publication on June 25, 2024.

B I O N O T E S: **Alexey L. Toropov** — Candidate of Technical Sciences, General Director — Chief Designer; **Engineering Center “April”**; 13 Schelkovskoe shosse, Moscow, 105122, Russian Federation; ID RSCI: 1030472, Scopus: 58406665800, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69:658

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1789-1796

Моделирование бизнес-процессов инжиниринговых компаний на этапах жизненного цикла инвестиционно-строительного проекта

Владимир Иванович Пасканый, Азарий Абрамович Лапидус
*Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Инжиниринговая компания обеспечивает взаимодействие всех участников инвестиционно-строительного проекта на протяжении всего его жизненного цикла и реализует множество бизнес-процессов (БП). В силу того, что инжиниринговая компания координирует работу проектных и подрядных организаций, поставщиков материально-технических ресурсов, экспертных организаций, эффективность ее организационной структуры во многом определяет эффективность работы всех участников инвестиционно-строительного проекта.

Материалы и методы. Даны определения БП и организационной структуры, показано, что для моделирования БП при различных организационных структурах наиболее рациональным решением является моделирование на основе сетей массового обслуживания. В результате для абстрактного БП и упрощенной организационной структуры разработана имитационная модель сети массового обслуживания. Для программной реализации использовался язык имитационного моделирования GPSS.

Результаты. В результате проведенного моделирования показано, что, варьируя временными показателями реализации БП и временем выполнения различных бизнес-функций, а также количественным составом исполнителей в подразделениях инжиниринговой компании, можно получать достаточно устойчивые оценки эффективности ее производственной деятельности. К ключевым оценкам стоит отнести среднее время реализации главных БП и среднюю очередь заявок на реализацию соответствующих БП. На основании полученных значений этих показателей руководство сможет более обоснованно принимать решения о кадровом составе инжиниринговой компании и трансформации ее организационной структуры.

Выводы. Моделирование является основным механизмом решения задач прогнозирования и оптимизации. На базе результатов моделирования можно принять обоснованное решение о количестве сотрудников, необходимых для сопровождения определенной группы БП.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бизнес-процессы, бизнес-функции, организационные структуры, инжиниринговая компания, жизненный цикл, имитационное моделирование, язык моделирования GPSS

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пасканый В.И., Лапидус А.А. Моделирование бизнес-процессов инжиниринговых компаний на этапах жизненного цикла инвестиционно-строительного проекта // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1789–1796. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1789-1796

Автор, ответственный за переписку: Владимир Иванович Пасканый, paskanny@mail.ru.

Modelling of business processes of engineering companies at the stages of the life cycle of an investment and construction project

Vladimir I. Paskanny, Azariy A. Lapidus

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

ABSTRACT

Introduction. The engineering company ensures the interaction of all participants of the investment and construction project throughout its life cycle and implements a variety of business processes. Due to the fact that an engineering company coordinates the work of design and contracting organizations, suppliers of material and technical resources, the effectiveness of its organizational structure largely determines the efficiency of all participants in an investment and construction project.

Materials and methods. The paper defines business processes and organizational structure and shows that for modelling business processes under various organizational structures, the most rational solution is modelling based on queuing networks. As a result, a simulation model of a queuing network was developed for an abstract business process and a simplified organizational structure. The GPSS simulation language was used for software implementation.

Results. As a result of the modelling, it is shown that by varying the time indicators of the implementation of business processes and the times of performing various business functions, as well as the quantitative composition of performers in the divisions of an engineering company, it is possible to obtain stable estimates of the effectiveness of its production activities. The main estimates include the average implementation time of the main business processes and the average queue of queries for the implementation of the relevant business processes. Based on the obtained values of these indicators, the management will be able to make more reasonable decisions about the staffing of the engineering company and the transformation of its organizational structure.

Conclusions. Modelling is the main mechanism for solving forecasting and optimization problems. Based on the simulation results, it is possible to make an informed decision about the number of employees needed to support a certain group of business processes.

KEYWORDS: business processes, business functions, organizational structures, engineering company, life cycle, simulation modelling, GPSS modelling language

FOR CITATION: Paskanny V.I., Lapidus A.A. Modelling of business processes of engineering companies at the stages of the life cycle of an investment and construction project. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1789-1796. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1789-1796 (rus.).

Corresponding author: Vladimir I. Paskanny, paskanny@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В Стандарте ISO 9000–2011 процесс определен как «совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих видов деятельности, преобразующих входы в выходы». По ГОСТ Р 56862–2016 бизнес-процесс (БП) — это «совокупность последовательно и (или) параллельно выполняемых операций, преобразующая материальный и (или) информационный потоки в соответствующие потоки с другими свойствами». Кроме того, в литературе встречается также, по меньшей мере, несколько десятков определений БП [1–4]. Авторы используют определение БП «как систему последовательных, целенаправленных и регламентированных видов деятельности, в которой посредством управляющего воздействия и с помощью ресурсов входы процесса преобразуются в выходы — результаты процесса, — представляющие ценность для потребителей».

БП разделяют на основные, сопутствующие, вспомогательные, обеспечивающие, процессы управления и процессы развития (рис. 1).

Основные БП генерируют доходы компании. К ним относятся процессы, ориентированные на производство товара или оказание услуги, являющиеся целевыми объектами создания предприятия и обеспечивающие получение дохода. Именно основные БП формируют результат и потребительские качества, за которые внешний клиент готов платить деньги. В качестве типовой структуры БП инжиниринговой компании можно привести БП на этапе реализации четвертого этапа проекта:

A4. Строительство.

A4.1. Получение разрешения на строительство.

A4.2. Заключение договоров о закупке и поставке необходимых материалов и оборудования.

A4.3. Организация работ подготовительного этапа.

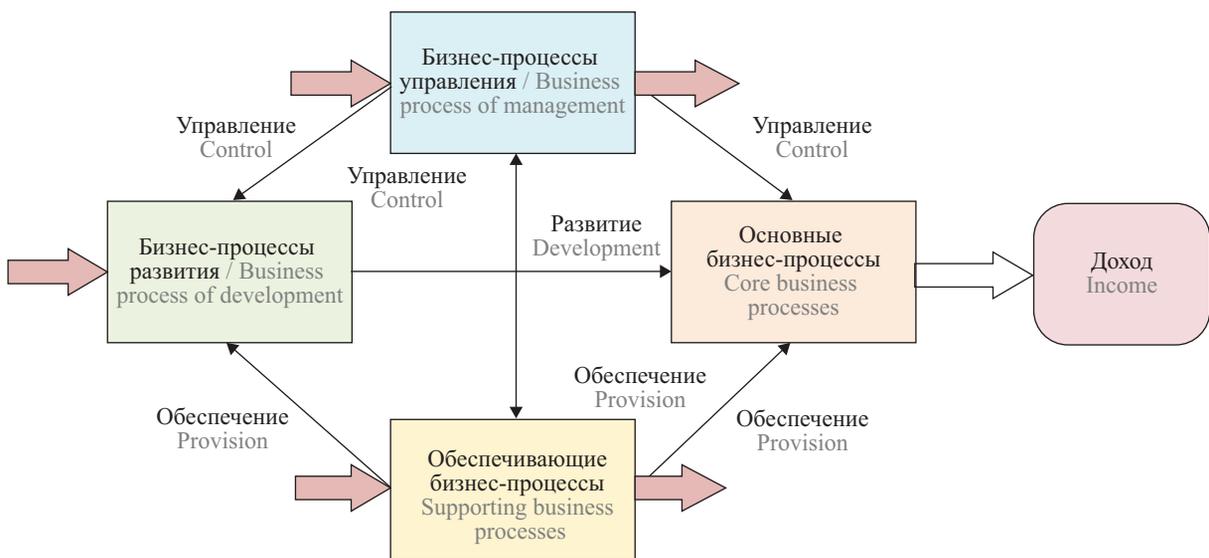


Рис. 1. Виды и функциональная взаимосвязь БП

Fig. 1. Types and functional interrelation of business processes

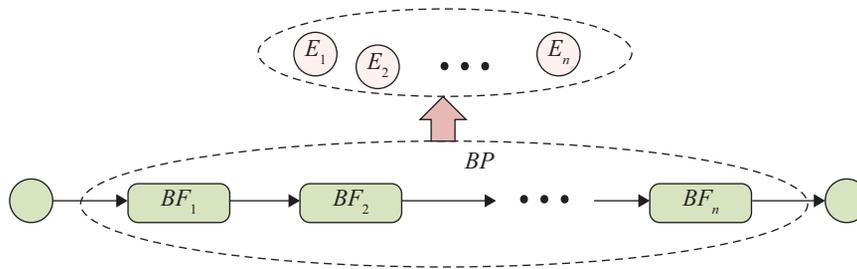


Рис. 2. Взаимосвязь БП и организационной структуры

Fig. 2. The relationship between the business process and the organizational structure

A4.4. Оперативный контроль выполнения работ подготовительного этапа.

A4.5. Организация основных строительно-монтажных работ.

A4.6. Оперативный контроль выполнения основных строительно-монтажных работ.

Любое предприятие полагает своей целью максимально эффективно реализовать основные БП. В связи с этим необходимо решение задачи формирования соответствующей организационной структуры, которая обеспечит эту эффективность [5–11].

Предлагается решение задачи выбора организационной структуры на основе имитационного моделирования БП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пусть имеется некоторый БП, который состоит из нескольких бизнес-функций (BF_1, BF_2, \dots, BF_n) (рис. 2). При этом известны параметры распределения случайного времени между моментами начала выполнения БП. Организационная структура носит упрощенный характер, когда есть одна группа исполнителей (E_1, E_2, \dots, E_m) и все могут участвовать в реализации всего БП (BP).

Если весь БП сопровождается единственным исполнителем, то нет необходимости деления процесса на функции, поскольку сопровождение процесса занимает полное время одного сотрудника. Такая ситуация возможна, когда на предприятии имеется полная декомпозиция БП, т.е. за каждым БП закреплен единственный исполнитель, который ведет его до завершения.

Для моделирования такой ситуации при разработке программы моделирования следует использование трех операторов GPSS, а именно STORAGE, ENTER и LEAVE.

При переходе к формализации в виде системы массового обслуживания (СМО) будет иметь место простая структура. Генерируется инициатор соответствующего БП, который передается в блок очереди <Очередь_1> группы исполнителей <Группа 1>. Если очередь пуста и достаточное количество компонентов многоканального узла свободно, то инициатор сразу передается в блок <Группа 1>. Если нет

необходимого количества свободных компонентов, то инициатор ждет их освобождения.

При моделировании этой ситуации будем полагать, что входной поток БП имеет пуассоновский характер, т.е. закон распределения интервалов между поступлениями БП — экспоненциальный.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На языке GPSS соответствующий программный код будет иметь вид:

- Group1 STORAGE 10; задание числа компонентов в многоканальном узле;

Результаты моделирования по оценке зависимости среднего времени и средней очереди на выполнение БП от количества сотрудников и интервалов между поступлениями заявок на выполнение БП

Modelling results assessing the dependence of the average time and average queue for executing a business process on the number of employees and the intervals between requests for executing a business process

N	T_{in}	T_{ob}	N_{ob}	N	T_{in}	T_{ob}	N_{ob}
9	9,2	455,92	50,57	12	9,2	93,76	9,59
9	9,4	660,51	68,72	12	9,4	96,08	9,90
9	9,6	465,41	47,97	12	9,6	99,19	9,93
9	9,8	185,87	18,07	12	9,8	95,42	9,75
9	10	242,34	23,72	12	10	97,63	9,42
10	9,2	124,65	12,62	13	9,2	95,90	10,31
10	9,4	293,57	31,64	13	9,4	93,23	9,63
10	9,6	144,61	14,73	13	9,6	93,18	9,45
10	9,8	138,28	13,77	13	9,8	91,79	9,03
10	10	128,03	12,32	13	10	95,33	9,59
11	9,2	106,66	11,24	14	9,2	88,77	9,26
11	9,4	100,62	9,98	14	9,4	93,68	9,78
11	9,6	115,43	12,00	14	9,6	96,15	9,74
11	9,8	129,60	13,41	14	9,8	90,99	9,10
11	10	112,75	11,00	14	10	91,50	8,89

3М диаграмма рассеяния для T_{ob} , N и T_{in}
 3M scattering diagram for T_{ob} , N and T_{in}

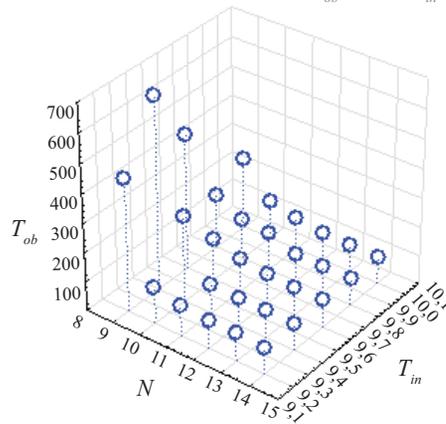


Рис. 3. Поле рассеяния среднего времени пребывания в системе
 Fig. 3. The scattering field of the average residence time in the system

- GENERATE (Exponential (1,0,100)); формирование потока БП;
- QUEUE Queue1; регистрация момента поступления заявки;
- ENTER Group1; попытка занять один из компонентов узла;
- DEPART Queue1; регистрация момента выхода;
- ADVANCE (Exponential (1,0,100)) задержка инициатора;
- LEAVE Group1; освобождение компонента многоканального узла;
- TERMINATE 1; удаление обслуженной заявки;
- START 1000; выполнить моделирование для 1000 БП.

Здесь очередь обозначена <Queue_1>, а исполнитель <Group_1>.

В данном случае результатом моделирования была зависимость среднего времени реализации БП (T_{ob}) в ОС от показателей распределений интервалов прихода БП в ОС. В результате моделирования была получена зависимость распределения времени реализации БП от общего количества сотрудников, входящих в состав группы, и необходимого количества сотрудников для выполнения данной функции. Средние интервалы между приходами БП в ОС (T_{in}) варьировались от 9 до 10 ч. Количество сотрудников N варьировалось от 9 до 14 человек. Среднее время сопровождения БП в среднем занимало порядка 10 ч. Кроме того, дополнительно рассчитывалось среднее значение очереди заявок N_{ob} на выполнение БП. Результаты расчета для этих значений приведены в таблице, где T_{in} — средние интервалы между приходами заявок на выполнение БП, ч; T_{ob} — среднее время выполнения БП, ч; N_{ob} — средняя длина очереди заявок, шт.; N — количество сотрудников, чел.; под временем понимается среднее время реализации одного БП; очередь — это также средняя очередь, которая возникает при реализации БП.

Как видно из таблицы, разница между временем реализации БП существенная. Поэтому задача выбора количественного состава группы для заданной интенсивности поступления заявок на сопровождение БП актуальна.

На графике (рис. 3) приведены результаты моделирования по оценке среднего времени пребывания (T_{ob} — ось Z) в зависимости от количества исполнителей (N — ось X) и средних интервалов между приходами заявок на реализацию БП (T_{in} — ось Y) в виде диаграммы рассеяния. Точки графика (XYZ) показывают значение среднего времени выполнения БП при всевозможных комбинациях количества исполнителей и среднего значения интервала между приходами заявок на выполнение БП. Например, для количе-

3М графики поверхностей для T_{ob} , N и T_{in}
 3M Graphs of surfaces

GPSS Пас 4v · 30с

$$T_{ob} = -48\,055,7754 - 12\,907,514 \cdot x + 2713,5089 \cdot y + 245,3054 \cdot x \cdot x + 70,3805 \cdot x \cdot y - 18,7832 \cdot y \cdot y$$

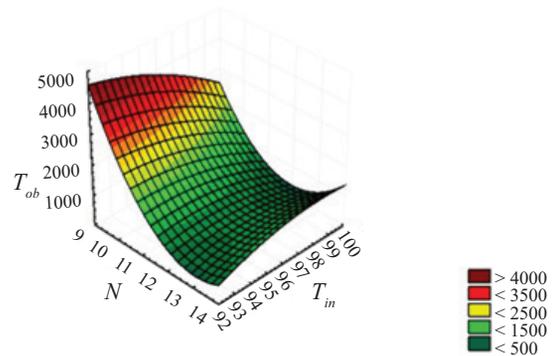


Рис. 4. Квадратичная аппроксимация среднего времени выполнения БП в ОС

Fig. 4. Quadratic approximation of the average execution time of BP in the system

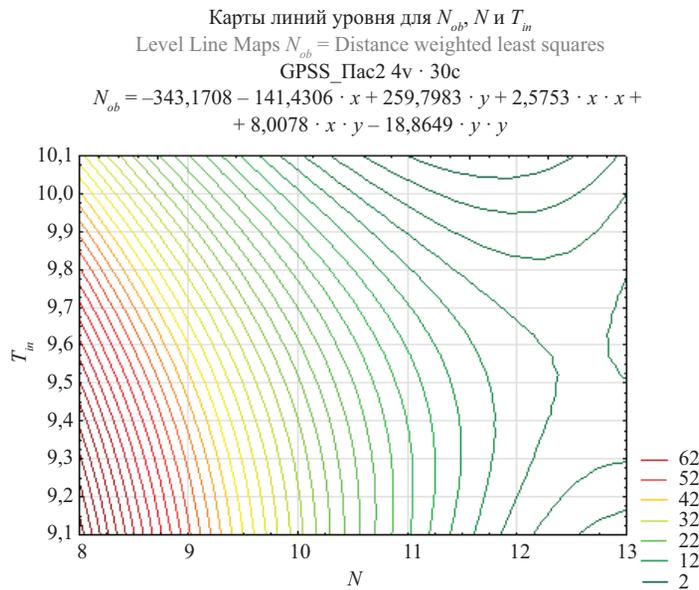


Рис. 5. Контурный график для аппроксимации средней очереди в зависимости от интервала поступления заявок и числа сотрудников

Fig. 5. Contour graph for approximating the average queue depending on the interval of receipt of applications and the number of employees

ства сотрудников 9 чел. и при среднем интервале 10 ч среднее время реализации БП равно порядка 242 ч. Для количества сотрудников 14 чел. и при среднем интервале 10 ч среднее время реализации БП порядка 91 ч.

Из графика видно, что при увеличении количества сотрудников среднее время выполнения БП уменьшается, при уменьшении интервала между поступлениями заявок среднее время изменяется несущественно.

Для этой зависимости также выполнена квадратичная аппроксимация (рис. 4).

Если график поля рассеяния дает общую картину зависимости среднего времени реализации БП, то квадратичная аппроксимация позволяет для каждой пары значений интервала поступления T_{in} и количества сотрудников N определить среднее время выполнения БП:

$$T_{ob} = -4805,5775 - 1290,7514 \cdot N + 2713,5089 \cdot T_{in} + 24,5305 \cdot N \cdot N + 70,3805 \cdot N \cdot T_{in} - 187,832 \cdot T_{in} \cdot T_{in}.$$

Для визуализации зависимости средней очереди заявок на выполнение БП N_{ob} построен контурный график (рис. 5).

Контурный график аналогично квадратичной аппроксимации служит для более точного расчета значений исследуемой функции. Так, на рисунке графически приведены значения средней очереди БП, готовых к выполнению. Получить численное значение для каждой пары можно также на основе подстановки соответствующих значений числа сотрудников и среднего интервала в формулу квадра-

тичной аппроксимации:

$$N_{ob} = -343,1708 - 141,4306 \cdot N + 259,7983 \cdot T_{in} + 2,5753 \cdot N \cdot N + 8,0078 \cdot N \cdot T_{in} - 18,8649 \cdot T_{in} \cdot T_{in}.$$

Из графика можно заметить, что средняя очередь практически не меняется в интервале от 11 до 15 сотрудников. Таким образом, на основе результатов моделирования можно принять обоснованное решение о количестве сотрудников, необходимых для сопровождения определенной группы БП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Стоит отметить, что особое значение на всех уровнях управления имеют организационные структуры, а эффективность их функционирования определяется выбранными типами, принципами и методами их формирования. Существует значительное количество принципов формирования организационных структур, многообразие которых связано с вариативностью их содержания [12–16]. Организационная структура управления инжиниринговой компании должна быть ориентирована на цели и задачи ее функционирования и учитывать комплексный характер инжиниринга в строительстве, объединяющий организационно-управленческий инжиниринг и технико-технологический инжиниринг, и соответствовать ключевым принципам формирования организационных структур.

С ростом размера инжиниринговой компании и усложнения стоящих перед ней задач необходимость моделирования все более возрастает, так как на основе результатов моделирования можно принять обоснованное решение о количестве сотрудников, необходимых для сопровождения определенной группы БП [17–21].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Dijkman R.M., Adan I., Peters S.* Advanced queueing models for quantitative business process analysis // 2018 44th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA). 2018. Pp. 260–267. DOI: 10.1109/seaa.2018.00050
2. *Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H.A.* Fundamentals of business process management. Second ed. Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-56509-4
3. *Grefen P., Brouns N., Ludwig H., Serral E.* Co-location specification for IoT-aware collaborative business processes // Lecture Notes in Business Information Processing. 2019. Pp. 120–132. DOI: 10.1007/978-3-030-21297-1_11
4. *Абрамс Р.* Бизнес-план на 100 %: Стратегия и тактика эффективного бизнеса. М. : Альпина Паблишер, 2019. 496 с.
5. *Остервальдер А., Ив Пинье.* Построение бизнес-моделей. Настольная книга стратега и новатора / пер. с англ. М. Кульневой. М. : Альпина Паблишер, 2019. 288 с.
6. *Баринов В.А.* Организационное проектирование. М. : ИНФРА-М, 2019. 384 с.
7. *Дафт Р., Мерфи Дж., Уилмотт Х.* Организационная теория и дизайн. СПб. : Питер, 2013. 640 с.
8. *Силка Д.Н., Ермолаев Е.Е., Дуров Р.А., Копельчук С.Ю.* Инжиниринг инвестиционно-строительных проектов промышленного назначения. М. : Стройинформиздат, 2014. 256 с. EDN UBROWN.
9. *Michelfelder D.P., Doorn N.* The routledge handbook of the philosophy of engineering. Routledge, 2020. DOI: 10.4324/9781315276502
10. *Шинкарева Г.Н.* Модель инжиниринговой схемы организации строительства в перспективе жизненного цикла объектов // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 9 (120). С. 1090–1105. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1090-1105. EDN VKFFPI.
11. *Cagno E., Neri A., Negri M., Bassani C.A., Lampertico T.* The role of digital technologies in operationalizing the circular economy transition : a systematic literature review // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 8. P. 3328. DOI: 10.3390/app11083328
12. *Орлов А.К., Белякова А.П.* Основы бизнес-инжиниринга в инвестиционно-строительной сфере. М. : Изд-во МГСУ, 2016. 70 с. EDN YSFWWX.
13. *Гассман О., Франкенбергер К., Шик М.* Бизнес-модели: 55 лучших шаблонов. М. : Альпина Паблишер, 2019. 432 с.
14. *Munsamy M., Telukdarie A., Fresner J.* Business process centric energy modeling // Business Process Management Journal. 2019. Vol. 25. Issue 7. Pp. 1867–1890. DOI: 10.1108/BPMJ-08-2018-0217
15. *Лapidус А.А., Мура В.А.* Комплексный показатель качества организационно-технологических решений при возведении конструктивных элементов железобетонных зданий // Строительное производство. 2020. № 2. С. 3–9. DOI: 10.54950/26585340_2020_2_3. EDN QMAVHQ.
16. *Лapidус А.А.* Инструмент оперативного управления производством — интегральный потенциал эффективности организационно-технологических и управленческих решений строительного объекта // Вестник МГСУ. 2015. № 1. С. 97–102.
17. *Awan U., Sroufe R., Shahbaz M.* Industry 4.0 and the circular economy : a literature review and recommendations for future research // Business Strategy and the Environment. 2021. Vol. 30. Issue 4. Pp. 2038–2060. DOI: 10.1002/bse.2731
18. *Martin N., Depaire B., Caris A.* The use of process mining in business process simulation model construction // Business & Information Systems Engineering. 2016. Vol. 58. Issue 1. Pp. 73–87. DOI: 10.1007/s12599-015-0410-4
19. *Rosado-Serrano A., Paul J., Dikova D.* International franchising : a literature review and research agenda // Journal of Business Research. 2018. Vol. 85. Pp. 238–257. DOI: 10.1016/j.jbusres.2017.12.049
20. *Peters S., Dijkman R., Grefen P.* Quantitative effects of advanced resource constructs in business process simulation // 2018 IEEE 22nd International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC). 2018. Pp. 115–122. DOI: 10.1109/edoc.2018.00024
21. *Grefen P., Brouns N., Ludwig H., Serral E.* Co-location specification for IoT-aware collaborative business processes // Lecture Notes in Business Information Processing. 2019. Pp. 120–132. DOI: 10.1007/978-3-030-21297-1_11

Поступила в редакцию 11 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 23 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Иванович Пасканний** — старший преподаватель кафедры технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0009-0007-7358-1757; paskanny@mail.ru;

Азарий Абрамович Лapidус — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный**

ный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; lapidus58@mail.ru.

Вклад авторов:

Пасканый В.И. — анализ функциональной взаимосвязи основных бизнес-процессов инжиниринговой компании, создание модели на языке GPSS, написание программы, получение и обработка результатов моделирования.

Лapidус А.А. — научное руководство, обоснование необходимости моделирования на основе сетей массового обслуживания, редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Dijkman R.M., Adan I., Peters S. Advanced queueing models for quantitative business process analysis. *2018 44th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA)*. 2018; 260-267. DOI: 10.1109/seaa.2018.00050
2. Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H.A. *Fundamentals of Business Process Management*. Second Ed. Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-56509-4
3. Grefen P., Brouns N., Ludwig H., Serral E. Co-location specification for IoT-aware collaborative business processes. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2019; 120-132. DOI: 10.1007/978-3-030-21297-1_11
4. Abrams R. *100 % business plan: Strategy and tactics of effective business*. Moscow, Alpina Publisher Publ., 2019; 496. (rus.).
5. Osterwalder A., Yves Pigneur. *Building business models*. The Strategist and Innovator's Handbook. Moscow, Alpina Publisher, 2019; 288. (rus.).
6. Barinov V.A. *Organizational design*. Moscow, INFRA-M Publ., 2019; 384. (rus.).
7. Daft R., Murphy J., Wilmott H. *Organizational theory and design*. St. Petersburg, Piter Publ., 2013; 640. (rus.).
8. Silka D.N., Ermolaev E.E., Durov R.A., Kopelchuk S.Yu. *Engineering of industrial investment and construction projects*. Moscow, Stroyinformizdat Publ., 2014; 256. (rus.).
9. Michelfelder D.P., Doorn N. *The Routledge Handbook of the Philosophy of Engineering*. Routledge, 2020. DOI: 10.4324/9781315276502
10. Shinkareva G.N. Model engineering scheme of the organization of construction in the future the life cycle of objects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(9):1090-1105. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1090-1105. EDN VKFFPI. (rus.).
11. Cagno E., Neri A., Negri M., Bassani C.A., Lampertico T. The role of digital technologies in operationalizing the circular economy transition: a systematic literature review. *Applied Sciences*. 2021; 11(8):3328. DOI: 10.3390/app11083328
12. Orlov A.K., Belyakova A.P. *Fundamentals of business engineering in the investment and construction sector*. Moscow, Publishing house MGSU, 2016; 70. EDN YSFWWX. (rus.).
13. Gassman O., Frankenberger K., Schick M. *Business models: 55 best templates*. Moscow, Alpina Publisher, 2019; 432. (rus.).
14. Munsamy M., Telukdarie A., Fresner J. Business process centric energy modelling. *Business Process Management Journal*. 2019; 25(7):1867-1890. DOI: 10.1108/BPMJ-08-2018-0217
15. Lapidus A.A., Muria V.A. Comprehensive indicator of quality of organizational-technological decisions in the construction of construction elements of reinforced concrete buildings. *Construction Production*. 2020; 2:3-9. DOI: 10.54950/26585340_2020_2_3. EDN QMABHQ. (rus.).
16. Lapidus A.A. Tools of production scheduling — an integral efficiency potential of organizational, technological and management solutions of a construction object. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 1:97-102. (rus.).
17. Awan U., Sroufe R., Shahbaz M. Industry 4.0 and the circular economy : a literature review and recommendations for future research. *Business Strategy and the Environment*. 2021; 30(4):2038-2060. DOI: 10.1002/bse.2731
18. Martin N., Depaire B., Caris A. The use of process mining in business process simulation model construction. *Business & Information Systems Engineering*. 2016; 58(1):73-87. DOI: 10.1007/s12599-015-0410-4
19. Rosado-Serrano A., Paul J., Dikova D. International franchising : a literature review and research agenda. *Journal of Business Research*. 2018; 85:238-257. DOI: 10.1016/j.jbusres.2017.12.049
20. Peters S., Dijkman R., Grefen P. Quantitative effects of advanced resource constructs in business process simulation. *2018 IEEE 22nd International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC)*. 2018; 115-122. DOI: 10.1109/edoc.2018.00024
21. Grefen P., Brouns N., Ludwig H., Serral E. Co-location specification for IoT-aware collaborative business processes. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2019; 120-132. DOI: 10.1007/978-3-030-21297-1_11

Received December 11, 2023.

Adopted in revised form on September 23, 2024.

Approved for publication on September 24, 2024.

BIONOTES: **Vladimir I. Paskanny** — senior lecturer of the Department of Technologies and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0007-7358-1757; paskanny@mail.ru;

Azariy A. Lapidus — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technologies and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; lapidus58@mail.ru.

Contribution of the authors:

Vladimir I. Paskanny — analysis of the functional relationship of the main business processes of an engineering company, creation of a model in the GPSS language, writing a program, obtaining and processing modeling results.

Azariy A. Lapidus — scientific guidance, justification of the need for modeling based on queuing networks, text editing.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 504.06:504.61:69.003

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1797-1823

Метод оценки риска для организации экологической безопасности в сфере жилищного и промышленного строительства

Аркадий Николаевич Ларионов¹, Елена Эдуардовна Смирнова²

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

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен метод оценки риска с целью обоснования экологической безопасности строительства. Разработка данной темы продиктована необходимостью устойчивого развития строительного сектора, предотвращения загрязнения окружающей среды и повышения качества жизни населения. Несмотря на то, что правовой системой накоплен достаточный объем документов, регламентирующих цели и задачи предотвращения негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду, а также повышения экологической эффективности компаний, методы оценки экологического риска (ЭР) в строительстве развиты слабо.

Материалы и методы. Изучены подходы к оценке ЭР в условиях неопределенности. Перед авторами стояла задача найти оптимальное распределение ресурсов, направленных на снижение вероятности возникновения ЭР, и средств на предотвращение возможного ущерба окружающей среде, а также проанализировать и сопоставить методы определения величины риска при проектировании и строительстве объектов. Основная цель — провести исследование по формированию законченного алгоритма и методики использования сценариев риска по обеспечению экологической безопасности строительства. Объект исследования — риск-ориентированные подходы для обеспечения экологической безопасности строительных проектов. Предмет исследования — применение методов оценки риска в области экологической безопасности. Предлагается концепция необходимости использования методов для снижения ЭР строительных проектов.

Результаты. Разработан новый метод, соединивший в себе количественную оценку ЭР, основанную на теории вероятностей, полуквантитативный подход с использованием матриц рисков, и качественный — на основе оценки вероятности наступления и размера ущерба для каждого сценария. Разработанный метод оценки ЭР позволяет повысить эффективность управления экологической безопасностью в сфере строительства.

Выводы. Подчеркивается значимость сценарного подхода как одного из наиболее эффективных методов оценки ЭР, который позволяет учесть возможные варианты развития событий и оценить их последствия. Необходимо разработать более точное определение ЭР в строительстве при формулировании экологических мероприятий и оценке соответствия их выполнения (возможна разработка аналога японской системы экологической оценки строительства CASBEE).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: методы оценки экологического риска, оценка риска, строительство, экологическая безопасность, экологический риск, экологические требования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ларионов А.Н., Смирнова Е.Э. Метод оценки риска для организации экологической безопасности в сфере жилищного и промышленного строительства // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1797–1823. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1797-1823

Автор, ответственный за переписку: Аркадий Николаевич Ларионов, prof.larionov@mail.ru.

Risk assessment method for the organization of environmental safety in the sphere of residential and industrial construction

Arkadiy N. Larionov¹, Elena E. Smirnova²

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

² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The risk assessment method for the justification of environmental safety in construction is considered. The development of this topic is dictated by the need for sustainable development of the construction sector, prevention of en-

environmental pollution, and improvement of the quality of life of the population. Despite the fact that the legal system has accumulated a sufficient volume of documents regulating the goals and objectives of preventing the negative impact of economic activity on the environment, as well as increasing the environmental efficiency of companies, methods for assessing environmental risk in construction are poorly developed.

Materials and methods. The authors studied approaches for environmental risk assessment under conditions of uncertainty. The authors faced the task to find the optimal distribution of funds aimed at reducing the probability of occurrence of environmental risk, and funds for preventing possible environmental damage, as well as to analyze and compare methods for determining the amount of risk during the design and construction of facilities. The main goal was to conduct research on the formation of a complete algorithm and methodology for using risk scenarios to ensure environmental safety in construction. The object of the study was risk-oriented approaches to ensuring the environmental safety of construction projects. The subject was the application of risk assessment methods in the field of environmental safety. The concept of the need to use methods for reducing the environmental risk of construction projects is proposed.

Results. A new method is developed that combines quantitative assessment of environmental risk based on probability theory, semi-quantitative approach with risk matrices, and qualitative assessment based on the assessment of the probability of occurrence and the size of damage for each scenario. The developed method for assessing environmental risk can improve the efficiency of environmental safety management in the construction industry.

Conclusions. The significance of the scenario approach as one of the most effective methods for assessing environmental risk is emphasized, which allows taking into account possible scenarios of events and assess their consequences. It is necessary to develop a more accurate definition of environmental risk in construction when formulating environmental measures and assessing their compliance (it is possible to improve an analogue of the Japanese CASBEE ecological assessment system in construction).

KEYWORDS: methods for assessing environmental risk, risk assessment, construction, environmental safety, environmental risk, environmental requirements

FOR CITATION: Larionov A.N., Smirnova E.E. Risk assessment method for the organization of environmental safety in the sphere of residential and industrial construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1797-1823. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1797-1823 (rus.).

Corresponding author: Arkadiy N. Larionov, proflarionov@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Экологическая безопасность жилищного и промышленного строительства является одной из важнейших задач устойчивого развития страны. Неконтролируемое воздействие строительства на окружающую среду приводит к ее загрязнению, истощению природных ресурсов, а также снижению качества жизни населения. Ежегодно на строительные работы приходится около 27 % всех выбросов, а на углерод, содержащийся в четырех строительных материалах — цементе, железе, стали и алюминии, — еще 15 %. В сумме — около 42 % ежегодных глобальных выбросов CO₂¹. Ожидается, что в период до 2030 г. воплощенный углерод будет отвечать за большую часть выбросов углекислого газа, связанных с глобальными новыми зданиями и инфраструктурой [1].

К наиболее распространенным видам негативного воздействия строительства на окружающую среду относятся:

- загрязнение атмосферного воздуха выбросами от строительной техники и оборудования. Концентрации мелких твердых частиц PM_{2,5} опасны для сердечно-легочной системы человека. Элементарный углерод (ЕС), как один из компонентов их состава, служит следствием бесконтрольных выбросов дизельных двигателей. Повышенные концентрации органического углерода обусловлены отсутствием эффективных правил по выбросам летучих органических соединений (ЛОС) для стационарных источ-

ников и сокращению выбросов ЛОС транспортными средствами и строительной техникой [2]. Строительная техника и оборудование производят более 60 % выбросов загрязняющих веществ (ЗВ); на горение топлива на строительных площадках приходится около 20 %; на сжигание строительного мусора — около 10 %. Из-за отсутствия модернизации старых генераторов и обновления экскаваторного парка на строительный сектор приходится 34 % общих выбросов мелких частиц PM₁₀ [3]. Основные ЗВ, выбрасываемые в атмосферный воздух от строительной деятельности, — оксиды азота (NO_x); оксиды углерода (CO_x); сернистый ангидрид (SO₂); пыль; бенз(а)пирен (B(a)P). Выбросы оксидов азота и оксидов углерода приводят к ухудшению здоровья людей, страдающих сердечно-сосудистыми и бронхолегочными заболеваниями, пыль вызывает респираторные заболевания, бенз(а)пирен — онкологические;

- загрязнение поверхностных и грунтовых вод строительными отходами. В 2017–2020 гг. за экологическими компенсациями обратились 110 компаний, что составило чуть более десятой доли процента от числа «стрессоров» загрязнения, имевших право обратиться за этой льготой. Анализ Счетной палаты в 2021 г. показал, что из 180 тыс. компаний, плативших за негативное воздействие на экосистемы, лишь 226 достигли нулевого коэффициента за объем и массу ЗВ в результате внедрения наилучших доступных технологий на объектах. В 2023 г., по данным Реестра ОНВОС (объекты негативного воздействия на окружающую среду) Росприроднадзора, 10 компаний с самым большим количеством объектов первой категории опасности оказывали негативное воздей-

¹ Total annual global CO₂ emissions direct & indirect energy & process emissions (36.3 GT) // Architecture 2030. URL: <https://www.architecture2030.org/why-the-built-environment>

ствие на окружающую среду: АО «Самарнефтегаз», ООО «РИТЭК», ПАО «Сургутнефтегаз», ПАО «НК Русснефть», ООО «Лукойл-Коми», ООО «ННК – Самарнефтегаз», ООО «Газпром Добыча Краснодар», АО «Белкамнефть», АО «Томскнефть ВЛК», АО «Газпромнефть-ННГ»²;

- загрязнение почв отходами строительства. В России в 2021 г. образовано 96,3 млн т отходов строительства и сноса зданий. По данным Минприроды, ежегодно в России на переработку отправляется лишь менее четверти объема образованных строительных отходов. Наибольший объем отходов строительства и сноса зданий образовался в 2021 г. по категории «Отходы подготовки строительного участка, разборки и сноса зданий». На втором месте — «Отходы строительства зданий, сооружений». Тенденция к росту отходов и трудноустраняемых потерь материалов только сохранится [4];

- разрушение естественных ландшафтов и сокращение биоразнообразия. В 2022 г. в результате строительства и эксплуатации предприятий были нарушены сотни тысяч гектаров естественных ландшафтов. Даже в таких отдаленных северных территориях России, как Таймыр, сформировались природно-техногенные геохимические аномалии с высоким содержанием Ni, Cu, Cr, Co в почвах. От негативного воздействия концерна «Норникель» (Талнахский на Таймыре и забайкальский Озерный горно-обогатительные комбинаты) обнаружены арсенидные геохимические аномалии с высоким валовым содержанием мышьяка в почвах. Выбросы серы норильского гиганта достигают Канады. На «Норникель» производится около 10 % от всех выбросов ЗВ в России. В 2021 г. компания произвела 18,5 млн т отходов, в том числе 11,5 млн т твердых и 5,5 млн т жидких отходов. По данным Росприроднадзора, в 2021 г. «Норникель» сбросил в реки и озера Забайкальского края 1,3 млрд м³ загрязненных сточных вод³. Еще раньше в 2020 г. в Норильске произошла крупнейшая техногенная авария на Севере, в результате которой в р. Амбарную и о. Пясино (уже давно ставшие местом промышленных стоков), и далее в Карское море попали более 21 тыс. т дизельного топлива [5]. Основными ЗВ, которые корпорация сбрасывает в воду, являются тяжелые металлы, кислоты,

щелочи и другие загрязняющие вещества. Норильск был признан самым грязным городом в Арктике [6]. На депрессивных территориях «Норникеля» наблюдается длительное снижение показателей качества окружающей среды [7].

Для предотвращения негативного воздействия строительства на окружающую среду необходимо разрабатывать и внедрять эффективные методы оценки экологического риска (ЭР). Оценка ЭР позволяет определить вероятность возникновения негативного воздействия строительства на окружающую среду и его возможные последствия, а затем принять обоснованные решения о выборе строительных технологий, материалов и методов эксплуатации зданий и сооружений.

В настоящее время в России накоплен достаточный объем нормативно-правовой базы, регламентирующей цели и задачи предотвращения негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду, а также повышения экологической эффективности компаний. Однако методы по оценке ЭР в строительстве развиты слабо.

Экологический риск — это вероятность отрицательных изменений или отдаленных неблагоприятных их последствий, возникших вследствие негативного воздействия на окружающую среду. Поскольку объект воздействия — многообразная природная среда и ее отдельные сложные компоненты, прогнозирование отрицательных последствий и оценка их масштабов весьма затруднены. Тем не менее эколого-ориентированный подход рассматривается как императив любой строительной деятельности. Региональный строительный комплекс в современных условиях должен формироваться не на стремлении получить ограниченные преимущества и выгоды хозяйствующими субъектами, но на долговременных принципах устойчивого развития и строительства ради качества жизни. Перспективы современного строительного комплекса зависят исключительно от экологического императива. «Зеленое» строительство как результат обеспечения экологической безопасности строительной деятельности на всех этапах жизненного цикла объекта снижает углеродный след и тем самым негативное воздействие на окружающую среду, способствуя здоровью и работоспособности населения [8].

Специалисты различают следующие виды ЭР, связанных со строительной деятельностью: природно-экологический, технико-экологический, риск устойчивых техногенных воздействий, риск катастрофических воздействий, социально-экологический, эколого-нормативный, эколого-политический, экономико-экологический [9]. Как видно, ЭР связаны с широким спектром потенциальных потерь, допустимых в различных сферах деятельности. Особенно опасны ЭР с отложенными последствиями, своего рода локальные экологические сдвиги, которые проявляются не сразу, а через некоторое время. Они также имеют глобальные последствия, затрагивающие

² В начале года власти скрыли статистику выбросов вредных веществ от промышленных объектов по всей стране. Нам удалось достать эти данные. Рассказываем, кто отвечает за грязный воздух в России. 25 августа 2023 // Если быть точным. URL: <https://tochno.st/materials/v-nachale-goda-vlasti-skryli-statistiku-vrednykh-vybrosov-ot-promyshlennykh-obektov-po-vsey-strane-nam-udalos-dostat-eti-dannye-rasskazyvaem-kto-otvechaet-za-gryaznyy-vozdukh-v-rossii?ysclid=lq6mхрmfz4975415570> (дата обращения: 16.12.2023).

³ Росприроднадзор. Отчет Росприроднадзора о состоянии окружающей среды в Российской Федерации в 2022 году. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2022/

не только локальную территорию, но и целые регионы. По мнению Е.В. Шубиной и др. (2009), на этапе эксплуатации с точки зрения экологической безопасности важно производить расчет устойчивости функционирования строительного объекта определенного назначения в условиях природно-техногенных систем. Оценка ЭР на этапе эксплуатации объекта должна включать технологический аспект функционирования воздействующих на окружающую среду систем этого здания. Использование методов оценки риска носит прогностический эффект, позволяет учитывать эффект потенцирования воздействий на окружающую среду, динамику изменения экологических факторов, способность строительных систем к самоподдержанию и саморегулированию.

Экологический риск часто сопоставляют с экономическим. Причиненный предприятием вред окружающей среде не приемлем с нормативной точки зрения. Предприятие-нарушитель должно поступиться полученным доходом и подвергнуться экономическим санкциям или штрафам. Этот отрицательный смысл (опасность недополучения прибыли) приписывается ЭР. Как полагают некоторые авторы, его контекст ограничен экологическим менеджментом в процессе идентификации рисков на предприятии [10]. Важно отметить, что ЭР недостаточно рассматривать только в контексте экономических потерь. Загрязнение окружающей среды может привести к более серьезным последствиям, таким как ухудшение здоровья населения, снижение биоразнообразия и изменение климата.

При оценке ЭР необходимо учитывать ряд особенностей его проявления: характер объекта воздействия (природные ресурсы, экосистемы, здоровье человека и т.д.); характер воздействия (загрязнение, истощение, разрушение и т.д.); масштаб воздействия (локальный, региональный, глобальный); степень вероятности воздействия (высокая, средняя, низкая); степень тяжести последствий воздействия (высокая, средняя, низкая). Следует отметить, что понятие ЭР далеко выходит за рамки простого нанесения ущерба окружающей среде и здоровью населения. Если нарушена экологическая безопасность в любой сфере хозяйственной деятельности, включая строительную, то тем самым поставлены под вопрос условия существования всего живого. Важно учитывать фундаментальную значимость второго биогеохимического закона В.И. Вернадского [11]. Требуется непосредственное или опосредованное участие живых организмов для того, чтобы произошел обмен химических элементов в биосфере; иначе говоря, их земная миграция в целом происходит при помощи «живого вещества». Видовое многообразие живого не просто исчезает. Под воздействием строительных технологий трансформируется и повреждается его структура. Д. Мидоуз и др. (2006), авторы компьютерного моделирования экспоненциального роста экономики и населения при ограниченности ресур-

сов, подчеркивают, что без существенных изменений в потреблении природных ресурсов в ближайшем будущем неизбежно произойдут катастрофические изменения. Реакцией экосистем на нерациональное природопользование и антропогенное давление стало отсутствие экологического резерва для равновесного и устойчивого развития [12].

Таким образом, хотя экологический риск и экономический взаимосвязаны (загрязнение окружающей среды чревато экономическими потерями, а также другими негативными последствиями, такими как ухудшение здоровья населения, снижение качества жизни и т.д.), тем не менее по сравнению с экономико-финансовым риском экологический затрагивает ценность человеческой жизни совершенно по-другому, как бы предупреждая: если потери окружающей среды приобретут необратимый и негативный характер, то этот сдвиг экологического равновесия грозит повсеместной угрозой существованию человечества как вида [13]. Вопрос не стоит об идеальном равновесном состоянии, но о том, сможет ли природа после возможного монотонного или скачкообразного нарушения экосистемного баланса вернуться на исходный уровень безопасности. Первостепенную важность приобретает учет оставшегося экологического резерва ради устойчивого развития.

В последние годы в России и за рубежом опубликован ряд работ, посвященных вопросам оценки ЭР в сфере жилищного и промышленного строительства. В этих работах исследуются различные методы оценки ЭР [14–17].

К количественным методам оценки ЭР относятся методы, основанные на использовании математических моделей для расчета вероятности возникновения негативного воздействия и его возможных последствий. К полуколичественным — методы, основанные на использовании экспертных оценок для определения вероятности возникновения негативного воздействия и его возможных последствий. К качественным — методы, базирующиеся на описании возможных сценариев негативного воздействия и его последствий (анализ «дерева событий», анализ вида и последствий отказа, анализ опасности и работоспособности и др.).

В большинстве работ, посвященных оценке ЭР в строительстве, рассматриваются методы количественной оценки риска [18, 19]. Однако последние требуют значительных затрат времени и ресурсов, а также наличия достоверной исходной информации. В связи с этим в последние годы наблюдается тенденция к развитию полуколичественных и качественных методов оценки ЭР [20–22].

Риск неотделим от неопределенности. Суть технического прогресса связана с переходом к среде с меньшим значением неопределенности. Свести ее к минимуму, нивелировать воздействие неопределенности на природно-техническую систему и преодолеть ее — такова цель управленческого контроля. Отсюда риском

называется деятельность, осуществляемая под знаком неопределенности и альтернативности с целью выбрать оптимальный вариант действий и сопряженная с вероятностью наименьшего ущерба. Уметь избегать неоправданного риска — таков идеал лица, ответственного за принятие решения. Для него правомерная величина риска при достижении цели заключается в том, что уровень потерь не превышал достигнутый результат [23].

Однако величина риска, будучи связана с ожидаемым ущербом и вероятностью того, что ущерб на самом деле будет иметь место, не может быть каждый раз правомерной: момент стохастичности отметить нельзя. Если критерии рискованного решения будут основаны на достижении поставленной задачи, отличаться непротиворечивостью нормативным актам, следовать современным научно-техническим требованиям, направлены на борьбу с риском потерь и рисковыми последствиями, то такого рода стремление не проиграть превратит риск в спускаемые сверху директивы. Произойдет фактическая девальвация риска. В последнем случае не может быть и речи о результативности и конкурентоспособности в строительстве.

Очевидно, что в ситуации риска на первый план выходит корреляция вероятных потерь и значимости конечного результата и выигрыша. Обычные оперативные природоохранные мероприятия, прописанные в российских стандартах, не могут привести к снижению производственных затрат и выходу компаний на международный уровень экономии средств и ресурсов. Бессмысленно считать риск приемлемым, если не принять во внимание его сочетание с сопутствующими затратами и выгодами [24]. Процедурой измерения неопределенности, или вычислением приемлемого риска, предполагается именно сценарный подход. Предлагаемое исследование посвящено разработке и применению методов количественной и полуколичественной оценки ЭР в сфере жилищного и промышленного строительства. Перед авторами стояла задача найти оптимальное распределение средств, направленных на снижение вероятности возникновения ЭР, и средств на предотвращение возможного ущерба окружающей среде, а также проанализировать и сопоставить методы определения величины риска при проектировании и строительстве объектов. Основная цель — провести исследование по формированию законченного алгоритма и методики использования сценариев риска по обеспечению экологической безопасности строительства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка риска рассматривается как комплексная задача, включающая несколько этапов. На первом этапе применяются количественный подход. Авторы обращаются к исследованию модели риска как сочетания изучаемого фактора опасности и последствий от причиненного ущерба. Важно выявить все

возможные опасности, связанные с деятельностью строительной организации. Дилемма по снижению вероятности возникновения опасного события состоит в следующем: 1) либо сосредоточить внимание на риске в виде затрат на систему технической безопасности, и тогда вероятность аварии будет близка к нулю; 2) либо направить средства на предотвращение ожидаемого ущерба (страхование, создание SPV и т.д.), и тогда вероятность аварии, наоборот, будет стремиться к единице.

Чтобы разрешить проблему, предварительно были проанализированы понятия и методы, представленные в стандартах по оценке риска. Найденный в них алгоритм имеет вид: идентификация опасностей (выявление и описание опасностей, связанных с деятельностью компании); оценка рисков (определение величины риска, связанного с каждой опасностью); оценка приемлемости риска (определение того, является ли риск допустимым или нет); управление рисками (принятие мер по снижению рисков до приемлемого уровня). Данный алгоритм позволяет количественно определять риск и причиненный ущерб. Однако при строительстве необходимо учитывать многомерный характер воздействия на компоненты окружающей среды [25]. Концептуальный подход к безопасности, прописанный в ряде стандартов (например, ГОСТ Р 14.09–2005), излишне абстрактен, для того чтобы рационально оценить ЭР, в некоторых случаях несопоставимые линейно. В результате остается непонятным, какой риск считается допустимым.

На этапах оценки риска (величины риска, связанного с каждой опасностью) возникает необходимость в анализе неопределенности и ее последствий. Типизация неопределенности помогает принимать более обоснованные решения в условиях риска, оценивать вероятность возникновения негативных событий в строительстве. Неопределенность является ключевым условием для понимания риска. К анализу был привлечен ряд других стандартов по оценке риска (например, ГОСТ Р ИСО 14001–2016). В них риск рассматривается как влияние неопределенности, влияние выражается в отклонении от ожидаемого результата, а значит, к непредвиденным обстоятельствам. В рамках данного контекста можно количественно рассчитать оптимальное распределение средств. Авторы используют формулу минимизации рисков с контролируемыми параметрами для дальнейшего стохастического моделирования процессов и создают на ее основе специфическую методологию оценки ЭР строительных проектов. Далее алгоритм расчета минимальных значений риска выполнялся с помощью метода Монте-Карло. Данная процедура позволяет понять, что вероятность аварии уменьшается экспоненциально с увеличением значения случайной величины, а ожидаемый ущерб от аварии уменьшается линейно с ее увеличением.

На втором этапе оценка риска проводится с учетом главных аспектов негативного воздействия строительной организации на окружающую среду [26]. Для учета нелинейности риска применяется полукочественный подход, техника которого также разработана в официальных документах по оценке риска. Задача авторов заключалась в том, чтобы показать преимущества определения риска как сочетания вероятности и тяжести события для характеристики экологического вмешательства. Полукочественный подход, как более востребованный среди аналитиков, облегчает задачу разработки соответствующих мероприятий по обеспечению снижения рисков на соответствие требованиям стандартов до приемлемого уровня.

На третьем этапе оценки риска рассматривается сценарный подход как наиболее достоверный в определении того, является ли ЭР риск допустимым или нет. Для каждого сценария идентифицируется его описание si , вероятность его наступления pi и последствия, которые могут быть причинены в случае его реализации xi . Вместе с тем он позволяет оценивать риски и в количественном выражении, что упрощает их сопоставление и принятие решений по управлению рисками. Метод дает возможность определить вероятностный диапазон изменений явления при наиболее неудачных или наиболее успешных изменениях внутренних или внешних параметров. Таким образом, основная идея данного исследования состоит в том, чтобы дополнить применение вышеупомянутых методов сценарным подходом, а также изучить проблему предупреждения ЭР в сфере жилищного и промышленного строительства и принятия решений в условиях неопределенности, связанной с этими событиями.

Для формирования законченного алгоритма, связанного с управлением рисками с помощью сценарного подхода, авторы использовали методы нивелирования опасности, снижения частоты возникновения опасности, увеличения времени до наступления опасности, снижения тяжести последствий опасности, уменьшения времени до наступления последствий опасности, уменьшения вероятности наступления последствий опасности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Количественный подход

Экологическое законодательство (например, Федеральный закон от 10.01.2022 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды») обязывает принимать обоснованные решения, связанные с осуществлением хозяйственной и иной деятельности путем устранения возможных негативных воздействий, экологических последствий, разработкой мер по сокращению и предотвращению стихийных бедствий и чрезвычайных ситуаций. В ГОСТ Р 58771–2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» указано, что на этапах оценки риска возникает не-

обходимость в анализе неопределенности и ее последствий. В документе представлены виды неопределенности, поскольку она является неотъемлемой частью строительной практики. В любой ситуации есть вероятность возникновения событий, которые могут повлиять на планы и цели строительства. Неопределенность может иметь как положительные, так и отрицательные последствия. С одной стороны, она может создавать новые возможности и стимулировать инновации. С другой стороны, она может привести к финансовым потерям, травмам или даже гибели людей. Неопределенность может быть сложной и трудной для понимания. Часто невозможно точно предсказать события будущего. Таким образом, понимание неопределенности позволяет принимать более обоснованные решения в условиях риска, оценивать вероятность возникновения негативных событий и их возможные последствия, разрабатывать меры по снижению рисков и повышению устойчивости к непредвиденным обстоятельствам.

Неопределенность — ключевое условие для понимания риска. Уменьшение неопределенности приводит к снижению риска. Например, если предприятие, строящее новый объект в районе, подверженном землетрясениям, проведет исследование сейсмической активности в этом районе, это позволит снизить неопределенность относительно вероятности землетрясения и, соответственно, снизить риск. Очевидно, что вероятность не охватывает все аспекты проблемы экологической безопасности.

В ГОСТ Р 51897–2002 «Менеджмент риска. Термины и определения», анализирующем термины и понятия менеджмента риска, под «риском» понимается сочетание (т.е. произведение) вероятности P события A и его последствий S . Термин «риск» проводится, когда существует возможность негативных последствий (результатов события A). Под «вероятностью» в контексте ЭР понимается мера того, что неблагоприятное событие, связанное с окружающей средой, может произойти. Например, при рассмотрении вероятности загрязнения подземных вод в результате утечки химических веществ с промышленного предприятия вероятность P утечки химических веществ в течение года и вероятность отсутствия утечки $Q = 1 - P(A)$ являются характеристиками вероятности появления экологической проблемы в определенный период. Если, согласно данным анализа рисков, вероятность P утечки в течение года составляет 0,05 (5 %), то вероятность того, что утечки не произойдет в течение следующих пяти лет, составит:

$$P(A) = Q^5 = 0,95^5 = 0,77 \%. \quad (1)$$

Следовательно, вероятность того, что утечка произойдет хотя бы раз в течение пяти лет:

$$P(A) = 1 - Q^5 = 1 - 0,77 = 0,23 \%. \quad (2)$$

Этот вывод может быть проверен статистически. В нашем примере вероятность возникновения

хотя бы одной утечки химических веществ в течение пяти лет составила 23 %. Из этого следует, что вероятность $P(A)$, связанная с событием A , может быть оценена для данного интервала времени, т.е. в рамках специфического набора обстоятельств, при которых происходит явление. Важно понимать, что это упрощенная модель, демонстрирующая принципы оценки ЭР. В реальности, статистический анализ данных о прошлых утечках на аналогичных предприятиях, состоянии оборудования на конкретном объекте, эффективности применяемых мер безопасности и геологических факторах местности может подтвердить или скорректировать полученную вероятность. Иначе говоря, оценка риска всегда связана с определенными условиями и временными рамками. Изменение условий, например внедрение новых технологий безопасности, повышение квалификации персонала или изменение климата, существенно влияет на вероятность возникновения экологической проблемы.

Согласно ГОСТ Р 50779.10–2000 (ИСО 3534-1-93) «Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения», вероятность P есть действительное число в интервале от 0 до 1, относящееся к случайному событию A . Число может отражать относительную частоту в серии наблюдений или степень уверенности в том, что некоторое событие произойдет. Для высокой степени уверенности вероятность близка к единице.

Анализ риска. Анализ «риск есть сочетание...» включен в международные стандарты ISO 9000:2005 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» (обновленная версия ISO 9000:2015 и ее аналог ГОСТ Р ИСО 9000–2015) (пункт 3.4.5) и ISO 14001:2004 «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению» (обновленная версия ISO 14001:2015 и ее аналог ГОСТ Р ИСО 14001–2016) (пункт 3.20). В них подчеркивается, что применение статистических методов помогает измерять, описывать, анализировать, интерпретировать и моделировать изменчивость (случайность) событий даже при относительно ограниченном количестве данных, т.е. в условиях неопределенности. Статистический анализ таких данных может помочь лучше понять природу, масштаб и причины изменчивости, способствуя решению и даже предупреждению проблем, а также постоянному улучшению качества. Отсюда система экологического менеджмента должна учитывать риски в контексте неопределенности, а также возможности для оценки результатов деятельности и постоянного улучшения экологической безопасности [27].

Важные разъяснения относительно риска даны в обновленной версии ISO 14001:2015 (2021). В ней утверждается, что риск — это влияние неопределенности (uncertainty, U). Влияние выражается в отклонении от ожидаемого результата — позитивном или негативном. Акцент делается на том, что неопределенность — это состояние, связанное с недостат-

ком информации, понимания или знания о событии, его последствиях и вероятности, и характеризующееся разбросом значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Экспоненциальное распределение для оценки случайных независимых событий. Значительную часть экологических рисков составляют случайные события, т.е. события, время и место наступления которых заранее неизвестны. К таким событиям относятся, например, аварии на предприятиях химической промышленности, разливы нефти, лесные пожары, вызванные человеческим фактором. Для описания и прогнозирования таких событий в рамках оценки ЭР часто используется модель случайных событий. Один из наиболее распространенных подходов к описанию и оценке случайных событий — модель Пуассона. Она основана на следующих предположениях:

- независимость событий: каждое событие происходит независимо от других событий, иначе говоря, наступление одного события никак не влияет на вероятность наступления других событий;
- стационарность процесса: вероятность наступления события в определенный момент времени не зависит от того, что происходило до этого, т.е. интенсивность потока событий (среднее количество событий в единицу времени) остается постоянной.

Оптимальная формула зависит от конкретной ситуации. Если точность расчетов имеет первостепенное значение, рассчитать вероятность возникновения N негативных событий можно по формуле, которая является общим выражением для модели Пуассона и дает точный результат для любой величины N :

$$P(N, t) = \frac{(\lambda t)^N}{N!} \cdot \exp(-\lambda t), \quad (3)$$

где N — количество событий, которое мы хотим рассчитать, вероятность; t — рассматриваемый период времени; λ — интенсивность потока событий (событий за единицу времени); $N!$ — факториал N , который учитывает количество способов, при которых N событий могут произойти в течение времени t .

Используя рекурсивное отношение, запишем формулу в виде:

$$P(N, t) = \frac{(\lambda t)}{N} \cdot P(N-1, t) \quad (4)$$

при $n = 0, 1, 2 \dots; \lambda \cdot t > 0$,

где $P(N, t)$ — вероятность возникновения N негативных событий за период времени t ; t — рассматриваемый период времени; λ — интенсивность потока, т.е. количество негативных событий (N) за единицу времени (например, за год), в данном случае 1 событие за год; $P(N-1, t)$ — вероятность того, что за время t произойдет ровно $N-1$ событий.

Начальное условие: сначала с помощью экспоненциальной функции $\exp(-\lambda t)$ вычисляем вероятность $P(0, t)$ того, что за время t не произойдет ни одного

события. Рекурсивный шаг: после того, как вычислили $P(0, t)$, используем формулу (3) для вычисления вероятности $P(N, t)$ того, что за время t произойдет ровно N событий. Повторяем шаг 2, пока не вычислим вероятность $P(N, t)$ для всех необходимых значений.

Контекст и пример. Здесь следует пояснить контекст формулы (4). Негативное событие (N) — конкретное событие, которое оказывает отрицательное воздействие на окружающую среду и увеличивает экологический риск; n — случайная величина, которая принимает значения от 1 и выше. Предположим, необходимо оценить риск загрязнения водоема в результате строительства промышленного объекта. Негативным событием (N) выступает сброс неочищенных сточных вод, а случайной величиной (n) — количество сбросов неочищенных сточных вод за год. Проанализировав исторические данные о подобных авариях, определяем, что среднее количество сбросов неочищенных сточных вод в год λ составляет 1. Это достаточное условие, чтобы говорить о наличии экологического риска. Рассчитаем вероятность возникновения хотя бы одного сброса. Чем выше вероятность возникновения большого количества сбросов (n), тем выше ЭР. С помощью формулы (4) найдем вероятность возникновения N сбросов за год.

Начальное условие: $P(0, t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-1) \approx 0,3679$ (вероятность того, что за год не произойдет ни одного сброса неочищенных сточных вод). Теперь можно вычислить вероятности возникновения различного числа сбросов:

$$\begin{aligned} P(1, t) &= (\lambda t/N) \cdot P(0, t) = (1/1) \cdot 0,3679 = \\ &= 0,3679 \text{ (вероятность 1 сброса);} \\ P(2, t) &= (\lambda t/N) \cdot P(1, t) = (1/2) \cdot 0,3679 = \\ &= 0,18395 \text{ (вероятность 2 сбросов);} \\ P(3, t) &= (\lambda t/N) \cdot P(2, t) = (1/3) \cdot 0,18395 = \\ &= 0,06132 \text{ (вероятность 3 сбросов).} \end{aligned} \quad (5)$$

Продолжая этот процесс, вычисляются вероятности возникновения большего числа сбросов. Из этих расчетов видно, что при интенсивности потока $\lambda = 1$ наиболее вероятным является scenario с одним сбросом (вероятность около 36,8 %). Вероятности возникновения двух и более сбросов уменьшаются с увеличением числа сбросов.

Факторы, влияющие на риск. Дилемма состоит в следующем: 1) либо сосредоточить внимание на риске в виде затрат на наилучшие доступные технологии и систему технической безопасности B , и тогда вероятность аварии будет близка к 0; 2) либо — на управлении ущербом, связанным с аварией (страхование, создание special purpose vehicle, SPV и т.д.), и тогда вероятность аварии, наоборот, будет стремиться к 1. Следующая формула описывает вероятность аварии:

$$P(C) = P(A) \cdot P(-B|A), \quad (6)$$

где $P(C)$ — вероятность аварии; $P(A)$ — вероятность возникновения опасного события; $P(-B|A)$ — вероятность того, что опасное событие не будет предотвращено, при условии, что оно уже произошло. Это фактически и есть вероятность аварии, учитывая, что опасное событие уже случилось.

Предположим, что событие B всегда происходит, т.е. система безопасности всегда срабатывает и предотвращает аварию, тогда вероятность аварии будет равна вероятности возникновения опасного события:

$$P(C) = P(A), \quad (7)$$

если событие B всегда происходит.

Это означает, что усилия сосредоточены на риске и приняты меры по снижению вероятности возникновения опасного события. Если предположить, что событие B никогда не происходит, т.е. система безопасности никогда не срабатывает и не предотвращает аварию, то вероятность аварии будет равна 1:

$$P(C) = 1 - P(B), \quad (8)$$

если событие B никогда не происходит.

Данное выражение означает, что внимание сконцентрировано на ожидаемом ущербе и меры направлены на предотвращение ущерба от аварии. Ясно, что это предположение является крайне упрощенным. Формула не учитывает другие факторы, которые могут влиять на вероятность аварии, такие как человеческий фактор, внешние условия и т.д. В реальных системах всегда есть некоторая вероятность ложных срабатываний или пропусков. Конкретный подход, который выберет компания, зависит от ее целей и ресурсов. Но если компания стремится к минимизации риска, то она должна сконцентрироваться на мерах по предотвращению ущерба.

Пример расчета экологического риска. Формула (9) описывает вероятность того, что случайная величина, характеризующая опасное событие, примет определенное значение X :

$$P(A = X) = \exp(-\alpha \cdot X), \quad (9)$$

где α — частота аварий.

X представляет собой величину опасного события, достаточного для аварии, например, это могут быть вредные выбросы в атмосферу. Коэффициент α определяет скорость уменьшения вероятности возникновения опасного события: чем эффективнее системы безопасности, тем меньше вероятность того, что опасное событие произойдет.

Возьмем случай с концентрацией пыли на стройплощадке. Рассмотрим два сценария с разными значениями α : сценарий 1 ($\alpha = 0,2$) и сценарий 2 ($\alpha = 0,5$). Предположим, что благодаря более эффективным системам пылеподавления или в силу погодных условий скорость убывания вероятности выше. Сравним вероятности превышения допустимого уровня (5 мг/м^3) для разных значений A (табл. 1).

Важно понимать, при большем значении α (сценарий 2) вероятность превышения допустимого уровня уменьшается быстрее с ростом концентрации пыли. Даже небольшое увеличение концентрации ЗВ приводит к значительному снижению вероятности превышения допустимых уровней. Более эффективными мерами (большее α) мы «сдвигаем» кривую

Табл. 1. Сравнение вероятности превышения допустимого уровня для разных значений A

Table 1. Comparison of the probability of exceeding the permissible level for different values of A

X , мг/м ³ mg/m ³	$P(A)$ ($\alpha = 0,2$)	$P(A)$ ($\alpha = 0,5$)	Вероятность превышения, % ($\alpha = 0,2$) Probability of exceedance, % ($\alpha = 0,2$)	Вероятность превышения, % ($\alpha = 0,5$) Probability of exceedance, % ($\alpha = 0,5$)
4	0,45	0,14	55	86
5	0,37	0,07	63	93
6	0,30	0,03	70	97

распределения влево, т.е. для любого конкретного значения X (концентрации загрязняющего вещества) вероятность превышения допустимого уровня становится ниже, чем при менее эффективных мерах (меньшее α). Однако данный подход к оценке вероятности имеет ограничения. При увеличении X вероятность превышения допустимого уровня все равно растет, но этот рост происходит медленнее при более эффективных мерах, которые не гарантируют полную защиту от превышения ПДК (рис. 1).

График на рис. 1, a показывает, как вероятность возникновения опасного события $P(A)$ зависит от концентрации пыли X и эффективности системы безопасности α . График на рис. 1, b фокусируется на вероятности превышения допустимого уровня концентрации, что является более практичным показателем с точки зрения безопасности.

Как видно, при $\alpha = 0,2$ увеличение концентрации с 4 до 5 мг/м³ приводит к увеличению вероятности превышения допустимого уровня с 55 до 63 % (рост на 8 %); при $\alpha = 0,5$ то же самое увеличение концентрации повышает вероятность с 86 до 93 % (рост на 7 %). Таким образом, хотя вероятность превышения все равно растет с увеличением концентрации, эффективные меры (большее α) делают этот

рост медленнее, и система становится более устойчивой к колебаниям концентрации ЗВ.

Модель оптимального распределения ресурсов. Формула (10) описывает вероятность того, что событие B не приведет к ущербу (т.е. $1 - P(B)$), как обратную функцию от величины этого события:

$$C(B) = \frac{b}{Y}, \quad (10)$$

где b — период (время), в течение которого были выделены средства на снижение ущерба.

В данном случае Y представляет собой величину события, которое направлено на предотвращение ущерба от аварии, например страховые выплаты. Константа b определяет величину ущерба, который будет нанесен в случае аварии, если событие B не произойдет. В примере с заводом коэффициент b связан с размером ущерба окружающей среде от ЧС: чем больше размер ущерба, тем меньше вероятность того, что событие B предотвратит урон.

Найдем такое сочетание вероятности опасного события и эффективности системы безопасности, при котором ожидаемый ущерб будет минимальным.

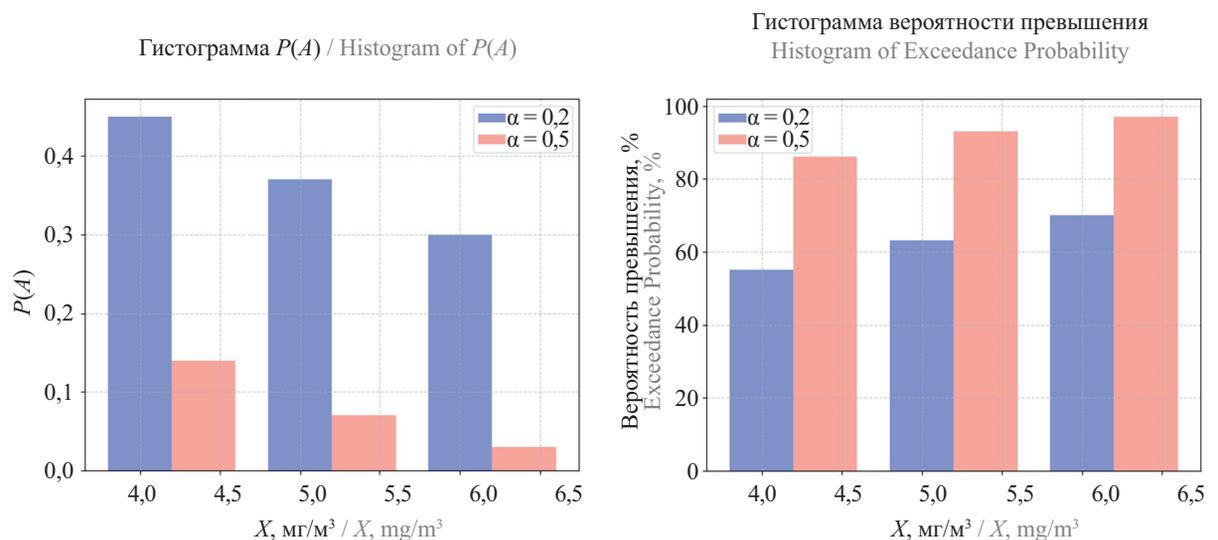


Рис. 1. Сдвиг кривой распределения. При менее эффективных мерах (меньшее α) вероятность превышения снижается медленнее

Fig. 1. Shift of the distribution curve. For less effective measures (smaller α), the probability of exceedance decreases more slowly

С помощью формулы $R = P \cdot C$ рассчитаем оптимальное распределение средств:

$$R(X_{\min}, Y_{\min}) = \min_{\{A,B\}} P(A) \cdot C(B) = \min_{\{A,B\}} \left[\exp(-\alpha \cdot X) \cdot \frac{b}{Y} \right], \quad (11)$$

где $R(X_{\min}, Y_{\min})$ — минимальный ожидаемый ущерб от аварии; X_{\min} — оптимальное значение величины опасного события A ; Y_{\min} — оптимальное значение величины события B ; $P(A)$ — вероятность возникновения опасного события с величиной X , например, $P(A) = \exp(-\alpha \cdot X)$, где α — некоторый параметр; $C(B)$ — величина ущерба от события B в зависимости от затрат на его смягчение Y , например, $C(B) = b/Y$, где b — некоторый параметр.

$R(X_{\min}, Y_{\min})$ указывает на то, что R является функцией двух переменных: X_{\min} и Y_{\min} . Другими словами, значение R (минимальный ожидаемый ущерб) зависит как от оптимального значения затрат на предотвращение опасного события (X_{\min}), так и от оптимального значения затрат на минимизацию ущерба (Y_{\min}). Речь идет о функции, которая вычисляет ожидаемый ущерб в зависимости от сочетания этих двух параметров. Вкладываемые средства (X) направлены на снижение вероятности возникновения опасного события A . Обозначим ее вероятность как $P(A, X)$. Чем больше X , тем меньше $P(A, X)$. Вкладываемые же средства (Y) направлены на уменьшение ущерба от события B . Обозначим величину ущерба как $C(B, Y)$. Чем больше Y , тем меньше $C(B, Y)$. Чтобы найти значение R , нужно подставить в функцию конкретные оптимальные значения X_{\min} и Y_{\min} , которые, в свою очередь, найдены в результате решения задачи оптимизации. Например, $P(A, X) = 1 - k_1 \cdot X$ (вероятность события A линейно убывает с ростом X) и $C(B, Y) = k_2/Y$ (величина ущерба от B обратно пропорциональна Y). В этом случае задача оптимизации будет состоять в минимизации функции: $R(X, Y) = (1 - k_1 \cdot X) \cdot (k_2/Y)$.

Если компания стремится к минимизации риска, то она должна выбрать такое значение X_{\min} , при котором вероятность возникновения опасного события будет минимальна. В этом случае значение Y_{\min} будет определяться размерами ущерба от аварии. Если на первом плане будет минимизация ущерба, то следует рассчитать такое значение Y_{\min} , при котором ущерб в случае аварии будет минимален, а значение X_{\min} определяться эффективностью систем безопасности.

Расчет оптимальных значений с помощью метода Монте-Карло. Метод Монте-Карло, учитывая случайные факторы, обеспечивает более реалистичное моделирование. Согласно алгоритму расчета X_{\min} и Y_{\min} с помощью данного метода, необходимо выполнить следующие шаги:

1) сгенерировать большое количество случайных значений для величин X и Y по коду: `random_numbers_X = np.random.rand(num_simulations);`

2) для каждого набора случайных значений рассчитать вероятность аварии и ожидаемый ущерб от аварии: $X = 1000 \cdot \text{random_numbers_X}$ (предполагая, что максимальное значение X равно 1000 млн руб.);

3) выбрать значения X_{\min} и Y_{\min} , при которых ожидаемый ущерб от аварии будет минимальным. Например, рассмотрим значения коэффициентов $\alpha = 10$ и $b = 10\,000$.

Формулы (12) и (13) для генерации случайных значений для величин X и Y имеют следующий вид:

$$X = \text{round}(\alpha \cdot \text{rand}()); \quad (12)$$

$$Y = \text{round}(b \cdot \text{rand}()); \quad (13)$$

где X — случайная величина, характеризующая исход опасного события A ; Y — случайная величина, связанная с событием B ; α — коэффициент, определяющий экспоненциальный характер зависимости вероятности возникновения опасного события от его величины; b — коэффициент, определяющий величину ущерба в случае аварии.

При $\alpha = 10$ вероятность аварии $P(A)$ падает очень быстро с ростом X , поэтому уже при $X = 10$ она практически равна 0. Чтобы модель была информативна, введем три варианта: плавное убывание $P(A)$ ($\alpha = 0,009$), более плавное ($\alpha = 0,001$) и очень медленное убывание, которое подходит, если аварии крайне опасны, и даже большие затраты не гарантируют их предотвращения ($\alpha = 0,0001$).

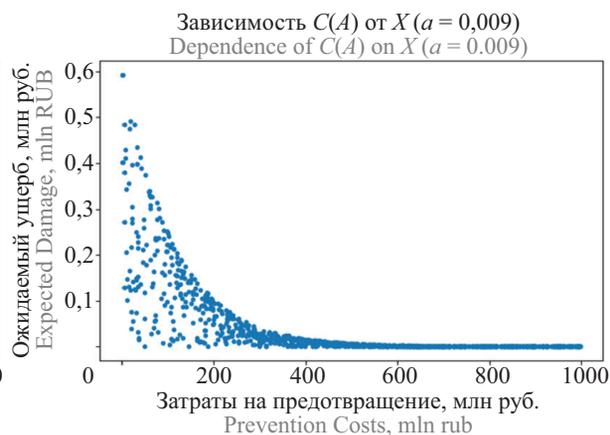
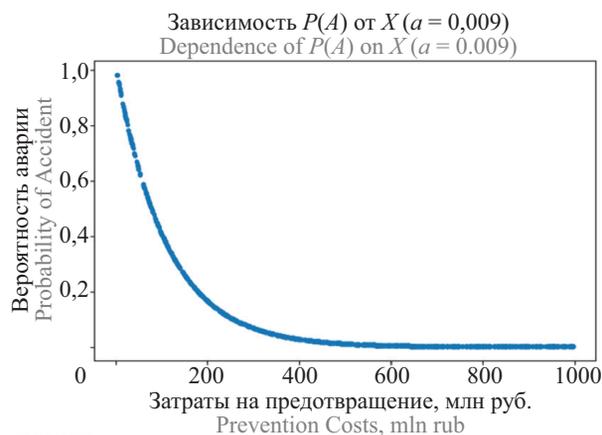
Согласно расчетам по формуле (9) и преобразованной (10) как $P(B) = 1 - \exp(-Y/b)$ и формуле $C(A) = P(A) \cdot P(B) = \exp(-\alpha \cdot X) \cdot (1 - \exp(-Y/b))$ как произведении вероятности аварии ($P(A)$) и вероятности наличия ущерба при аварии ($P(B)$), вероятность аварии $P(A)$ экспоненциально убывает с увеличением значения X (затрат на снижение вероятности аварии). Y (средства на предотвращение ущерба) не влияют на $P(A)$. Ожидаемый ущерб от аварии $C(A)$ зависит от обоих параметров X и Y . Увеличение X приводит к снижению $C(A)$, а увеличение Y — к его росту (рис. 2).

График $P(A)$ демонстрирует экспоненциальное убывание вероятности аварии с ростом затрат на предотвращение (X). Это соответствует интуитивному представлению: чем больше инвестируется в безопасность, тем меньше вероятность аварии. Крутизна спада зависит от параметра α . Более крутой спад указывает на более быстрое снижение вероятности аварии при увеличении затрат.

Точечная диаграмма $C(A)$ отражает нелинейную зависимость ожидаемого ущерба от затрат на предотвращение (X). С одной стороны, увеличение X приводит к снижению вероятности аварии, что должно уменьшать ожидаемый ущерб. Однако увеличение Y , направленное на снижение ущерба в случае аварии, может приводить к росту $C(A)$. Это связано с тем, что более высокие затраты на предотвращение ущерба Y могут оправдываться только в случае более

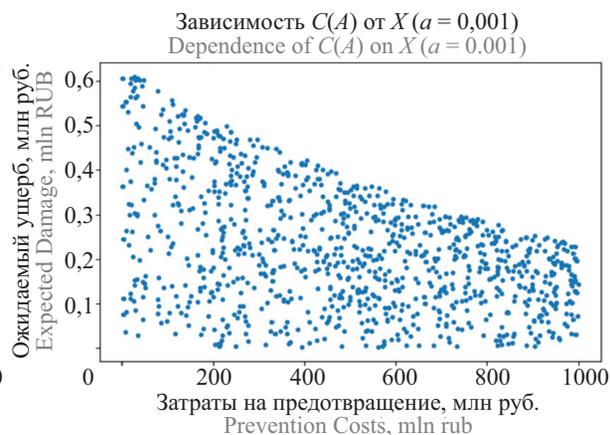
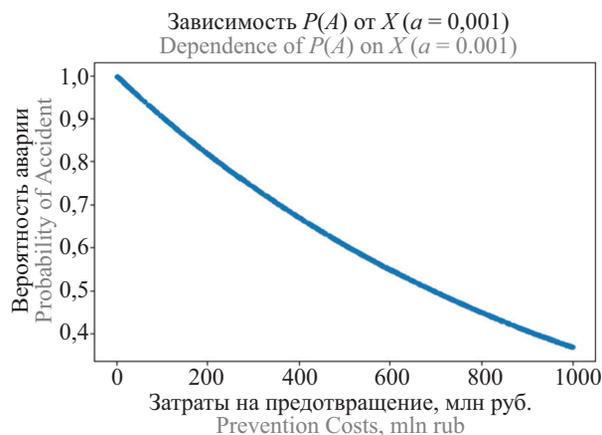
$\alpha = 0.009$:

X	Y	P(A)	C(A)
242.9	9561.4	0.112	0.069
298.4	676.9	0.068	0.004



$\alpha = 0.001$:

X	Y	P(A)	C(A)
399.2	3050.1	0.671	0.176
494.4	3558.6	0.610	0.183



$\alpha = 0.0001$:

X	Y	P(A)	C(A)
473.9	9110.7	0.954	0.570
743.7	2316.0	0.928	0.192

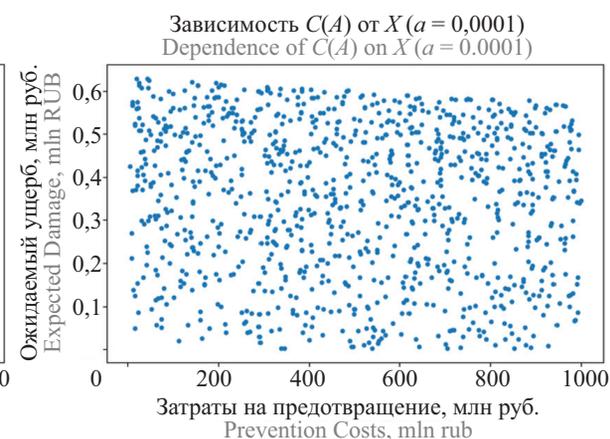
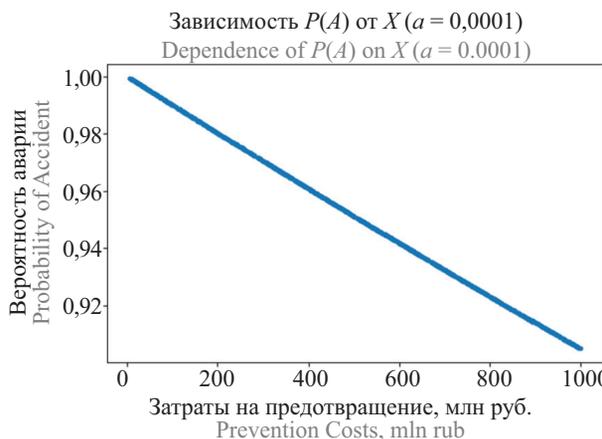


Рис. 2. Зависимость вероятности ($P(A)$) и ожидаемого ущерба ($C(A)$) от затрат на предотвращение (X). Варианты: ($\alpha = 0.009$), ($\alpha = 0.001$), ($\alpha = 0.0001$)

Fig. 2. Dependence of probability ($P(A)$) and expected damage ($C(A)$) on prevention costs (X). Options: ($\alpha = 0.009$), ($\alpha = 0.001$), ($\alpha = 0.0001$)

высокой вероятности аварии, что в итоге приводит к большему ожидаемому ущербу. Иначе говоря, даже при значительных инвестициях в безопасность остается вероятность крупной аварии с катастрофическими последствиями, что и объясняет рост ожидаемого ущерба при больших значениях X .

Метод Монте-Карло, продемонстрированный выше, дает общее представление о зависимости вероятности аварии и ожидаемого ущерба от затрат. Однако для более точного анализа и оптимизации распределения ресурсов необходимо учесть влияние системы безопасности (событие B) на эти показатели. Воспользуемся аналитическим подходом и рассмотрим следующие формулы:

$$P(A) = 1 - \exp(-\alpha \cdot X); \quad (14)$$

$$C(A) = 10\,000 \cdot (1 - P(A|B) \cdot P(B)), \quad (15)$$

где $P(A)$ — вероятность случайного события; $C(A)$ — ожидаемый ущерб от аварии; $P(A|B)$ — вероятность того, что опасное событие A приведет к аварии при условии, что произошло событие B ; $P(B)$ — вероятность того, что событие B сработает должным образом.

Формула (14) описывает, как затраты на предотвращение аварий (X) влияют на вероятность ее возникновения ($P(A)$). Параметр α отражает эффективность этих затрат: чем он выше, тем быстрее снижается вероятность аварии с ростом X .

Формула (15) показывает, что ожидаемый ущерб от аварии ($C(A)$) зависит от двух факторов:

- среднего значения ущерба (в данном случае 10 000 единиц);
- вероятности аварии с учетом системы безопасности ($1 - P(A|B) \cdot P(B)$).

Для оптимизации распределения ресурсов необходимо найти такое значение X , которое минимизирует $C(A)$. Важно установить связь между затратами на предотвращение (X) и вероятностью срабатывания системы безопасности ($P(B)$). Логично предположить, что с ростом X возрастает и $P(B)$, так как более высокие затраты обычно позволяют внедрить более надежную систему безопасности.

Чтобы определить оптимальное значение X , необходимо:

- задать конкретную функцию, связывающую X и $P(B)$;
- определить значение $P(A|B)$ — вероятность аварии при условии срабатывания системы безопасности;
- используя формулы (14) и (15), рассчитать $C(A)$ для разных значений X и выбрать то, которое минимизирует ожидаемый ущерб.

Данные формулы показывают, что ожидаемый ущерб от аварии равен произведению среднего значения ущерба от аварии (10 000 единиц) на ее вероятность. Последняя зависит от двух факторов: значения величины X (чем оно больше, тем меньше вероят-

ность аварии) и вероятности того, что событие B сработает должным образом (чем оно выше, тем меньше вероятность аварии).

Практическое применение модели: поиск оптимального X . Найдем такое значение X , которое минимизирует $C(A)$, учитывая при этом затраты на систему безопасности. Установим связь между X и $P(B)$ через вероятность того, что событие B не приведет к ущербу, описанную формулой (10) $C(B) = b/Y$. Здесь Y представляет собой величину события, направленного на предотвращение ущерба от аварии, а b — период (время), в течение которого были выделены средства на снижение ущерба.

Предположим, что Y прямо пропорционально затратам на предотвращение (X), т.е. $Y = kX$, где k — коэффициент пропорциональности. Тогда формула (10) примет вид:

$$C(B) = \exp(-Y/b) = \exp(-kX/b). \quad (16)$$

Так как $C(B)$ — это вероятность, что событие B не приведет к ущербу, то вероятность того, что B сработает должным образом, равна:

$$P(B) = 1 - C(B) = 1 - \exp(-kX/b). \quad (17)$$

Находим минимальное значение X при P , равном 0,1. Оно равно 69. Таким же образом находим значение Y при P , равном 0,9. Оно равно 90. При этих значениях величин X и Y вероятность аварии составит:

$$P(C) = P(A) \cdot (1 - P(B|A)) = P(A) \cdot (1 - 0,99) = 0,01 \cdot P(A). \quad (18)$$

При значениях $X_{\min} = 69$ млн руб. (ед.) и $Y_{\min} = 90$ млн руб. (ед.) ожидаемый ущерб от аварии составит 900 млн руб. (ед.). Для минимизации ожидаемого ущерба от аварии необходимо найти X , минимизирующее $C(A)$, учитывая зависимость $P(B)$ от X . Подставляя формулы (14) $C(A) = C(A|B) \cdot P(B) + C(A|-B) \cdot P(-B)$ и (15) $C(A|-B) = b \cdot P(A|-B)$ и учитывая найденную зависимость $P(B)$ от X , получаем:

$$C(A) = C(A|B) \cdot (1 - \exp(-kX/b)) + b \cdot P(A|-B) \cdot \exp(-kX/b). \quad (19)$$

Следующие параметры $\alpha = 10$, $b = 10\,000$, $k = 1$ (для упрощения расчетов), $P(A|B) = 0,01$ (выбираем низкую вероятность аварии при условии срабатывания системы безопасности, чтобы выразить ее эффективность). Подставляем выбранные значения параметров в формулу (19) для $C(A)$:

$$C(A) = C(A|B) \cdot (1 - \exp(-X/10\,000)) + 100 \cdot \exp(-X/10\,000). \quad (20)$$

Производная $dC(A)/dX$ отрицательна для всех $X > 0$, что означает, что функция $C(A)$ монотонно убывает с ростом X и стремится к асимптотическому значению $b \cdot P(A|-B) = 10\,000 \cdot 0,01 = 100$... В данной модели ожидаемый ущерб будет уменьшаться с ростом затрат на предотвращение (X), но никогда не достигнет нуля. Остаточный риск, равный 100 млн руб.,

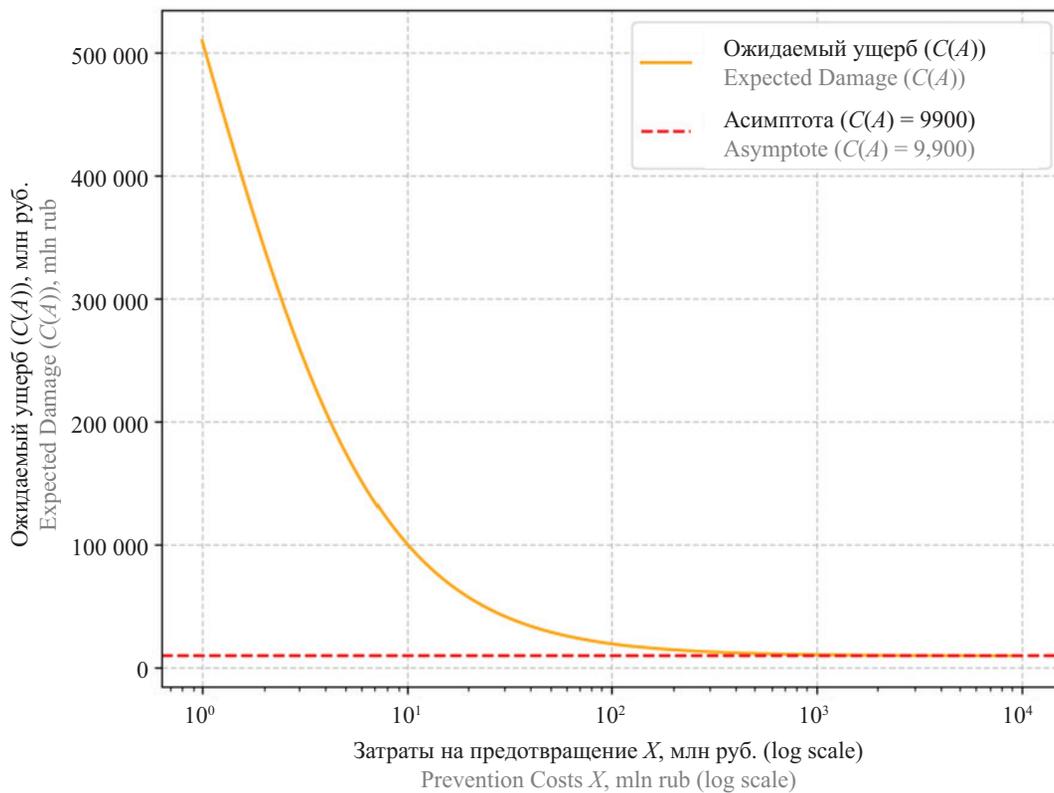


Рис. 3. Зависимость ожидаемого ущерба от затрат на предотвращение (log scale)

Fig. 3. Dependence of expected damage on prevention costs (log scale)

в данном случае невозможно полностью устранить даже при очень больших инвестициях в безопасность (рис. 3).

Отметим, что данная модель демонстрирует общую тенденцию снижения ожидаемого ущерба с ростом затрат на предотвращение аварий. Однако на практике фирма часто сталкивается с ограничениями бюджета и необходимостью найти баланс между снижением риска и разумными затратами. В предыдущем анализе были выявлены значения X и Y ($X = 69$ и $Y = 90$), которые минимизируют ожидаемый ущерб при учете эффективности системы безопасности. Важно отметить, что эти значения были получены при $P(B) = 0,9$ и $P(B) = 0,1$ соответственно. Для других значений $P(B)$ оптимальные значения X и Y будут другими. Таким образом, формулы (14)–(20) дают конкретный инструмент для количественной оценки риска, что позволяет принимать взвешенные решения об оптимальном распределении ресурсов.

Модель демонстрирует общую тенденцию снижения ожидаемого ущерба с ростом затрат на предотвращение аварий. Однако на практике фирма часто сталкивается с ограничениями бюджета и необходимостью найти баланс между снижением риска и разумными затратами. В предыдущем анализе были выявлены оптимальные значения X и Y , которые позволяют минимизировать ожидаемый ущерб при учете эффективности системы безопасности. Эти значения ($X = 69$ и $Y = 90$) служат ориентиром для при-

нятия решений о распределении ресурсов, даже если теоретически ущерб можно снижать и дальше за счет увеличения затрат. Формулы (14)–(19) дают конкретный инструмент для количественной оценки риска, что позволяет принимать взвешенные решения об оптимальном распределении ресурсов.

Однако формула (15) не отвечает сценарию, когда B не срабатывает. В этом случае авария происходит с вероятностью $P(A|\bar{B}) = 1$, и ожидаемый ущерб должен быть равен C_damage (в данном примере 10 000). Правильный расчет (представленный ниже) должен учитывать вероятность несрабатывания B и использовать соответствующую условную вероятность, что отражено в формуле:

$$C(A) = P(A) \cdot (1 - P(B|A)) \cdot C_damage. \quad (21)$$

Анализ графиков

Далее исследуется влияние затрат на предотвращение ущерба (X) на различные показатели риска в трех сценариях:

- 1) *базовый сценарий*: исходный уровень риска без дополнительных мер;
- 2) *улучшенный сценарий*: сценарий с повышенной эффективностью мер по предотвращению ущерба;
- 3) *синергетический сценарий*: сценарий, где совместное применение мер по предотвращению ущерба и системы безопасности дает больший эффект, чем сумма отдельных мер.

Для анализа используются табл. 2–5.

Следующие графики демонстрируют взаимосвязь между затратами на предотвращение аварии (X), вероятностью возникновения аварии ($P(A)$), ожидаемым ущербом ($C(A)$) и эффективностью системы безопасности (B) (рис. 4).

Графики (рис. 4, а, б) построены методом вариации параметров. Они иллюстрируют важность комплексного подхода к управлению риском. Базовый сценарий показывает экспоненциальное снижение

вероятности аварии с ростом затрат. Улучшенный и сценарий с синергией демонстрируют более резкое снижение заданных показателей. Экспоненциальное снижение ожидаемого ущерба с ростом затрат вполне логично, так как чем больше вкладывают в безопасность, тем меньше вероятность аварии и, следовательно, меньше потенциальный ущерб. Этот график согласуется с формулой (14) $P(A = X) = 1 - \exp(-\alpha \cdot X)$, где α — параметр, определяющий скорость убывания вероятности с ростом величины этого события X .

Табл. 2. Вероятность аварии ($P(A)$) в зависимости от затрат на предотвращение (X), $P(A) = \exp(-\alpha \cdot X)$

Table 2. Accident probability ($P(A)$) as a function of prevention costs (X), $P(A) = \exp(-\alpha \cdot X)$

X , млн руб. mln rub	Базовый сценарий ($\alpha = 0,01$) Baseline scenario ($\alpha = 0.01$)	Улучшенный сценарий ($\alpha = 0,012$) Improved scenario ($\alpha = 0.012$)	Сценарий с синергией ($\alpha = 0,015$) Synergy scenario ($\alpha = 0.015$)
0	1,000	1,000	1,000
50	0,606	0,549	0,522
100	0,368	0,301	0,273
200	0,135	0,091	0,074
300	0,050	0,025	0,018
400	0,018	0,007	0,005
500	0,007	0,002	0,001
1000	0,000	0,000	0,000

Табл. 3. Ожидаемый ущерб ($C(A)$) в зависимости от затрат на предотвращение (X), $C(A) = C_damage \cdot (1 - P(A|B)) \times P(B) \cdot P(A)$

Table 3. Expected damage ($C(A)$) as a function of prevention costs (X), $C(A) = C_damage \cdot (1 - P(A|B)) \cdot P(B) \cdot P(A)$

X , млн руб. mln rub	Базовый сценарий Baseline scenario	Улучшенный сценарий Improved scenario	Сценарий с синергией Synergy scenario
0	9000,000	9000,000	9000,000
50	5455,035	4939,533	4681,845
100	3312,753	2732,103	2479,247
200	1217,029	814,769	657,566
300	450,996	248,087	184,337
400	164,569	73,895	51,817
500	61,947	22,310	14,934
1000	0,135	0,037	0,021

Табл. 4. Чувствительность вероятности аварии ($P(A)$) к затратам на предотвращение (X), $S(P(A)) = -(P(A(X + \Delta X)) - P(A(X)))/P(A(X)) \cdot 100\%$, где $\Delta X = 0,01 \cdot X$

Table 4. Sensitivity of accident probability ($P(A)$) to prevention costs (X), $S(P(A)) = -(P(A(X + \Delta X)) - P(A(X)))/P(A(X)) \times 100\%$, where $\Delta X = 0,01 \cdot X$

X , млн руб. mln rub	Базовый сценарий Baseline scenario	Улучшенный сценарий Improved scenario	Сценарий с синергией Synergy scenario
0	-1,000	-1,200	-1,500
50	-5,972	-7,167	-8,958
100	-10,948	-13,137	-16,422
200	-20,895	-25,074	-31,343
300	-30,844	-37,012	-46,264
400	-40,792	-48,951	-61,185
500	-50,741	-60,889	-76,106
1000	-99,499	-99,499	-99,499

Табл. 5. Чувствительность ожидаемого ущерба ($C(A)$) к затратам на предотвращение (X), $S(C(A)) = -(C(A(X + \Delta X)) - C(A(X)))/C(A(X)) \cdot 100\%$, где $\Delta X = 0,01 \cdot X$

Table 5. Sensitivity of expected damage ($C(A)$) to prevention costs (X), $S(C(A)) = -(C(A(X + \Delta X)) - C(A(X)))/C(A(X)) \cdot 100\%$, where $\Delta X = 0.01 \cdot X$

X , млн руб. mln rub	Базовый сценарий Baseline scenario	Улучшенный сценарий Improved scenario	Сценарий с синергией Synergy scenario
0	-0,100	-0,120	-0,150
50	-0,560	-0,672	-0,841
100	-1,021	-1,225	-1,532
200	-1,944	-2,333	-2,918
300	-2,867	-3,441	-4,303
400	-3,791	-4,549	-5,689
500	-4,714	-5,657	-7,075
1000	-9,429	-11,315	-14,151

Разные сценарии на графике можно интерпретировать как разные значения α . Формула (15) $C(A) = 10\,000 \cdot (1 - P(A|B) \cdot P(B))$ математически подтверждает этот вывод, показывая, что ожидаемый ущерб ($C(A)$) снижается при увеличении вероятности эффективного срабатывания системы безопасности ($P(B)$) и снижении условной вероятности аварии при условии срабатывания системы безопасности ($P(A|B)$). Также

формула (14) показывает, что ожидаемый ущерб снижается до 900 млн руб. при оптимальных значениях X_{\min} и Y_{\min} . Сценарий с синергией на графике (рис. 4, б) демонстрирует наибольшую эффективность с точки зрения минимизации потерь.

Важно подчеркнуть, что графики (рис. 4, с, d) показывают, что эффективность инвестиций в безопасность зависит от чувствительности системы α

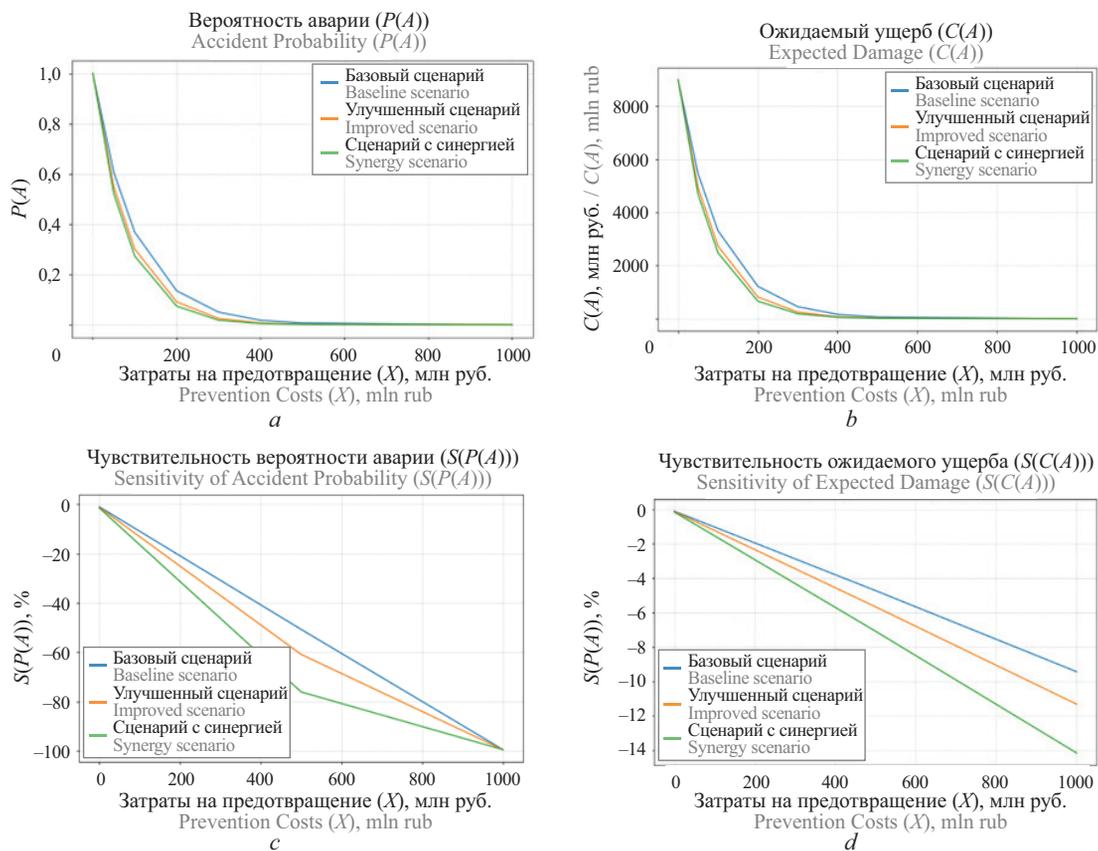


Рис. 4. Взаимосвязь между затратами на предотвращение аварии (X), вероятностью возникновения аварии ($P(A)$), ожидаемым ущербом ($C(A)$) и чувствительностью

Fig. 4. Relationship between accident prevention costs (X), probability of accident occurrence ($P(A)$), expected damage ($C(A)$) and sensitivity

(относительное изменение $P(A)$ или $C(A)$ при изменении затрат (X) на 1 %). Для построения графиков использовалась формула:

$$P(A) = (dP/dX)/P(A) \cdot 100 \% = (\alpha \cdot \exp(-\alpha \cdot X))/(1 - \exp(-\alpha \cdot X)) \cdot 100 \%. \quad (22)$$

Знаменатель $(1 - \exp(-\alpha \cdot X))$ стремится к 0 при X , стремящемся к бесконечности, что приводит к росту чувствительности при увеличении затрат. Высокая чувствительность означает, что даже небольшие изменения в затратах на предотвращение (X) приводят к существенному изменению вероятности аварии ($P(A)$) или ожидаемого ущерба ($C(A)$). В базовом сценарии при затратах $X = 100$ млн руб. чувствительность составит примерно 1 %. Это означает, что увеличение затрат на 1 % (1 млн руб.) снизит вероятность аварии на 0,01 (1 %). В сценарии с синергией (розовая линия) чувствительность еще выше, чем в улучшенном сценарии, отражая максимальный эффект от инвестиций.

Предположим, при затратах $X = 500$ млн руб. чувствительность $C(A)$ в базовом сценарии составляет 3 %, т.е. увеличение затрат на 1 % (5 млн руб.) снизит ожидаемый ущерб на 0,15 (3 %). В сценарии с синергией чувствительность может быть значительно выше, что говорит о более эффективном использовании инвестиций в безопасность. Анализ графика (рис. 4, *d*) позволяет сделать вывод, что при затратах около 505 млн руб. в базовом сценарии каждый дополнительный процент инвестиций в безопасность будет приводить к снижению ожидаемого ущерба примерно на 5 % относительно текущего уровня.

Для более детального анализа сценария с эффектом синергии рассмотрим следующую таблицу, которая содержит численные значения $P(A)$, $C(A)$ и чувствительности для разных уровней затрат на предотвращение (X) (табл. 6).

$P(A)$: как и ожидается, $P(A)$ уменьшается с ростом затрат на предотвращение (X). Это соответствует формуле (14): $P(A) = 1 - \exp(-\alpha \cdot X)$.

$C(A)$, млн руб.: $C(A)$ рассчитывается с учетом вероятности аварии ($P(A)$), фиксированного ущерба (C_{damage}) и вероятности срабатывания системы

безопасности ($P(B)$), как показано в формуле (14): $C(A) = 10\,000 \cdot (1 - P(A|B)) \cdot P(B)$.

Чувствительность $P(A)$, %: показывает, на сколько процентов изменится вероятность аварии ($P(A)$) при увеличении затрат на предотвращение (X) на 1 %. Чувствительность уменьшается с ростом затрат, что означает, что эффективность каждой дополнительной единицы вложенных средств снижается.

Чувствительность $C(A)$, %: показывает, на сколько процентов изменится ожидаемый ущерб ($C(A)$) при увеличении затрат на предотвращение (X) на 1 %. Аналогично чувствительности $P(A)$ чувствительность $C(A)$ также уменьшается с ростом затрат.

Разберем сценарий с синергией (табл. 5):

$X = 0$ млн руб.; $S(P(A)) = -1,5$ %. Это означает, что если мы увеличим затраты на предотвращение на 1 % (с 0 до 0,01 млн руб.), то вероятность аварии снизится на 1,5 % от текущего уровня (который равен 1).

$X = 50$ млн руб.; $S(P(A)) = -8,958$ %. Здесь чувствительность больше по модулю (-8,958 против -1,5 %). Это значит, что увеличение затрат на 1 % (с 50 до 50,5 млн руб.) приведет к более значительному снижению вероятности аварии, чем при $X = 0$.

$X = 100$ млн руб.; $S(P(A)) = -16,422$ %. Чувствительность продолжает усиливаться. Каждый процент увеличения затрат на предотвращение дает все больший эффект, на ранних этапах (при малых X) даже небольшие вложения могут дать заметный эффект, а при больших X для достижения такого же снижения $P(A)$ требуются более существенные инвестиции. Аналогично можно проанализировать и табл. 6. Отрицательные значения $S(C(A))$ также говорят о том, что увеличение затрат на предотвращение (X) приводит к снижению ожидаемого ущерба ($C(A)$), причем эта зависимость усиливается с ростом X .

Ограничения модели. Тем не менее ожидаемый ущерб зависит не только от величины событий, но и от их вероятности. Событие с меньшей величиной ущерба может приводить к большему ожидаемому ущербу, если оно происходит чаще. Тогда алгоритм расчета заключается не в том, чтобы сравнивать величины этих событий и выбирать меньшее значение, а находить среднюю величину ущерба. Предположим, что событие A имеет величину ущерба 10 тыс. ед.

Табл. 6. Данные для сценариев, включая с эффектом синергии

Table 6. Data table for the scenario with synergy effect

X , млн руб. mln rub	$P(A)$	$C(A)$, млн руб. mln rub	Чувствительность $P(A)$, % Sensitivity $P(A)$, %	Чувствительность $C(A)$, % Sensitivity $C(A)$, %
1	0,985	9045	-9,85	-0,94
50	0,606	5455	-7,27	-0,70
100	0,368	3313	-5,45	-0,52
200	0,135	1217	-3,38	-0,32
300	0,050	451	-2,25	-0,21
400	0,018	164	-1,56	-0,15
500	0,007	62	-1,13	-0,11
1000	0,000	1	-0,55	-0,05

и вероятность 0,1, а событие B имеет величину ущерба 5 тыс. ед. и вероятность 0,9. Выбор меньшего значения из величин событий (5 тыс. руб.) не подходит для расчета ожидаемого ущерба, так как не учитываются вероятности событий A и B . Ожидаемый ущерб будет больше. Формула для его вычисления следующая:

$$E[U] = P(A) \cdot C_damage(A) + P(B) \cdot C_damage(B), \quad (23)$$

где $E[U]$ — математическое ожидание ущерба (expected value of damage); $P(A)$ и $P(B)$ — вероятности наступления состояний или событий A и B ; $C_damage(A)$ и $C_damage(B)$ — величины ущерба в случае наступления состояний A и B соответственно.

События A и B происходят независимо друг от друга, и наступление одного события не влияет на вероятность наступления другого. $C_damage(A)$ и $C_damage(B)$ могут быть разными.

Расчет ожидаемого ущерба. $E[U]$ обозначает математическое ожидание (expected value) ущерба (U). Математическое ожидание в данном контексте представляет собой средневзвешенную величину ущерба от всех возможных событий (A и B), где веса — это вероятности наступления A и B . Например, если событие A имеет величину ущерба 10 тыс. ед. и вероятность 0,1, а событие B имеет величину ущерба 5 тыс. ед. и вероятность 0,9, то математическое ожидание ущерба будет равно:

$$E[U] = 0,1 \cdot 10\,000 + 0,9 \cdot 5000 = 5500 \text{ руб.} \quad (24)$$

Важно отметить, что задача нахождения минимальных оптимальных значений (X_{\min} , Y_{\min}) отличается от задачи расчета ожидаемого ущерба. X_{\min} и Y_{\min} относятся к оптимизации затрат на предотвращение аварий (X) и затрат на ликвидацию последствий (Y) с целью минимизации общего риска. Ожидаемый ущерб — это средневзвешенная оценка возможных потерь с учетом вероятностей разных сценариев и не обязательно совпадает с минимально достижимым уровнем ущерба.

Адаптивная формула и учет неопределенности. Обоснованным шагом для обеспечения универсальности расчета ожидаемого ущерба служит адаптивная формула. Она рассчитывает ожидаемый ущерб, когда есть одно опасное событие (A), которое может привести к ущербу, и система безопасности (B), которая может снизить этот ущерб:

$$R(A, B) = P(A) \cdot C_damage \cdot (1 - P(B|A)), \quad (25)$$

где $P(A)$ — вероятность возникновения опасного события A ; C_damage — фиксированная величина ущерба, если событие происходит (например, 10 тыс. ед.) в случае аварии; $P(B|A)$ — вероятность того, что событие B сработает должным образом, при условии, что произошло событие A .

Эта формула учитывает условную вероятность $P(B|A)$ и фиксированный ущерб C_damage , что делает модель более гибкой и адаптируемой к разным ситуациям, чем простая формула $R = P \cdot C$.

В контексте расчета ожидаемого ущерба $P(B|A)$ играет важную роль. Она позволяет учитывать влияние системы безопасности (события B) на величину ожидаемого ущерба. Если система безопасности сработает должным образом, то ущерб будет меньше. Замена $\exp(-\alpha X) \cdot (b/Y)$ на $P(B|A) \cdot C_damage$ дает возможность учесть условную вероятность события B и величину ущерба C_damage ; а выражение $1 - P(B|A)$ — вероятность того, что система безопасности B не сработает должным образом, когда происходит опасное событие A .

Значение условной вероятности $P(B|A)$ необходимо для расчета. Без него нельзя точно рассчитать ожидаемый ущерб, так как неизвестно, насколько эффективна система защиты (B) в контексте события A . Предположим, что $P(B|A)$ равна 0,9, т.е. вероятность того, что система безопасности сработает должным образом, составляет 90%. Тогда $1 - P(B|A)$ равна 0,1, т.е. в 10% случаев система безопасности не сможет предотвратить ущерб, что приведет к более высокому ожидаемому ущербу.

Другой пример. Даны два значения $P(B|A)$: 1) если $P(B|A) = 0,1$ (т.е. система защиты (B) с высокой вероятностью сработает, когда происходит событие A), то ожидаемый ущерб будет ниже; 2) если $P(B|A) = 0,9$ (т.е. система защиты (B) с низкой вероятностью сработает, когда происходит событие A), то ожидаемый ущерб будет выше. Рассчитаем с помощью формулы (25) ожидаемый ущерб, учитывая вероятность события A , а также эффективность системы защиты (B).

Сценарий 1: $P(B|A) = 0,1$ (высокая вероятность срабатывания системы защиты, эффективно предотвращающей ущерб):

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot (1 - 0,1) = 900. \quad (26)$$

Сценарий 2: $P(B|A) = 0,9$ (низкая вероятность срабатывания системы защиты, к тому же она не эффективна):

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot (1 - 0,9) = 100. \quad (27)$$

Ожидаемый ущерб значительно ниже в сценарии с низкой вероятностью срабатывания системы защиты (100 ед.). Хотя система защиты срабатывает с высокой вероятностью (0,9), опасное событие (A) также происходит с вероятностью 0,1. Поэтому, несмотря на эффективную защиту, ущерб все же возникает с определенной вероятностью. Все это приводит к более высокому ожидаемому ущербу. В другом случае система защиты срабатывает с низкой вероятностью (0,1), однако опасное событие (A) происходит с высокой вероятностью 0,9 и приводит к меньшему ожидаемому ущербу. Так получается потому, что вероятность события B остается неизменной, независимо от наступления события A .

Следующая формула позволяет учесть различные сценарии и вероятности наступления обоих событий A и B с соответствующими им величинами ущерба:

$$R(A, B) = P(A) \cdot C_damage \cdot (1 - P(B|A)) + (1 - P(A)) \cdot C_damage(B), \quad (28)$$

где $P(B|A)$ — вероятность того, что система защиты B не сработает при наступлении события A . Если система защиты не сработает, то ущерб будет равен $C_damage(A)$; $1 - P(A)$ — вероятность того, что событие A не произойдет. В этом случае ущерб будет равен $C_damage(B)$, который описывает потери при наступлении события B ; $C_damage(B)$ — величина ущерба, связанная с событием B . Она описывает потенциальные потери при наступлении события B .

Это уравнение учитывает как ожидаемый ущерб при наступлении события A и срабатывании системы B , так и ожидаемый ущерб при отсутствии события A и независимом наступлении события B . Теперь пересчитаем исходную задачу с использованием данной формулы:

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot (1 - P(B|A)) + (1 - 0,1) \times 5000, \text{ если } P(B|A) = 0,1;$$

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot (1 - 0,1) + (1 - 0,1) \cdot 5000;$$

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot 0,9 + 0,9 \cdot 5000;$$

$$R(A, B) = 900 + 4500 = 5400, \text{ если } P(B|A) = 0,9;$$

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot (1 - 0,9) + (1 - 0,1) \cdot 5000;$$

$$R(A, B) = 0,1 \cdot 10\,000 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 5000;$$

$$R(A, B) = 1000 + 4500 = 5500.$$

Таким образом, при $P(B|A) = 0,1$, когда система защиты B с высокой вероятностью срабатывает при наступлении события A , ожидаемый ущерб составляет 5400 ед. Во втором случае при $P(B|A) = 0,9$ он выше. Вычисление показывает, что при более высокой вероятности срабатывания системы защиты B (сценарий 1) ожидаемый ущерб оказывается ниже, чем в сценарии 2. Это соответствует ожидаемым результатам, так как в сценарии, где система защиты имеет большую вероятность сработать, она может успешно предотвратить или снизить ущерб, в результате чего ожидаемый ущерб становится меньше. Расчет ожидаемого ущерба для двух сценариев подтверждает важность учета вероятностей событий при оценке риска. Однако неотъемлемой частью определения остается фактор неопределенности.

Когда речь идет о множестве возможных сценариев и есть необходимость рассмотреть общий ожидаемый ущерб, то используется формула (23), поскольку в ней $C_damage(A)$ — величина ущерба, если происходит событие A , представляет собой потенциально разные значения ущерба в разных сценариях. Формулы (25)–(28) служат для вычисления ожидаемого ущерба в рамках конкретного сценария, где происходит событие A , и система защиты может не сработать.

Нормализованная адаптация формулы. Формулу (9), где вероятность возникновения опасного события A описывается экспоненциальным распределе-

нием, также можно адаптировать к вышеуказанному контексту расчета ожидаемого ущерба:

$$P_{\text{норм}}(X_{\min}) = \frac{P(X_{\min})}{\sum_{A=X_{\min}}^{X_{\max}} P(A)}, \quad (29)$$

где $P_{\text{норм}}(X_{\min})$ — это нормированная вероятность возникновения опасного события с величиной X_{\min} . Нормирование здесь важно для того, чтобы учитывать вклад данного события в контексте всех возможных значений случайного события A в диапазоне от X_{\min} до X_{\max} . Показатель будет находиться в диапазоне от 0 до 1, так как является отношением вероятности конкретного события к общей вероятности всех событий в данном промежутке. Если $P_{\text{норм}}(X_{\min})$ близко к 1, это указывает на то, что событие с величиной X_{\min} имеет большую вероятность относительно всех других событий в диапазоне, значение $P_{\text{норм}}(X_{\min})$, близкое к 0, говорит о низкой вероятности A_{\min} ; $P(X_{\min})$ — базовая вероятность возникновения опасного события с величиной X_{\min} ; $\sum_{A=X_{\min}}^{X_{\max}} P(A)$ — сумма вероятностей всех возможных значений события A в диапазоне от X_{\min} до X_{\max} .

Формула (29) представляет собой нормализованную вероятность для минимального значения X_{\min} в контексте анализа рисков или оценки эффективности систем безопасности. Если X представляет собой меру эффективности системы предотвращения ущерба, то $P_{\text{норм}}(X_{\min})$ указывает на риск отказа системы при ее минимальной эффективности (например, нормированная вероятность того, что концентрация пыли будет равна 5 мг/м^3 , и произойдет случайное событие «авария», учитывая все возможные значения X в диапазоне от 5 до 10 мг/м^3). При выборе между различными вариантами системы безопасности $P_{\text{норм}}(X_{\min})$ может помочь оценить, насколько вероятно, что система будет работать с минимально допустимой эффективностью. Формула полезна для оптимизации параметров системы, чтобы минимизировать вероятность работы системы на минимально допустимом уровне эффективности. Тем не менее у данного варианта оценки опасности есть ограничения. Так, предполагается, что каждое значение X в диапазоне от X_{\min} до X_{\max} имеет ненулевую вероятность. Это означает, что система может работать с любой эффективностью в указанном диапазоне, хотя некоторые уровни эффективности более вероятны, чем другие. В действительности, некоторые значения X могут быть физически невозможны или крайне маловероятны. Например, если X представляет собой процент времени безотказной работы системы, значение 0 % (полный отказ) невозможно, поскольку запланированы ее резервные компоненты. Представим, что X — это эффективность фильтра очистки воздуха, измеряемая в процентах задержанных частиц. $X_{\min} = 70 \%$ и $X_{\max} = 99 \%$. Формула предполагает, что фильтр может работать с любой эффективностью между 70 и 99 %. Однако

из-за физических ограничений конструкции фильтра эффективность ниже 75 % невозможна. Поэтому, если игнорировать это ограничение, то $P_{\text{норм}}(X_{\text{мин}})$ недооценивается, поскольку знаменатель формулы будет включать вероятности невозможных значений X . Следует отметить, что значение $P_{\text{норм}}(X_{\text{мин}})$ само по себе не говорит о том, насколько «хорошо» или «плохо» работает система. Интерпретация этого значения зависит от конкретного контекста и значения X . Даже небольшое значение $P_{\text{норм}}(X_{\text{мин}})$ может быть неприемлемым, если указывает на риск загрязнения окружающей среды и угрозу здоровью людей, проживающих или работающих вблизи стройки. Таким образом, данная формула предполагает заранее определить, какой уровень $P_{\text{норм}}(X_{\text{мин}})$ является допустимым в конкретном контексте.

Более гибкая модель. Более гибкая модель реализуется в следующей формуле:

$$P(A) = P(A|B) \cdot P(B) + P(A|\neg B) \cdot P(\neg B), \quad (30)$$

где $P(A)$ — вероятность возникновения события A , т.е. вероятность наступления опасности, приводящей к аварии или негативным последствиям для окружающей среды (например, работа системы очистки воды); $P(A|B)$ — условная вероятность наступления события A при условии срабатывания системы безопасности B . Это означает, что $P(A|B)$ оценивает вероятность возникновения опасности в случае, если система безопасности сработает и предотвратит аварию или снизит ее последствия (вероятность эффективной очистки воды при наличии электроснабжения); $P(B)$ — вероятность срабатывания системы безопасности B (штатная работа электроснабжения, необходимого для работы системы очистки); $P(A|\neg B)$ — условная вероятность наступления события A при условии, что система безопасности B не сработает. Это означает, что $P(A|\neg B)$ оценивает вероятность возникновения опасности в случае, если система безопасности не сработает и не предотвратит аварию или снизит ее последствия (например, вероятность очистки воды при отключении электроснабжения возможна за счет резервного генератора); $P(\neg B)$ — вероятность того, что система безопасности B не сработает (отключение электроснабжения).

Формула (32) еще больше уточняет модель, рассматривая как сценарий штатного функционирования системы безопасности (B), так и сценарий ее несрабатывания ($\neg B$). В ней суммируются вероятности двух сценариев (сценарий 1 (B): электроснабжение работает штатно, вероятность эффективной очистки воды в этом случае — $P(A|B)$; сценарий 2 ($\neg B$): электричество отключено, вероятность эффективной очистки воды — $P(A|\neg B)$). Эта модель позволяет учесть влияние мер по предотвращению аварии или снижению ее последствий, что делает оценку вероятности более реалистичной. В отличие от экспоненциального распределения, которое определяется только параметром α и не учитывает влияние внеш-

них факторов, эта формула более гибкая и адаптируемая к различным сценариям, дает возможность моделировать ситуации, когда вероятность наступления события A зависит от различных факторов, включая срабатывание системы безопасности B . По сравнению с формулой (29) данный подход рассматривает влияние действия системы безопасности B на вероятность наступления события A , а также включает анализ неопределенности в срабатывании системы безопасности B и ее влияние на вероятность наступления события A . Она позволяет учитывать различные сценарии и вероятности наступления события A при различных условиях системы предотвращения ущерба.

Еще раз подчеркнем. Формула $R = P \cdot C$ в различных ее видах предполагает, что риск является линейной функцией вероятности и последствий, т.е. риск увеличивается пропорционально увеличению P или C . Тем не менее в реальной жизни риск не всегда является линейной функцией. Например, сценарий с низкой вероятностью и высоким ущербом может быть более опасным, чем сценарий с высокой вероятностью и низким ущербом. Рассмотрим следующие два сценария:

Сценарий 1: Вероятность аварии составляет 1 %, а ущерб в случае аварии — 1 млрд руб. Тогда $R = 0,01 \cdot 1\,000\,000\,000$ руб. = 10 000 000 руб.

Сценарий 2: Вероятность аварии составляет 10 %, а ущерб в случае аварии — 10 млн руб. Тогда $R = 0,1 \cdot 10\,000\,000$ руб. = 10 000 000 руб.

В соответствии с формулой $R = P \cdot C$ количественное значение риска для обоих сценариев одинаково и равно 10 млн руб. Однако, очевидно, что сценарий 1 является более опасным, чем сценарий 2, тем самым в указанной формуле не учитывается тот факт, что ущерб от аварии может иметь более сильное влияние на риск, чем вероятность аварии. Для учета нелинейности риска в настоящее время используются различные методы корректировки факторов вероятности и последствий [29, 30].

Полуколичественный подход. ГОСТ Р 51898–2002 «Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты» и вслед за ним ГОСТ Р 12.0.006–2002 «Система стандартов безопасности труда. Общие требования к системе управления охраной труда в организации» трактуют риск R как сочетание вероятности P нанесения ущерба и тяжести (S) этого ущерба. В ГОСТ Р ISO 31000–2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» понятие риска определяется в соответствии с ISO 31000 и служит для прояснения менеджмента любых типов риска как влияния неопределенности на цели. Риск описывается более оптимальной в оценке рисков формулой:

$$\begin{aligned} \text{Риск}(R) &= \\ &= \text{Вероятность}(P) \cdot \text{Тяжесть события}(S), \end{aligned} \quad (31)$$

где «Тяжесть события» (Severity of the event) означает значительность последствий; вред, который может

нанести опасность; стохастические условия реализации решения; подверженность возможности потерять неблагоприятные или благоприятные обстоятельства; шанс или ситуацию ожидаемых потерь или достижения цели; интенсивность, размер и величину того, что ценят (жизни, окружающую среду, деньги и т.д.). Потери и выгоды, например, выраженные в деньгах или числе погибших, являются способами определения серьезности последствий. При этом здесь речь идет о рисках как воздействии неопределенности (условий недостатка информации) на поставленные цели. Ущерб рассматривается как нанесение физического повреждения или другого вреда здоровью людей, или вреда имуществу или окружающей среде. Соответственно, безопасность понимается как отсутствие недопустимого риска; опасность — как потенциальный источник возникновения ущерба; допустимый риск — как тот, который в данной ситуации считают приемлемым при существующих общественных ценностях.

ГОСТ Р 54135–2010 «Экологический менеджмент. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Защита экологических природных зон. Общие аспекты и мониторинг» рассматривает риск как сочетание вероятности события и его последствий. Это есть вероятность нанесения вреда окружающей среде с учетом его тяжести.

Из содержания ГОСТ Р 54934–2012/OHSAS 18001:2007 «Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования» следует, что вероятность и последствия нежелательного или опасного события могут быть условно классифицированы. Обычно их разделяют на 5 рангов, каждый из которых характеризуется, например, следующими качественными показателями: минимальный, низкий, средний, высокий и максимальный (в зависимости от поставленных целей и обоснованной точности оценки риска степеней может быть и 3, и 10, и т.д., дополненных весовыми коэффициентами). Затем

этим уровням присваиваются соответствующие цвета опасности или баллы, например от 1 до 5 (табл. 7).

В матрице рисков «тяжесть события» часто ранжируется по 4-балльной шкале следующим образом (табл. 8).

Далее строится матрица рисков. Соответствующие области рисков наглядно окрашиваются в цвета степени опасности и отмечаются соответствующей цифрой произведения вероятности (P) и последствий события (S). Уровень риска с ростом вероятности и последствий события растет от зеленого к красному, или от 1 до 25. Тем самым полуколичественный метод представления рисков облегчает задачу разработки соответствующих мероприятий по обеспечению их снижения на соответствие требованиям стандартов (табл. 9).

Таким образом, на основе оценки вероятности наступления и размера ущерба можно рассчитать как количественное, так и качественное значение риска.

Сценарный подход. Более совершенным в оценке риска является сценарный подход с параметрами, которые позволяют корректировать факторы вероятности и последствий. Как уже отмечалось, риск не всегда — линейная функция: сценарий с низкой вероятностью и высоким ущербом может быть более опасным, чем сценарий с высокой вероятностью и низким ущербом. Этому есть объяснение. Согласно классической парадигме относительной частоты, вероятность интерпретируется как повторяющееся бесконечное число раз. Событие происходит, если анализируемая ситуация гипотетически «повторялась». Следовательно, оценки риска могут быть более или менее точными по сравнению с лежащим в основе истинным риском. В этом случае неопределенности в оценках могут быть очень большими и их трудно выразить. С точки зрения байесовской перспективы вероятность представляется как мера неопределенности событий и последствий, рассматриваемая аналитиком риска и основанная на доступной исходной информации.

Табл. 7. Ранжирование риска нежелательного или опасного события

Table 7. Ranking the risk of an undesirable or dangerous event

Тип риска Risk type	Обозначение Designation	Баллы Points
Минимальный (очень низкий) риск Minimal (very low) risk	OHP VLR	$0 < P < 5$
Низкий риск Low risk	HP LR	$5 < P < 10$
Средний риск Average risk	CP AR	$10 < P < 15$
Высокий риск High risk	BP HR	$15 < P < 20$
Максимальный (очень высокий) риск Maximum (very high) risk	OBP VHR	$20 < P < 25$

Табл. 8. Шкала уровней риска

Table 8. Risk level scale

Уровень риска Risk level	Описание Description	Баллы Points
Малый Small	Условия эксплуатации окружающей среды не представляют опасности и не наносят потерь системе «промышленный объект – природа». Тем не менее фоновые значения риска негативного воздействия сохраняются, ухудшая качество природной среды. Они приведут к менее чем незначительным последствиям. Те особи, для которых помехи оказались непреодолимыми, погибнут Environmental operating conditions do not pose a danger and do not cause losses to the “industrial facility – nature” system. Nevertheless, the background values of the risk of negative impact remain, worsening the quality of the natural environment. They will result in less than minor consequences. Those individuals for whom the obstacles turned out to be insurmountable will die	1
Незначительный Insignificant	Недостатки негативного воздействия на экосистемы могут быть устранены или контролироваться без серьезных повреждений природных объектов, подчиняющихся закону внутреннего динамического равновесия Disadvantages of negative impact on ecosystems can be eliminated or controlled without serious damage to natural objects that obey the law of internal dynamic equilibrium	2
Критический Critical	Недостатки эксплуатации природных активов могут привести к тяжелым травмам, заболеваниям или серьезным потерям в системе “промышленный объект – природа”. Требуется незамедлительно принять корректирующие меры Deficiencies in the operation of natural assets can lead to severe injuries, illnesses or serious losses in the industrial facility – nature system. Corrective action must be taken immediately	3
Катастрофический Catastrophic	Условия эксплуатации окружающей среды таковы, что антропогенная нагрузка превысила способность природы к самовосстановлению. Человеческий фактор, недостатки конструкции, отказ элементов, подсистем или компонентов, а также недостатки процедуры могут привести к гибели людей, серьезным потерям видов в экосистеме. С точки зрения принципа Ле Шательера – Брауна, данный уровень потерь может вызвать гибель соответствующей экосистемы. Требуется немедленное прекращение небезопасной деятельности Environmental operating conditions are such that the anthropogenic load has exceeded nature’s ability to self-heal. Human error, design flaws, failure of elements, subsystems or components, and procedural deficiencies can result in loss of life and serious loss of species in an ecosystem. From the point of view of the Le Chatelier – Brown principle, this level of losses can cause the death of the corresponding ecosystem. Immediate cessation of unsafe activities is required	4

Табл. 9. Ранговая матрица риска

Table 9. Risk ranking matrix

Очень высокая. Очень вероятно (1 раз в полгода) Very high. very likely (once every six months)	5	CP_5 AR_5	BP_{10} HR_{10}	OBP_{15} VHR_{15}	OBP_{20} VHR_{20}	OBP_{25} VHR_{25}
Высокая. Вероятно (1 раз в год) High. Probably (once a year)	4	HP_4 LR_4	CP_8 AR_8	BP_{12} HR_{12}	BP_{16} HR_{16}	OBP_{20} VHR_{20}
Средняя. Возможно (1 раз в 5 лет) Average Maybe (once every 5 years)	3	ONP_3 VLR_3	HP_6 LR_6	CP_9 AR_9	BP_{12} HR_{12}	OBP_{15} VHR_{15}

Низкая. Маловероятно (1 раз в 10 лет) Low Unlikely (once every 10 years)	2	OHP ₂ VLR ₂	HP ₄ LR ₄	HP ₆ LR ₆	CP ₈ AR ₈	BP ₁₀ HR ₁₀
Очень низкая. Крайне маловероятно (1 раз в 25 лет) Very low Extremely unlikely (once every 25 years)	1	OHP ₁ VLR ₁	OHP ₂ VLR ₂	OHP ₃ VLR ₃	HP ₄ LR ₄	CP ₅ AR ₅
		1	2	3	4	5
Вероятность (P) Probability (P)		Незначительные Minor	Ограниченные Limited	Тяжелые Severe	Очень тяжелые Very severe	Катастрофические Catastrophic
		Последствия (тяжесть) событий (S) Consequences (severity) of events (S)				

В этом случае вероятность — это субъективная мера неопределенности, зависящая от доступного ее знания. Эталоном является некий стандарт, назначенный оценщиком риска, но при этом нет ссылки на правильную или истинную вероятность. Назначенные вероятности зависят от конкретных базовых знаний и могут давать неверные прогнозы. В этих условиях сценарный подход можно назвать более достоверным и полным в плане анализа и оценки рисков. Он заключается в том, что рассматриваются различные сценарии развития событий, которые могут привести к возникновению риска. Для каждого сценария оценивается вероятность его наступления и размер ущерба, который может быть причинен в случае его реализации, т.е. для каждого сценария идентифицируется его описание si , вероятность его наступления pi и последствия, которые могут быть причинены в случае его реализации xi [31]:

$$R = \{(si, pi, xi)\}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (32)$$

Такой подход имеет ряд преимуществ. Во-первых, он позволяет учитывать различные сценарии развития событий, что делает оценку рисков более полной и достоверной. Во-вторых, он дает возможность оценивать риски в количественном выражении, что упрощает их сопоставление и принятие решений по управлению рисками.

Рассмотрим несколько примеров, которые иллюстрируют преимущества такого подхода.

Пример 1.

Предположим, что рассматривается строительство нового завода. Для оценки экологических рисков необходимо рассмотреть следующие сценарии:

Сценарий 1: авария на производственном оборудовании, приводящая к выбросу ЗВ в окружающую среду (возможный ущерб 100 млн руб.).

Описание (si): авария на производственном оборудовании, в результате которой в окружающую среду попадают ЗВ.

Вероятность (pi): 0,01 — вероятность того, что авария произойдет в течение одного года.

Последствия (xi):

- загрязнение воздуха и воды;
- поражение флоры и фауны;
- ухудшение качества жизни людей.

Сценарий 2: разлив нефтепродуктов при транспортировке сырья (возможный ущерб 200 млн руб.).

Описание (si): разлив нефтепродуктов при транспортировке сырья.

Вероятность (pi): 0,02 — вероятность того, что разлив произойдет в течение одного года.

Последствия (xi):

- загрязнение почвы и воды;
- поражение флоры и фауны;
- ухудшение качества жизни людей.

Сценарий 3: нарушение правил обращения с опасными отходами, приводящее к их попаданию в окружающую среду (возможный ущерб 300 млн руб.).

Описание (si): нарушение правил обращения с опасными отходами, в результате которого в окружающую среду попадают опасные отходы.

Вероятность (pi): 0,03 — вероятность того, что нарушение произойдет в течение одного года.

Последствия (xi):

- загрязнение почвы, воды и воздуха;
- поражение растений и животных;
- угроза здоровью людей.

Сценарий 4: нарушение правил эксплуатации инженерных систем, приводящее к загрязнению окружающей среды (возможный ущерб 400 млн руб.).

Описание (si): нарушение правил эксплуатации инженерных систем, в результате которого в окружающую среду попадают ЗВ.

Вероятность (pi): 0,04 — вероятность того, что нарушение произойдет в течение одного года.

Последствия (xi):

- загрязнение воздуха и воды;

Табл. 10. Размер ущерба в случае его реализации

Table 10. Amount of damage if realized

Сумма ущерба, млн руб. Amount of damage, mln rub	Номер сценария Scenario number
$R = 0,01 \cdot 100\,000\,000 = 1\,000\,000$	Сценарий 1 Scenario 1
$R = 0,02 \cdot 200\,000\,000 = 4\,000\,000$	Сценарий 2 Scenario 2
$R = 0,03 \cdot 300\,000\,000 = 9\,000\,000$	Сценарий 3 Scenario 3
$R = 0,04 \cdot 400\,000\,000 = 16\,000\,000$	Сценарий 4 Scenario 4

- поражение растений и животных;
- ухудшение качества жизни людей.

Для каждого сценария необходимо оценить вероятность его наступления и размер ущерба в случае его реализации:

- вероятность аварии на производственном оборудовании оценивается на основе анализа данных об аналогичных авариях, произошедших на других предприятиях;

- вероятность разлива нефтепродуктов оценивается на основе анализа данных о частоте и масштабах аварий на транспорте;

- вероятность нарушения правил обращения с опасными отходами оценивается на основе анализа данных о соблюдении этих правил на других предприятиях;

- размер ущерба, причиненный в случае аварии на производственном оборудовании, зависит от типа загрязняющих веществ, которые выпущены в окружающую среду, их количества и концентрации;

- размер ущерба в случае разлива нефтепродуктов зависит от количества разлившихся нефтепродуктов, их свойств и места разлива;

- размер ущерба вследствие нарушения правил обращения с опасными отходами зависит от типа опасных отходов, их количества и свойств.

Количественное значение риска (R) рассчитывается по формуле (32) (табл. 10).

Таким образом, сценарный подход на основе оценки вероятности наступления и размера ущерба для каждого сценария позволяет рассчитать не только более полное и достоверное количественное значение риска, но и его полуколичественные характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка ЭР является важным инструментом для обеспечения экологической безопасности в сфере жилищного и промышленного строительства. Выбор методов оценки экологического риска зависит от конкретных условий строительства и требований, предъявляемых к экологической безопасности. Сценарный подход является одним из наиболее эффективных методов оценки ЭР, который позволяет

учесть все возможные сценарии развития событий и оценить их последствия.

Но остаются вопросы, каким образом следует определить понятие «экологический риск»? Какие характеристики должны учитываться при определении экологического риска? Необходимо разработать более точное определение экологического риска в строительстве при формулировании экологических мероприятий и оценке соответствия их выполнения (возможна разработка аналога японской системы экологической безопасности CASBEE). Смысл ЭР связан не только с определением степени опасного или катастрофического воздействия промышленных источников на природу в пределах допустимых показателей и материального ущерба в виде налогов, сборов, тарифов, различных возмещающих платежей и штрафов (плату за природные ресурсы можно рассчитывать как дополнительный доход от использования природного ресурса повышенной продуктивности, так и на основе издержек замещения данного ресурса). Экологический риск также предполагает анализ и оценку:

- уязвимости природной среды (чем уязвимее экосистема, тем выше риск негативного воздействия, тем более рискованным и скачкообразным может быть смещение природного равновесия);
- величины экологического резерва;
- порога экологической безопасности.

Характеристика природных уязвимостей является условием сохранения равновесного состояния экосистемы и, следовательно, природного баланса, включая среду обитания человека. Если с 2008 по 2017 г. ежегодно выбрасывалось в атмосферу около 40 гигатонн парниковых газов в результате сжигания ископаемого топлива и изменений в землепользовании, то такого рода интенсивный процесс негативного воздействия стал причиной накопления огромных потерь окружающей среды: по массе выбросы заместили обитание на планете 252 млн голубых китов на многие сотни лет вперед в рамках сбалансированной сукцессии (последовательной смены биоценозов, протекающих под влиянием как внешних, так и внутренних факторов). Необратимое катастрофическое смещение природного баланса, напри-

мер, стабильность биосферы окажется подорванной при потере 20–30 % видов, приведет к переоценке критериев экологического состояния природных объектов и тем самым к отказу от исходных значений антропогенных факторов окружающей среды, столь важных для надежного использования строительных объектов и промышленных технологий. Разработка указанного контекста сценарного подхода требует дальнейших исследований⁴ [32–36].

Предметом дальнейшего изучения является и сценарный подход. Как следует применять сценарный подход для оценки ЭР в строительстве? Какие рекомендации можно дать по применению сценарного подхода? Из анализа проблемы ясно, что при применении сценарного подхода необходимо учитывать следующие этапы: 1) выявить все возможные сценарии развития событий, которые могут привести к негативному воздействию на окружающую среду; 2) оценить вероятность наступления каждого сценария; 3) определить тяжесть последствий каждого сценария; 4) рассчитать риск как произведение ве-

роятности наступления сценария и тяжести его последствий. Кроме того, оценка ЭР является лишь первым шагом на пути к обеспечению экологической безопасности строительства. Необходимо также разрабатывать и внедрять меры по снижению ЭР до приемлемого уровня. Авторами приведены меры по снижению вероятности опасности и меры по снижению последствий опасности при строительстве.

Таким образом, в ходе исследования предлагается новый комбинированный метод оценки ЭР в строительстве, сочетающий в себе количественную оценку на основе теории вероятностей, полуколичественный подход с использованием матриц рисков и качественный анализ на основе сценариев. Этот метод позволяет получить более полную и точную оценку риска, учитывая различные потенциальные сценарии и их последствия, а также неопределенность, присущую прогнозированию экологических рисков. Применение метода демонстрируется на примерах строительных проектов, показывая, как результаты оценки риска могут быть использованы для принятия решений по управлению проектами и снижению рисков. Разработанный метод оценки ЭР дает возможность повысить эффективность управления экологической безопасностью в сфере жилищного и промышленного строительства.

⁴ Рекомендации по охране окружающей среды в районной планировке // Центральный научно-исследовательский и проектный институт по градостроительству. М. : Стройиздат, 1986.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Vinogradova N., Kravchenko D., Kurochkina V.V.* Impact of construction activities on the environment of cities // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 937. Issue 4. P. 042019. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042019

2. *Yamagami M., Ikemori F., Nakashima H., Hisatsune K., Ueda K., Wakamatsu S. et al.* Trends in PM_{2.5} concentration in Nagoya, Japan, from 2003 to 2018 and impacts of PM_{2.5} countermeasures // Atmosphere. 2021. Vol. 12. Issue 5. P. 590. DOI: 10.3390/atmos12050590

3. *Desouza C.D., Marsh D.J., Beevers S.D., Molden N., Green D.C.* A spatial and fleet disaggregated approach to calculating the NOX emissions inventory for non-road mobile machinery in London // Atmospheric Environment: X. 2021. Vol. 12. P. 100125. DOI: 10.1016/j.aea.2021.100125

4. *Кравцова М.В., Васильев А.В., Нагайцева М.П., Кравцов А.В.* Номенклатурный анализ объемов образования отходов строительства и сноса // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 4–4. С. 810–816. EDN WTPZXZ.

5. *Костюченко Е.* «Норникель» прямо сейчас сливает ядовитые отходы в озеро Пясино. Спецкоры «Новой» и «Гринпис» передают с места событий // Новая газета от 28.06.2020.

6. *Яковенко Д., Ляликова А.* «Мы болеем и умираем»: чего добился «Норникель», потратив десятки миллиардов рублей на экологию // Forbes. 2020. URL:

<https://www.forbes.ru/milliardery/405047-my-boleem-i-umiraem-chego-dobilysya-nornikel-potrativ-desyatki-milliardrov-rublej?ysclid=lq7q54qva3309658738>

7. *Kurochkina V.V.* Formation of depressive areas in the area of quarries and mines on the example of the city of Bakal // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. Vol. 575. Pp. 1–12. DOI: 10.1007/978-3-031-21219-2_1

8. *Рыжанушкина Ю.А., Габрин К.Э.* Эколого-ориентированный подход к управлению инновационным развитием регионального строительного комплекса // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2018. Т. 12. № 1. С. 133–141. DOI: 10.14529/em180116. EDN YTMJPW.

9. *Шубина Е.В., Жук П.М., Потапов А.Д.* Методы оценки экологических рисков в строительстве // Вестник МГСУ. 2009. № 2. С. 143–147. EDN KYKZKP.

10. *Смирнова О.П., Вавилова М.А.* Методические подходы к управлению рисками при внедрении системы экологического менеджмента на промышленном предприятии // Вестник Академии знаний. 2023. № 1 (54). С. 409–415. EDN TPKIRS.

11. *Вернадский В.И.* Биосфера и ноосфера. М. : Айрис-пресс, 2012.

12. *Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L.* Limits to Growth. The 30-Year Update. London : Earthscan, 2006.

13. *Balsalobre-Lorente D., Nur T., Topaloglu E.E., Evcimen C.* The dampening effect of geopolitical risk and economic policy uncertainty in the linkage between economic complexity and environmental degradation in the G-20 // *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 351. P. 119679. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119679
14. *Smirnova E.* Environmental risk analysis in construction under uncertainty // *Reconstruction and Restoration of Architectural Heritage*. 2020. Pp. 222–227. DOI: 10.1201/9781003129097-47
15. *Nezhnikova E., Larionov A., Smirnova E.* Ecological risk assessment to substantiate the efficiency of the economy and the organization of construction // *Human and Ecological Risk Assessment*. 2021. Vol. 27. Issue 8. Pp. 2069–2079. DOI: 10.1080/10807039.2021.1949262
16. *Moazeni M., Ebrahimpour K., Mohammadi F., Heidari Z., Ebrahimi A.* Human health risk assessment of Triclosan in water: Spatial analysis of a drinking water system // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195. Issue 10. DOI: 10.1007/s10661-023-11789-3
17. *Nguyen H.D., Macchion L.* Risk management in green building : a review of the current state of research and future directions // *Environment, Development and Sustainability*. 2022. Vol. 25. Issue 3. Pp. 2136–2172. DOI: 10.1007/s10668-022-02168-y
18. *Smirnova E.* The use of the Monte Carlo method for predicting environmental risk in construction zones // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1614. Issue 1. P. 012083. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012083
19. *Kalia A., Gill S.* Corporate governance and risk management: A systematic review and synthesis for future research // *Journal of Advances in Management Research*. 2023. Vol. 20. Issue 3. Pp. 409–461. DOI: 10.1108/JAMR-07-2022-0151
20. *Jamalnia A., Gong Y., Govindan K., Bourlakis M., Mangla S.K.* A decision support system for selection and risk management of sustainability governance approaches in multi-tier supply chain // *International Journal of Production Economics*. 2023. Vol. 264. P. 108960. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108960
21. *Wang X., Bouzemrak Y., Oude Lansink A.G.J.M., van der Fels-Klerx H.J.* Weighted Bayesian network for the classification of unbalanced food safety data: Case study of risk-based monitoring of heavy metals // *Risk Analysis*. 2023. Vol. 43. Issue 12. Pp. 2549–2561. DOI: 10.1111/risa.14120
22. *Proto R., Recchia G., Dryhurst S., Freeman A.L.J.* Do colored cells in risk matrices affect decision-making and risk perception? Insights from randomized controlled studies // *Risk Analysis*. 2023. Vol. 43. Issue 10. Pp. 2114–2128. DOI: 10.1111/risa.14091
23. *Смирнова Е.Э.* Оценка рисков в российских и международных стандартах безопасности и устойчивого развития // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2023. № 1 (46). С. 57–71. EDN OFRJSZ.
24. *Теличенко В.И., Слесарев М.Ю.* Проблема и решение системы оценки экологической безопасности строительства в мегаполисе // *Экология урбанизированных территорий*. 2013. № 1. С. 13–17. EDN PZTSLL.
25. *Slesarev M., Kovrigin A., Kafanova J.* Mathematical and mental modeling for ecological reconstruction of the environment of construction objects // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. Issue 6. P. 062017. DOI: 10.1088/1757-899X/869/6/062017
26. *Slesarev M.* Modeling and formation of environmental safety management systems of construction technologies // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 258. P. 09084. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809084
27. *Smirnova E., Larionov A., Shkarovskiy A.* Risk management model in ISO-standards as the implementation of environmental safety for housing construction // *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. Vol. 25. Pp. 282–288. DOI: 10.54740/ros.2023.030
28. *Larionov A., Nezhnikova E., Smirnova E.* Risk assessment models to improve environmental safety in the field of the economy and organization of construction: A case study of Russia // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Issue 24. P. 13539. DOI: 10.3390/su132413539
29. *Zhang Z., Gong J., Plaza A., Yang J., Li J., Tao X. et al.* Long-term assessment of ecological risk dynamics in Wuhan, China: Multi-perspective spatiotemporal variation analysis // *Environmental Impact Assessment Review*. 2024. Vol. 105. P. 107372. DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107372
30. *Aven T., Renn O.* Risk Management and Governance. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-13926-0
31. *Kaplan S., Garrick B.J.* On the quantitative definition of risk // *Risk Analysis*. 1981. Vol. 1. Issue 1. Pp. 11–27. DOI: 10.1111/J.1539-6924.1981.TB01350.X
32. *Смирнова Е.Э.* Экологические стандарты управления качеством окружающей среды. СПб. : СПбГАСУ, 2023.
33. *Моисеенкова Т.А., Хаскин В.В.* Методика расчета экологической техноёмкости территории (к проекту 2.5.6.). М. : Российская экономическая академия им. Г.В. Плеханова, 1992.
34. *Теличенко В.И., Ланидус А.А., Слесарев М.Ю.* Анализ и синтез образов экологически ориентированных инновационных технологий строительного производства // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 8. С. 1298–1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305. EDN RNDOCL.
35. *Реймерс Н.Ф.* Природопользование : словарь-справочник. М. : Мысль, 1990. 637 с.
36. *Никулина Н.Л.* Проблемы оценки экологической безопасности региона // *Экономика региона*. 2008. № S4. С. 62–67. EDN JWWVPZ.

Поступила в редакцию 11 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 10 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 14 октября 2024 г.

О Б АВТОРАХ: **Аркадий Николаевич Ларионов** — доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики и управления в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655750, Scopus: 55817390000, ResearcherID: I-2797-2013, ORCID: 0000-0001-9706-5131; prof.larionov@mail.ru;

Елена Эдуардовна Смирнова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры техносферной безопасности; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 438628, Scopus: 57074849400, ResearcherID: ABG-5327-2021, ORCID: 0000-0002-9860-9230; esmirnovae@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vinogradova N., Kravchenko D., Kurochkina V.V. Impact of construction activities on the environment of cities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 937(4):042019. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042019
2. Yamagami M., Ikemori F., Nakashima H., Hisatsune K., Ueda K., Wakamatsu S. et al. Trends in PM_{2.5} concentration in Nagoya, Japan, from 2003 to 2018 and impacts of PM_{2.5} countermeasures. *Atmosphere*. 2021; 12(5):590. DOI: 10.3390/atmos12050590
3. Desouza C.D., Marsh D.J., Beevers S.D., Molden N., Green D.C. A spatial and fleet disaggregated approach to calculating the NOX emissions inventory for non-road mobile machinery in London. *Atmospheric Environment: X*. 2021; 12:100125. DOI: 10.1016/j.aea0a.2021.100125
4. Kravtsova M., Vasilyev A., Nagaytseva M., Kravtsov A. Nomenclatural analysis of volumes of waste construction and dismantling. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015; 17(4-4): 810-816. EDN WTPXZX. (rus.)
5. Kostyuchenko E. Norilsk Nickel is right now dumping toxic waste into Lake Pyasino. Special correspondents from Novaya and Greenpeace report from the scene. *New newspaper* dated of 28.06.2020.
6. Yakovenko D., Lyalikova A. "We are sick and dying": What Norilsk Nickel achieved by spending tens of billions of rubles on the environment. *Forbes* dated of 04.08.2020. URL: <https://www.forbes.ru/milliardery/405047-my-boleem-i-umiraem-chego-dobil-sya-nornikel-potrativ-desyatki-milliardrov-rublej?ysclid=lq7q54qva3309658738>
7. Kurochkina V.V. Formation of depressive areas in the area of quarries and mines on the example of the city of Bakal. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023; 575:1-12. DOI: 10.1007/978-3-031-21219-2_1
8. Ryzhanushkina Yu.A., Gabrin K.E. Environmentally oriented approach to management of innovative development of regional construction complex. *Bulletin of SUSU. Series "Economics and Management"*. 2018; 12(1):133-141. DOI: 10.14529/em180116. EDN YTMJPW. (rus.)
9. Shubina Ye.V., Zhuk P.M., Potapov A.D. Methods for assessing environmental risks in construction. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2009; 2:143-147. EDN KYKZKP. (rus.)
10. Smirnova O.P., Vavilova M.A. Methodological approaches to risk management in the implementation of an environmental management system at an industrial enterprise. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2023; 1(54):409-415. EDN TPKIRS. (rus.)
11. Vernadskiy V.I. *Biosphere and noosphere*. Moscow, Iris-press, 2012. (rus.)
12. Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. Limits to Growth. *The 30-Year Update*. London, Earthscan, 2006.
13. Balsalobre-Lorente D., Nur T., Topaloglu E.E., Evcimen C. The dampening effect of geopolitical risk and economic policy uncertainty in the linkage between economic complexity and environmental degradation in the G-20. *Journal of Environmental Management*. 2024; 351:119679. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119679
14. Smirnova E. Environmental risk analysis in construction under uncertainty. *Reconstruction and Restoration of Architectural Heritage*. 2020; 222-227. DOI: 10.1201/9781003129097-47
15. Nezhnikova E., Larionov A., Smirnova E. Ecological risk assessment to substantiate the efficiency of the economy and the organization of construction. *Human and Ecological Risk Assessment*. 2021; 27(8):2069-2079. DOI: 10.1080/10807039.2021.1949262
16. Moazeni M., Ebrahimpour K., Mohammadi F., Heidari Z., Ebrahimi A. Human health risk assessment of Triclosan in water: Spatial analysis of a drinking water system. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023; 195(10). DOI: 10.1007/s10661-023-11789-3
17. Nguyen H.D., Macchion L. Risk management in green building : a review of the current state of research

and future directions. *Environment, Development and Sustainability*. 2022; 25(3):2136-2172. DOI: 10.1007/s10668-022-02168-y

18. Smirnova E. The use of the Monte Carlo method for predicting environmental risk in construction zones. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1614(1):012083. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012083

19. Kalia A., Gill S. Corporate governance and risk management : a systematic review and synthesis for future research. *Journal of Advances in Management Research*. 2023; 20(3):409-461. DOI: 10.1108/JAMR-07-2022-0151

20. Jamalnia A., Gong Y., Govindan K., Bourlakis M., Mangla S.K. A decision support system for selection and risk management of sustainability governance approaches in multi-tier supply chain. *International Journal of Production Economics*. 2023; 264:108960. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108960

21. Wang X., Bouzembrak Y., Oude Lansink A.G.J.M., van der Fels-Klerx H.J. Weighted Bayesian network for the classification of unbalanced food safety data: Case study of risk-based monitoring of heavy metals. *Risk Analysis*. 2023; 43(12):2549-2561. DOI: 10.1111/risa.14120

22. Proto R., Recchia G., Dryhurst S., Freeman A.L.J. Do colored cells in risk matrices affect decision-making and risk perception? *Insights from randomized controlled studies*. *Risk Analysis*. 2023; 43(10):2114-2128. DOI: 10.1111/risa.14091

23. Smirnova E.E. Risk assessment in Russian and international safety and sustainable development standards. *Modern Problems of Civil Protection*. 2023; 1(46):57-71. EDN OFRJSZ. (rus.).

24. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. System of assessment of ecological safety of construction processes in the megalopolis: problem and solution. *Ecology of Urban Areas*. 2013; 1:13-17. EDN PZTSLL. (rus.).

25. Slesarev M., Kovrigin A., Kafanova J. Mathematical and mental modeling for ecological reconstruction of the environment of construction objects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(6):062017. DOI: 10.1088/1757-899X/869/6/062017

26. Slesarev M. Modeling and formation of environmental safety management systems of construction

technologies. *E3S Web of Conferences*. 2021; 258:09084. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809084

27. Smirnova E., Larionov A., Shkarovskiy A. Risk management model in ISO-standards as the implementation of environmental safety for housing construction. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023; 25:282-288. DOI: 10.54740/ros.2023.030

28. Larionov A., Nezhnikova E., Smirnova E. *Risk assessment models to improve environmental safety in the field of the economy and organization of construction: A case study of Russia*. *Sustainability*. 2021; 13(24):13539. DOI: 10.3390/su132413539

29. Zhang Z., Gong J., Plaza A., Yang J., Li J., Tao X. et al. Long-term assessment of ecological risk dynamics in Wuhan, China: Multi-perspective spatio-temporal variation analysis. *Environmental Impact Assessment Review*. 2024; 105:107372. DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107372

30. Aven T., Renn O. *Risk Management and Governance*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-13926-0

31. Kaplan S., Garrick B.J. *On the quantitative definition of risk*. *Risk Analysis*. 1981; 1(1):11-27. DOI: 10.1111/J.1539-6924.1981.TB01350.X

32. Smirnova E.E. *Environmental standards for environmental quality management*. St. Petersburg, SPbGASU, 2023. (rus.).

33. Moiseyenkova T.A., Khaskin V.V. *Methodology for calculating the environmental technical intensity of a territory (to project 2.5.6.)*. Moscow, Russian Economic Academy named after G.V. Plekhanov, 1992. (rus.).

34. Telichenko V.I., Lapidus A.A., Slesarev M.Yu. Analysis and synthesis of images of environmentally oriented innovative technologies of construction production. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(8):1298-1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305. EDN RNDACL. (rus.).

35. Reymers N.F. *Nature Management: Dictionary-reference Book*. Moscow, Mysl, 1990; 637. (rus.).

36. Nikulina N.L. Problems of the estimation of ecological safety of region. *Economy of Regions*. 2008; S4:62-67. EDN JWVWPZ. (rus.).

Received January 11, 2024.

Adopted in revised form on October 10, 2024.

Approved for publication on October 14, 2024.

BIONOTES: Arkady N. Larionov — Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Economics and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 655750, Scopus: 55817390000, ResearcherID: I-2797-2013, ORCID: 0000-0001-9706-5131; proflarionov@mail.ru;

Elena E. Smirnova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 438628, Scopus: 57074849400, ResearcherID: ABG-5327-2021, ORCID: 0000-0002-9860-9230; esmirnovae@yandex.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

Теоретические основы и практики реализации реинжиниринга в строительстве

Сергей Борисович Сборщиков^{1,2}, Наталья Валериевна Лазарева^{1,2}

¹Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»); г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС);
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются вопросы, связанные с жизненным циклом (ЖЦ) технических решений (ТР), особенностями их проявления и спецификой управления в строительстве. Анализ позволил сформулировать закономерности в выбранной предметной области, а также рекомендации по повышению эффективности корпоративной системы регулирования инвестиционно-строительной деятельности за счет реинжиниринга. Для подтверждения своих суждений авторы приводят практический опыт идентификации и регламентации ТР, используемых при проектировании, возведении и эксплуатации атомных станций (АС).

Материалы и методы. Теоретическими основами анализа реинжиниринга в строительстве явились положения следующих концепций: управления ЖЦ; логистики регулирующих воздействий; технического нормирования; устойчивого развития, а также инструменты системного анализа, такие как: логико-смысловое и имитационное моделирование, ретроспективный и функционально-структурный методы. Авторы опирались на существующий научный задел отечественных и зарубежных ученых в контексте проводимого исследования.

Результаты. Предложена классификация ТР в строительстве, определены закономерности развития ЖЦ ТР объектов капитального строительства (ОКС), в качестве подтверждения приведенных положений дан анализ практики идентификации и регламентации ТР, используемых при проектировании, возведении и эксплуатации АС.

Выводы. Жизненный цикл ТР в строительстве характеризуется проявлением как общих, так и специфических закономерностей, их учет при создании одноименной системы управления должен способствовать эффективному трансферу новаций в производственную сферу, формированию у строительных организаций конкурентных преимуществ за счет повышения качества строительной продукции, а для эксплуатирующих организаций удлинению ЖЦ ОКС и снижению стоимости эксплуатационных затрат.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: реинжиниринг, техническое решение, строительные организации, строительная отрасль, жизненный цикл, инвестиционно-строительная деятельность, техническое регулирование, система корпоративного регулирования, логистика регулирующих воздействий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Теоретические основы и практики реализации реинжиниринга в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1824–1834. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1824-1834

Автор, ответственный за переписку: Наталья Валериевна Лазарева, tous2004@mail.ru.

Theoretical foundations and practices of reengineering realization in construction

Sergej B. Sborshchikov^{1,2}, Natal'ya V. Lazareva^{1,2}

¹Research Center of Construction; Moscow, Russian Federation

²National University of Science and Technology «MISIS» (NUST MISIS); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The issues related to the life cycle of technical solutions, the peculiarities of their manifestation and the specifics of management in construction are considered. The analysis allowed to formulate regularities in the chosen subject area, as well as recommendations for improving the efficiency of the corporate regulatory system of investment and construction activities through reengineering. To confirm their judgments, the authors cite practical experience in identifying and regulating technical solutions used in the design, construction and operation of nuclear power plants (NPP).

Materials and methods. The theoretical foundations of the analysis of reengineering in construction were the provisions of the following concepts: life cycle management; logistics of regulatory influences; technical rationing; sustainable development, as well as methods of system analysis such as: logical-semantic and simulation modelling, retrospective and functional-structural methods, the reserve of domestic and foreign scientists in the context of the research.

Results. The classification of technical solutions in construction is proposed, the regularities of development of the life cycle of technical solutions for capital construction facilities are determined, as confirmation of the above provisions, an analysis of the practice of identification and regulation of technical solutions used in the design, construction and operation of nuclear power plants (NPP) is given.

Conclusions. The life cycle of technical solutions in construction is characterized by the manifestation of both general and specific patterns, their consideration when creating a management system of the same name should contribute to the effec-

tive transfer of innovations to the production sector, the formation of competitive advantages for construction organizations by improving the quality of construction products, and for operating organizations lengthening the life cycle of capital construction facilities and reducing the cost of operating costs.

KEYWORDS: reengineering, technical solution, construction organizations, construction industry, life cycle, investment and construction activities, technical regulation, corporate regulation system, logistics of regulatory impacts

FOR CITATION: Sborshchikov S.B., Lazareva N.V. Theoretical foundations and practices of reengineering realization in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1824-1834. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1824-1834 (rus.).

Corresponding author: Natal'ya V. Lazareva, tous2004@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Ускорение научно-технического прогресса связано со все более быстрым появлением технологических и продуктовых новаций. Их инновационность определяется новыми содержательными характеристиками, принципами производства, функционирования, расширенным назначением, функционалом и т.д. В свою очередь, такое качественное изменение содержания обусловлено прогрессивными инженерными (техническими) решениями (ТР). Их появление вызвано, с одной стороны, необходимостью формирования конкурентных преимуществ у производителей по отношению к их оппонентам на рынке, с другой — расширением запросов и требований потребителей. При этом следует указать, что подобные технико-технологические трансформации затрагивают как виды деятельности, связанные непосредственно с материальным производством, так и с управлением, а также сферой услуг. Они в полной мере свойственны и строительной отрасли, которая всегда отличалась большой социально-экономической значимостью в общественной жизни.

Из-за отраслевых особенностей, таких как продолжительность создания и эксплуатации объекта капитального строительства (ОКС), его трудоемкость, материалоемкость и стоимость, появляются противоречия между объективными предпосылками обновления строительной продукции и имеющимися инженерными решениями, овестьвленными в виде зданий и сооружений жилой застройки, промышленных производств, линейных и инфраструктурных объектов. Разрешение этого противоречия требует огромных затрат сил, средств и времени, но так или иначе будет иметь кратковременный эффект или будет опаздывать. Выходом из сложившейся ситуации представляется качественное преобразование действующих технических решений — реинжиниринг. Он может охватывать как сферу производства, так и сферу управления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве теоретической основы проведенного исследования была принята концепция, выдвинутая М. Хаммером и Дж. Чампи, согласно которой под реинжинирингом понимается качественная трансформация бизнес-процессов. Однако, учитывая развитие науки и техники, а также отраслевые особенности

строительства и национальные особенности экономики, можно считать обоснованным расширить спектр реинжиниринга и за счет трансформации материальных объектов. В этом направлении следует отметить труды С.Б. Сборщикова и П.А. Журавлева [1–8].

Создание научного задела применительно к организации систем управления в строительстве на разных уровнях иерархии и этапах жизненного цикла (ЖЦ), в том числе использование проектного управления при возведении уникальных, опасных, технически сложных объектов, связано с исследованиями ученых В.И. Малахова, Г.Н. Шинкаревой, Д.М. Лейбмана, Е.Е. Бахуса, И.Л. Киевского, Я.В. Жарова, А.П. Пустановгара [9–21].

Проблематика организации инновационной и научно-технической деятельности и направления ее совершенствования освещены С.В. Валдайцевым и А.Н. Плотноковым, а также Н.В. Лазаревой в рамках диссертации на соискание степени кандидата наук [22]. На формулирование авторами оригинальной концепции повлиял ряд работ в смежных отраслях знания [23–27]. Интеграция указанных выше исследовательских наработок позволяет сформировать базис нового научного направления — реинжиниринга в строительстве.

Цель исследования — идентификация закономерностей развития ЖЦ технических решений ОКС на основе анализа существующего научного задела в выбранной предметной области, а также практик реализации реинжиниринга с последующим обоснованием совершенствования системы корпоративного технического регулирования инвестиционно-строительной деятельности (ИСД). Таким образом, для достижения указанной цели необходимо решение следующих задач: классификация ТР в строительстве; установление закономерности развития ЖЦ технических решений ОКС, анализ практики идентификации и регламентации ТР, используемых при проектировании, возведении и эксплуатации атомных станций (АС). Подобная постановка задач в рамках теории, методологии и практики реинжиниринга строительства выполнена впервые, что определяет личный вклад авторов в развитие данного научного направления и приращение научного задела в нем.

Объектом исследования выбрана система корпоративного технического регулирования ИСД в контексте управления ЖЦ зданий и сооружений, методом — технические решения в строительстве.

С точки зрения практической ценности сформулированные положения и рекомендации должны способствовать эффективному трансферу новаций в производственную сферу, формированию у строительных организаций конкурентных преимуществ за счет повышения качества строительной продукции, а для эксплуатирующих организаций удлинению ЖЦ ОКС и снижению стоимости эксплуатационных затрат [28–37].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Техническое решение — это результат и продукт инженерной деятельности, связанный с теоретическими положениями, методологическими принципами, сложившимися практиками проектирования и конструирования в строительстве, а также условиями эксплуатации зданий и сооружений. Оно является квинтэссенцией инженерного замысла, которая характеризуется экономической целесообразностью и возможностью практической реализации.

Техническое решение в своем развитии проходит следующие этапы:

1) подготовка, в рамках которой формулируется цель, определяются задачи, анализируются существующие практики их решения;

2) разработка — на основе вариантной проработки осуществляется выбор наиболее рационального варианта;

3) практическая реализация — воплощение технического решения в материальной форме, либо его использование при создании строительной продукции;

4) устаревание (моральное и физическое) — утрата зданием или сооружением способности полностью или частично удовлетворять условиям безопасности, комфортности и конкурентоспособности.

Рассматривая приведенные выше этапы в контексте ЖЦ технических решений ОКС (рис.), можно отметить как их полное соответствие, так и некоторые отраслевые особенности. Например, этап подготовки разнесен по временной шкале ЖЦ ОКС относительно формирования ТР проектирования и непосредственного возведения здания или сооружения (соответственно п. 1 и п. 3 на рис.). Этап 2 указанной ретроспективы совпадает с п. 2, а этап 3 — практическая реализация имеет не только отношение к п. 4, но и к п. 5 (рис.), так как при эксплуатации ОКС для преодоления негативных последствий его морального и физического устаревания возможны качественные трансформации реализованных ТР посредством реконструкции, технического перевооружения или перепрофилирования.

Следует обратить внимание на характерный состав участников ИСД, сгруппированный исходя из выполняемых ими видов работ на этапах ЖЦ здания или сооружения. Так, разработка и реализация ТР, связанная с предпроектной подготовкой, проектно-исследовательскими работами, строительными и специальными работами, в рамках подрядного

или хозяйственного способа управления возведением здания предполагает наличие инжиниринговых компаний и подрядных организаций. Техническое обслуживание и производство ремонтно-восстановительных работ, а также демонтажных работ, работ по утилизации осуществляется эксплуатирующей организацией с привлечением специализированных подрядных и надзорных организаций. Для капитального ремонта, реконструкции, технического перевооружения, перепрофилирования, реставрации и ликвидации собственник объекта недвижимости при участии эксплуатирующей организации может привлечь не только подрядные фирмы, но и инжиниринговые и проектные компании.

Все технические решения имеют некий набор характеристик, подразделяемых по их важности на основные и вспомогательные (дополнительные). Впоследствии они воплощаются в соответствующих параметрах ОКС, технологического или управленческого процесса, организационной структуры.

Необходимые характеристики, совокупность которых отражает сущность, функциональное назначение ТР, квалифицируются как основные. Вспомогательные характеристики дополняют, уточняют основные признаки ТР.

Технические решения по уровню сложности конструктивного исполнения классифицируются как простые или сложные.

Сложные ТР имеют собственный состав и структуру, как правило, совпадающие с набором основных характеристик, которые можно рассматривать как технические решения уже со своими собственными основными и вспомогательными характеристиками. Вспомогательные характеристики сложных ТР описываются такими же закономерностями, что и основные. Технические решения, основные характеристики которых не представляют собой самостоятельные ТР, называются простыми.

Технические решения могут относиться к ОКС в целом, его части или к конструктивному элементу, и в зависимости от места приложения и назначения то или иное решение получает свое название.

Формируются ТР при проектировании, конструировании ОКС, которые отображаются в одноименной документации и являются синтезом параметрических схем (планировочных, расчетных, конструктивных, технологических, организационных), необходимых ресурсов (материалов, техники, кадров, информации) и способов их использования в соответствии с назначением и указанными схемами.

В процессе разработки отдельные ТР увязываются между собой, чтобы сформировать строительную продукцию, обладающую такими свойствами, как устойчивость, надежность, долговечность, безопасность. От детализации ТР зависит соответствие качества ОКС указанным свойствам и заданным параметрам. При вариантном проектировании ТР необходимо оценивать и сравнивать для выбора наиболее ра-

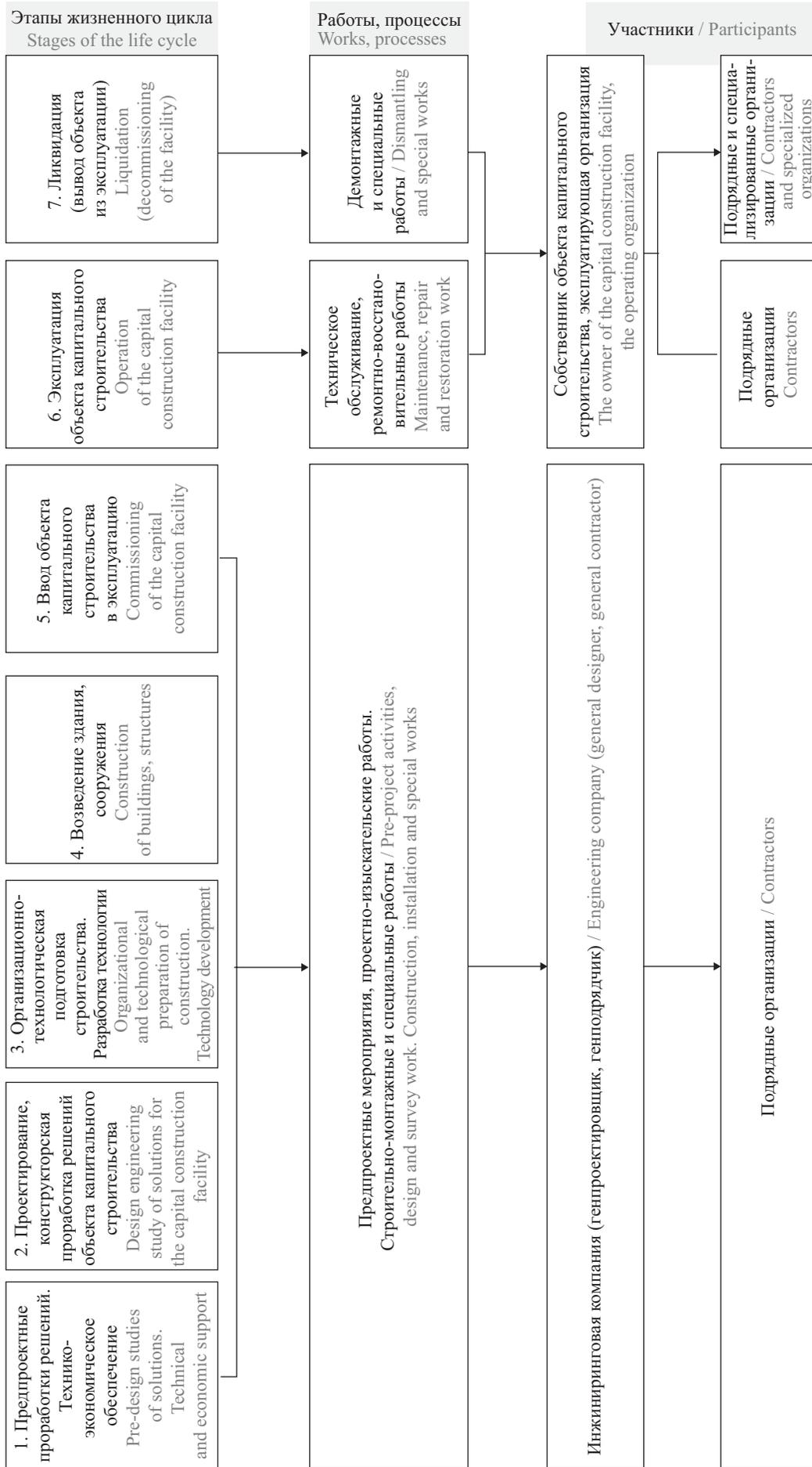


Схема жизненного цикла технических решений объекта капитального строительства
The scheme of the life cycle of technical solutions of the capital construction facility

ционального варианта. Сравнение ТР возможно в том случае, если установить общий критерий, идентифицирующий технико-экономические особенности их применения, также в данной процедуре требуется учитывать возможность совместного использования разных ТР при возведении и эксплуатации единого ОКС.

Отличия ТР друг от друга, а также от уже известных могут проявляться в форме, габаритах, планировке, компоновке, принципах работы, способах производства, материалах изготовления, режимов использования и т.д. Новизна технического решения — главная составляющая конкурентоспособности как ОКС, технологии, так и организационных структур, используемых при их возведении и эксплуатации.

Инженерная деятельность в строительстве направлена на эффективное использование ограниченных ресурсов при возведении зданий и сооружений, а также теоретических знаний, практических навыков при разработке ТР в рамках:

- 1) строительной части проектирования зданий, сооружений, конструирования их элементов, а также систем инженерно-технического обеспечения;
- 2) технологической части проектирования зданий и сооружений;
- 3) эксплуатации ОКС, проектировании ремонтно-восстановительных и строительномонтажных работ в период эксплуатации и ликвидации зданий, сооружений;
- 4) мониторинга технического состояния зданий и сооружений на этапах ЖЦ.

Для развития указанных выше положений представляется целесообразным дать развернутую классификацию технических решений в строительстве, признаками которой могут быть:

- 1) область приложения;
- 2) охват ЖЦ ОКС;
- 3) охват ЖЦ строительной организации;
- 4) новизна;
- 5) уровень инвестиций;
- 6) срок окупаемости;
- 7) масштаб;
- 8) наличие альтернатив.

В этой связи ТР в соответствии с их приложением могут быть:

- планировочными;
- конструктивными;
- технологическими;
- организационными.

Жизненный цикл ОКС — это последовательность этапов предынвестиционного, инвестиционного периодов и периода эксплуатации. Технические решения в основном проявляются в двух последних периодах.

К инвестиционному периоду относятся этапы, в которых непосредственно генерируются и затем воплощаются в материальной форме ТР:

- НИОКР;
- проектирование и изыскания;

- строительство.

В периоде эксплуатации можно выделить следующие мероприятия, в рамках которых реализуются ТР:

- капитальный ремонт (реновация);
- реконструкция;
- техническое перевооружение;
- перепрофилирование;
- ликвидация (вывод из эксплуатации).

Прохождение этапов ЖЦ ОКС связано с функционированием большого количества организаций, которые можно группировать как субъектов ИСД: заказчик, застройщик, проектировщик, подрядчик, поставщик материально-технических ресурсов, эксплуатирующая организация, пользователь. Приведенные участники в зависимости от особенностей инвестиционно-строительного проекта могут иметь отношение к разным этапам ЖЦ ОКС.

Технические решения и их последующие трансформации на определенных этапах ЖЦ ОКС имеют свои особенности, которые могут отразиться на целесообразности их реализации, идентификации номенклатуры и объемов ресурсов. Соответственно преобразование ТР в текущем периоде оказывает влияние на следующие трансформации ОКС по временной шкале ЖЦ и приводит, с одной стороны, к увеличению инвестиций в ОКС, а с другой — к снижению эксплуатационных затрат и росту капитализации объекта недвижимости.

Представление строительной продукции как взаимосвязанной совокупности о вещественных ТР, которые имеют разные характеристики собственных ЖЦ, указывает на возможность определения вида и объема реинжиниринговых мероприятий по отношению к объекту воздействия (процесса, организационной структуре, зданию, сооружению и их комплексам). Идентификация реинжиниринговых мероприятий должна осуществляться на основе системного подхода при анализе особенностей сопряжения ТР в единое целое. В данной процедуре необходимо учитывать разное влияние отдельных ТР на характер и формат трансформаций объекта воздействия, т.е. реинжиниринга. Это влияние будет определяться как рангом или типом технического решения (основное или вспомогательное), так и долей его о вещественной формы в объеме строительной продукции, а также его влиянием на характеристики прочности, устойчивости и долговечности. Однако следует принимать во внимание экономическую целесообразность реинжиниринга конкретного ТР и возможность замены его на новое. Даже если последнее осуществимо и экономически оправдано, то относительно всего объекта воздействия подобная локальная замена так или иначе будет проявляться как реинжиниринг.

Технические решения также тесно коррелируются с этапами ЖЦ хозяйствующего субъекта, их реализующего, а именно:

1. Создание и выход на рынок. Данный этап предполагает наличие технических решений, кото-

рые составляют основу конкурентных преимуществ организации и связаны с проектированием, либо возведением, либо эксплуатацией ОКС.

2. Рост. Технические решения на этапе роста строительной организации направлены на обеспечение максимальной эффективности ее деятельности при увеличении номенклатуры и объемов работ.

3. Зрелость. Этот этап развития организации требует от нее минимизации производственных затрат при реализации ТР.

4. Спад. Указанный этап свидетельствует об исчерпании потенциала конкурентных преимуществ располагаемых организацией ТР и необходимости их трансформации с учетом изменившихся запросов потребителей и уровня научно-технического прогресса.

5. Обновление. Оно связано с формированием новых конкурентных преимуществ за счет новых, либо кардинально преобразованных существующих ТР.

В рамках приведенных этапов развития организации ТР принимаются и реализуются в составе инвестиционных проектов, определенных направлений текущей деятельности. В обоих случаях по уровню инвестиций некоторые ТР будут причислены к категории масштабных, другие — к категории локальных. Также следует отметить, что значительные инвестиции в ТР напрямую связаны с большим сроком окупаемости и наоборот. Строительство, как отрасль материального производства, характеризуется большими затратами ресурсов, продолжительной эксплуатацией продукции, что обуславливает и отраслевую специфику принятия ТР, которые являются результатом отбора нескольких альтернативных вариантов (так называемая вариантная проработка технических решений).

С точки зрения новизны технических решений можно рассматривать как применение продуктовых и технологических новаций. Использование продуктовых новаций в форме ТР в строительстве связано с объектами, имеющими материально-вещественное воплощение (машины, механизмы, здания, сооружения, их элементы, строительные материалы, конструкции и т.д.), а реализация технологических новаций направлена на производственные процессы их создания или применения. При этом последовательность появления новаций и сопряженных с ними ТР неизменна: продуктовые новации первоначальны и порождают технологические нововведения.

В рассматриваемом контексте представляет определенный интерес практика идентификации и регламентации ТР, используемых при проектировании, возведении и эксплуатации АС. Данный опыт имеет прогрессивную направленность по своему характеру и содержанию и широкий спектр перспектив относительно использования не только в ИСД, но и в других отраслях экономики (например, ма-

шиностроении; химической промышленности; добычи, переработки нефти и газа и т.д.).

В рамках совершенствования системы корпоративных нормативных актов в концерне «Росэнергоатом» был разработан и введен в действие руководящий документ эксплуатирующей организации РД ЭО 1.1.2.01.0740–2008 «Техническая документация. Положение о порядке разработки, регистрации и учета решений (технических решений)». Положения данного документа распространяются на ТР, принимаемые на этапах ЖЦ АС, по внесению изменений в проектную, конструкторскую, технологическую и эксплуатационную документацию энергоблоков, реакторной установки (РУ), систем и оборудования АС, а также на решения по оценке технического состояния и остаточного ресурса оборудования.

В зависимости от принадлежности к определенному уровню управления принято разделять:

- решение — организационно-технический документ, утверждаемый или согласовываемый руководством эксплуатирующей организации;
- техническое решение — организационно-технический документ, утверждаемый руководством АС.

Таким образом, решение (ТР) является организационно-распорядительным документом, определяющим решение вскрытой проблемы эксплуатации, ремонта и т.д. и порядок его реализации. При необходимости оно служит исходным документом для разработки технических требований к новому оборудованию и технического задания на проектирование изменения схемы, процесса, зданий и сооружений.

Основанием для процедур принятия и оформления решения (ТР) в соответствии с указанным выше корпоративным документом концерна «Росэнергоатом» могут быть:

- требования условий действия лицензий на эксплуатацию энергоблоков АС;
- результаты анализа отступлений от требований нормативной документации по безопасности;
- программы повышения безопасности и экономичности;
- общеотраслевые программы;
- результаты анализа и оценки безопасности;
- опыт эксплуатации систем, оборудования, зданий, сооружений;
- технические предложения организаций-разработчиков проекта АС и РУ;
- рационализаторские предложения и изобретения;
- предписания регулирующих органов;
- циркуляры вышестоящих корпоративных структур;
- анализ нарушений в работе АС;
- отчеты по комплексному обследованию;
- технические программы международного сотрудничества.

Представленные выше определения решения и ТР при общей терминологической схожести указывают на кардинальное отличие в уровне их принятия и соответственно на разные предметные области, в которых они проявляются. В этой связи можно установить, что рамки требований к решениям и ТР очерчены соответствующими системами, элементами АС и производственными процессами.

Приведенный документ регламентирует обязательные структурные элементы и реквизиты решения (ТР). Решения по системам, элементам АС и производственным процессам ставятся на инвентарный учет и хранятся в техническом архиве.

Процедуры разработки решения и ТР имеют общие итерации и включают:

- разработку проекта решения (ТР);
- согласование решения (ТР) при необходимости со сторонними организациями после предварительного рассмотрения подразделениями концерна;
- согласование решения (ТР) с подразделениями АС центрального аппарата;
- утверждение решения (ТР) вышестоящей организацией, руководством концерна, АС;
- регистрацию, рассылку, хранение.

Анализируя опыт концерна «Росэнергоатом» в сфере выработки и использования решений (ТР), можно утверждать, что он подтверждает приведенные выше положения о корреляции их с научно-техническим прогрессом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Авторами предложено классифицировать все ТР относительно сложности конструктивного исполне-

ния как простые или сложные, а также относительно набора характеристик подразделять по их важности на основные и вспомогательные (дополнительные). Впоследствии они воплощаются в соответствующих параметрах ОКС технологического или управленческого процесса, организационной структуры.

Учитывая все вышеприведенное, можно заключить, что ЖЦ ТР в строительстве характеризуется проявлением как общих, так и специфических закономерностей, их учет при создании одноименной системы управления должен способствовать эффективному трансферу новаций в производственную сферу, формированию у строительных организаций конкурентных преимуществ за счет повышения качества строительной продукции, а для эксплуатирующих организаций удлинению ЖЦ ОКС и снижению стоимости эксплуатационных затрат. Следует отметить потенциальный интерес в контексте реинжиниринга к практике идентификации и регламентации ТР, используемых при проектировании, возведении и эксплуатации АС. Данный опыт имеет прогрессивную направленность по своему характеру и содержанию, а также широкий спектр перспектив относительно использования не только в ИСД, но и в других отраслях национальной экономики.

Использование реинжиниринга как теории и методологии управления ЖЦ ОКС, а также их комплексов может способствовать формированию комфортной и безопасной среды жизни за счет качественного преобразования ТР и тем самым продлению эффективной эксплуатации зданий, сооружений, снижению затрат, наиболее полному удовлетворению запросов потребителей (пользователей) строительной продукции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Реинжиниринг организационной структуры и бизнес-процессов инвестиционно-строительной деятельности. Их место в общей системе корпоративного регулирования // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 2. С. 294–306. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.294-306. EDN IELZVM.

2. Сборщиков С., Лазарева Н. Реинжиниринг строительных организаций и реинжиниринг строительной отрасли // Русский инженер. 2022. № 3 (76). С. 45–47. EDN XWACRC.

3. Сборщиков С.Б., Журавлев П.А., Лазарева Н.В. Проектное управление: инжиниринг и реинжиниринг в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 12. С. 75–82. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.75-82. EDN DXYNBS.

4. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Реинжиниринг процессов материально-технического обеспечения как основа формирования и функционирования логистических центров в строительстве //

Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 1. С. 102–115. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.102-115. EDN NMIFUG.

5. Zhuravlev P., Bachus E., Markova I. Directions of modernization of systems for ensuring the quality of construction of nuclear power facilities // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 05039. DOI: 10.1051/mateconf/201825105039

6. Журавлев П.А. Номенклатура требуемых объектов капитального строительства для ресурсно-технологического моделирования // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 7. С. 52–57. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.52-57. EDN NVXALL.

7. Журавлев П.А. Инженерная защита. Требуемые изменения строительных нормативов и регламентов // Русский инженер. 2022. № 4 (77). С. 44–48. EDN NAFYWT.

8. Zhuravlev P., Bachus E., Markova I. Nomenclature of works and costs for ensuring the quality of construction products. Identification methods // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

2019. Vol. 661. Issue 1. P. 012128. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012128

9. Малахов В.И. Оптимизация управления удаленными строительными подразделениями // Бухучет в строительных организациях. 2008. № 12. С. 18–26. EDN TKJLZP.

10. Малахов В.И. Ресурсно-проектный метод — ценообразование в системе BIM // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 3 (991). С. 52–56. EDN XHAUML.

11. Киевский И.Л., Аргунов С.В., Жаров Я.В., Юргайтис А.Ю. Алгоритмизация систем планирования, управления и обработки информации в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 11. С. 14–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.14-24. EDN AGNCHY.

12. Leybman D., Khripko T. Quality assurance program of a nuclear facility // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 03015. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199703015

13. Жаров Я.В. Информационное моделирование строительства на основе блочно-кластерной структуры // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2019. № 11. С. 10–14. EDN XTWNSE.

14. Жаров Я.В. Организационно-технологическое проектирование в строительстве на основе интеллектуального блока планирования // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 193–199. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-193-199. EDN RQXZDJ.

15. Пустовгар А.П. Инженерные кадры современной России: кого и к чему мы готовим? // Стандарты и качество. 2018. № 7. С. 78–81. EDN USWITW.

16. Пустовгар А.П., Андреева Н.П. Применение параметрического метода нормирования в строительной отрасли // Стандарты и качество. 2024. № 1. С. 95–99. DOI: 10.35400/0038-9692-2024-1-208-23. EDN KGMXUU.

17. Пустовгар А.П., Галушкин А.П. Разработка правовой и нормативно-технической документации и ее влияние на стоимость устойчивого проекта строительства АЭС // Новые технологии в строительстве. 2023. Т. 9. № 1 (43). С. 48–56. DOI: 10.24412/2409-4358-2023-1-48-56. EDN EFOIXD.

18. Sborshchikov S., Maslova L., Lazareva N., Shinkareva G. Choice of the rational option of the organizational and technological decision, taking into account the exposure of random factors // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661. Issue 1. P. 012113. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012113. EDN CLJEW.

19. Шинкарева Г.Н., Маслова Л.А. Комплексный инжиниринг как способ интенсификации строительного производства // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2018. № 3. С. 37–41. EDN QIPUEW.

20. Шинкарева Г.Н. Интенсификация строительного производства за счет применения комплекс-

ного инжиниринга // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2017. № 7. С. 43–46. EDN RAOOYW.

21. Шинкарева Г.Н. Модель инжиниринговой схемы организации строительства для контрактов жизненного цикла : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 172 с. EDN XJZLZQ.

22. Лазарева Н.В. Кластерная модель организации инновационной деятельности на корпоративном уровне в строительстве : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 185 с. EDN WMNZDJ.

23. Симанович В.М., Ермолаев Е.Е. Осуществление строительства, реконструкции, капитального ремонта объекта капитального строительства // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2018. № 12. С. 4–8. EDN WIDEBF.

24. Ермолаев Е.Е. Зарубежный и отечественный опыт использования элементов инжиниринга, аутсорсинга и аутстаффинга в строительном производстве // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2019. № 4. С. 49–67. EDN LNBLOC.

25. Хрипко Т.В. Исследование применения технологий информационного моделирования в строительной отрасли КНР // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 2. С. 50–52. EDN OWZZEX.

26. Khripko T. Mathematical modeling of failure of port control systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Issue 1. P. 012101. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012101

27. Шумейко Н.М. Понятия стоимости в строительстве // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 11 (1011). С. 42–45. EDN YMXDRJ.

28. Ключев В.Д., Зайцев Д.А., Журавлев П.А. Нормативная база для стоимостной оценки капитального ремонта многоквартирных домов // Управление многоквартирным домом. 2015. № 1.

29. Коченкова Е.М., Денисов А.В. Информационное моделирование при решении вопросов защиты окружающей среды объектов строительства // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2022 : сб. докл. Третьей Национальной науч. конф. 2023. С. 583–587. EDN BYPLIE.

30. Kochenkova E.M. Environmental protection. Features of information modeling at the stages of the high-rise building life cycle // Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сб. мат. семинара молодых ученых XXV Междунар. науч. конф. 2022. С. 115–120. EDN XSOQZK.

31. Буренин В.С., Езерский В.А., Монастырев П.В. Исследование современных тенденций проектирования жилых зданий в России и за рубежом // Архитектура и время. 2017. № 5. С. 2. EDN YMXHRR.

32. Попков А.Г. Реализация комплексных логистических решений корпорации «единого заказчика»: на примере строительной отрасли // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Т. 12. № 5–1. С. 324–328. DOI: 10.34670/AR.2022.65.75.026. EDN URUYR.

33. Монастырев П.В., Евдокимцев О.В., Гавриков В.А., Зеленин Г.В. Институт архитектуры, строительства и транспорта в проблемах устойчивого развития региона // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 46–68. EDN UMONJC.

34. Захаров П.Н., Матвеев М.Ю., Хижняков Д.М. Анализ подходов к оценке уровня инновационности развития строительных организаций // Инновации в отраслях народного хозяйства, как фактор решения социально-экономических проблем современности : сб. докл. и мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. 2014. С. 143–151. EDN TKNHQT.

35. Коробко В.И., Карданская Н.Л., Матвеев М.Ю. Философские категории развития в теории

управления // Инновации в отраслях народного хозяйства как фактор решения социально-экономических проблем современности : сб. докл. и мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. 2014. С. 8–14. EDN TKNHEV.

36. Яжлев И.К., Попков А.Г., Белогурова О.А. Проблемы нормативно-правового обеспечения внедрения ресурсо-, энергосберегающих технологий в градостроительной деятельности // Экономика и предпринимательство. 2020. № 3 (116). С. 1000–1002. DOI: 10.34925/EIP.2020.116.3.212. EDN AJSLCW.

37. Попков А.Г. Кадровое обеспечение строительного производства. Новые подходы к формированию, функционированию, регулированию // Техническое регулирование. Строительство, проектирование и изыскания. 2011. № 8. С. 29–33.

Поступила в редакцию 10 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 19 июля 2024 г.

Одобрена для публикации 5 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Борисович Сборщиков** — доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник, дирекция научно-технических проектов и экспертиз; **Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»)**; 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного менеджмента; **Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС)**; 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1; РИНЦ ID: 431022, ORCID: 0000-0001-6802-2888; tous2004@mail.ru;

Наталья Валериевна Лазарева — кандидат технических наук, доцент, руководитель проектов; доцент кафедры «Промышленного менеджмента» НИТУ МИСИС, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1; дирекция научно-технических проектов и экспертиз; **Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»)**; 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; РИНЦ ID: 808973, ORCID: 0000-0001-6802-2888; tous2004@mail.ru.

Вклад авторов:

Сборщиков С.Б. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, научное редактирование, итоговые выводы.

Лазарева Н.В. — обработка материала, проведение исследования, доработка текста, описание результатов и формулирование выводов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Sborshikov S.B., Lazareva N.V. Reengineering of the organizational structure and business processes of investment and construction activities. Their place in the general system of corporate regulation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):294-306. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.294-306. EDN IELZVM. (rus.).

2. Sborshchikov S.B., Lazareva N.V. Reengineering of construction organizations and reengineering of the construction industry. *Russian Engineer*. 2022; 3(76):45-47. EDN XWACRC. (rus.).

3. Sborshikov S.B., Zhuravlev P.A., Lazareva N.V. Project management: engineering and reengineering in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 12:75-82. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.75-82. EDN DXYNBS. (rus.).

4. Sborshikov S.B., Lazareva N.V. Reengineering of logistics processes as the basis for the establishment and operation of logistics centres in the construction industry. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(1):102-115. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.102-115. EDN NMIFUG. (rus.).

5. Zhuravlev P., Bachus E., Markova I. Directions of modernization of systems for ensuring the quality of construction of nuclear power facilities. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:05039. DOI: 10.1051/matec-conf/201825105039

6. Zhuravlev P.A. Nomenclature of capital construction objects required for resource and technological modeling. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 7:52-57. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.52-57. EDN NVXALL. (rus.).

7. Zhuravlev P. Engineering protection. Required changes in building regulations and regulations. *Russian Engineer*. 2022; 4(77):44-48. EDN NAFYWT. (rus.).
8. Zhuravlev P., Bachus E., Markova I. Nomenclature of works and costs for ensuring the quality of construction products. Identification methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 661(1):012128. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012128
9. Malakhov V.I. Optimization of management of remote construction units. *Accounting in Construction Organizations*. 2008; 12:18-26. EDN TKJLZP. (rus.).
10. Malakhov V.I. Projectresource method — pricings in BIM. *BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2017; 3(991):52-56. EDN XXAUML. (rus.).
11. Kievskiy I.L., Argunov S.V., Zharov Ja.V., Yurgaitis A.Yu. Algorithmization of planning, management and information processing systems in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 11:14-24. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.14-24. EDN AGNCHY. (rus.).
12. Leybman D., Khripko T. Quality assurance program of a nuclear facility. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703015
13. Zharov Ya.V. Building information modeling based on block-cluster structure. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2019; 11:10-14. EDN XTWNSE. (rus.).
14. Zharov Ya.V. Organizational technological design in construction based on an intelligent planning unit. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 6(77):193-199. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-193-199. EDN RQXZDJ. (rus.).
15. Pustovgar A.P. Engineering personnel of modern Russia: Who are we preparing and what are we preparing for? *Standards and Quality*. 2018; 7:78-81. EDN USWITW. (rus.).
16. Pustovgar A.P., Andreeva N.P. Application of the performance-based specifications to construction industry. *Standards and Quality*. 2024; 1:95-99. DOI: 10.35400/0038-9692-2024-1-208-23. EDN KGXMUU. (rus.).
17. Pustovgar A.P., Galushkin A.P. Development of legal and regulatory and technical documentation and its impact on the cost of a sustainable NPP construction project. *New Technologies in Construction*. 2023; 9(1):43:48-56. DOI: 10.24412/2409-4358-2023-1-48-56. EDN EFOIXD. (rus.).
18. Sborshchikov S., Maslova L., Lazareva N., Shinkareva G. Choice of the rational option of the organizational and technological decision, taking into account the exposure of random factors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 661(1):012113. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012113. EDN CLJEWV.
19. Shinkareva G.N., Maslova L.A. Integrated engineering as a way to intensify construction production. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2018; 3:37-41. EDN QIPUEW. (rus.).
20. Shinkareva G.N. Intensification of construction production through the use of integrated engineering. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2017; 7:43-46. EDN RAOOYW. (rus.).
21. Shinkareva G.N. *Model of engineering scheme of construction organization for life cycle contracts : dis. ... Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2018; 172. EDN XJZLZQ. (rus.).
22. Lazareva N.V. *Cluster model of organization of innovative activity at the corporate level in construction : dis. ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2015; 185. EDN WMNZDJ. (rus.).
23. Simanovich V.M., Ermolaev E.E. Implementation of construction, reconstruction, capital repairs of the capital construction facility. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2018; 12:4-8. EDN WIDEBF. (rus.).
24. Ermolayev E.E. Foreign and domestic experience in the use of elements of engineering, outsourcing and outstaffing in the construction industry. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2019; 4:49-67. EDN LNBLOC. (rus.).
25. Khripko T.V. Research of application of information modeling technologies in the construction industry of KNR. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2021; 2:50-52. EDN OWZZEX. (rus.).
26. Khripko T. Mathematical modeling of failure of port control systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012101. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012101
27. Shumeyko N.M. Concepts of the construction cost estimate. *BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2018; 11(1011):42-45. EDN YMXDRJ. (rus.).
28. Klyuyev V.D., Zaitsev D.A., Zhuravlev P.A. Regulatory framework for cost estimation of capital repairs of apartment buildings. *Management of an Apartment Building*. 2015; 1. (rus.).
29. Kochenkova E.M., Denisov A.V. Information modeling in solving environmental protection issues of construction facilities. *Actual problems of the construction industry and education – 2022 : collection of reports of the Third National Scientific Conference*. 2023; 583-587. EDN BYPLIE. (rus.).
30. Kochenkova E.M. Environmental protection. Features of information modeling at the stages of the high-rise building life cycle. *Construction — formation of the living environment : collection of materials of the seminar of young scientists of the XXV International Scientific Conference*. 2022; 115-120. EDN XSOQZK. (rus.).
31. Burenin V.S., Ezersky V.A., Monastyrev P.V. Investigation of modern trends in the design of residential buildings in Russia and abroad. *Architecture and Time*. 2017; 5:2. EDN YMXHRR. (rus.).
32. Popkov A.G. Implementation of integrated logistics solutions of the corporation “single customer”: on the example of the construction industry. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2022; 12(5-1):

324-328. DOI: 10.34670/AR.2022.65.75.026. EDN URUYYYR. (rus.).

33. Monastyrev P.V., Evdokimtsev O.V., Gavrikov V.A., Zelenin G.V. Institute of Architecture, Construction and Transport in the problems of sustainable development of the region. *Sustainable development of the region: architecture, construction and transport : materials of the VIII International Scientific and Practical Conference*. 2021; 46-68. EDN UMONJC. (rus.).

34. Zakharov P.N., Matveev M.Yu., Khizhnyakov D.M. Analysis of approaches to assessing the level of innovation in the development of construction organizations. *Innovations in the sectors of the national economy, as a factor in solving socio-economic problems of our time : collection of reports and materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2014; 143-151. EDN TKNHQT. (rus.).

35. Korobko V.I., Kardanskaya N.L., Matveev M.Yu. Philosophical categories of development in management theory. *Innovations in the sectors of the national economy, as a factor in solving socio-economic problems of our time : collection of reports and materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2014; 8-14. EDN TKNHEV. (rus.).

36. Yazhlev I.K., Popkov A.G., Belogurova O.A. Problems of regulatory support for the introduction of resource-and energy-saving technologies in urban development. *Economy and Entrepreneurship*. 2020; 3(116):1000-1002. DOI: 10.34925/EIP.2020.116.3.212. EDN AJSLCW. (rus.).

37. Popkov A.G. Staffing of construction production. New approaches to the formation, functioning, regulation. Technical Regulation. *Construction, Design and Surveys*. 2011; 8:29-33. (rus.).

Received April 10, 2024.

Adopted in revised form on July 19, 2024.

Approved for publication on October 5, 2024.

B I O N O T E S : **Sergej B. Sborshchikov** — Doctor of Economics Sciences, Professor, Chief Researcher, Directorate of Scientific and Technical Projects and Expertise; **Research Center of Construction**; 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; Head of the Department of Industrial Management; **National University of Science and Technology «MISIS» (NUST MISIS)**; bld 1, 14 Leninsky Prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation; ID RSCI: 431022, ORCID: 0000-0001-6802-2888; tous2004@mail.ru;

Natal'ya V. Lazareva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Project Manager; Associate Professor of the Department of Industrial Management at NUST MISIS, 119049, Moscow, Leninsky Prospekt, 4, p. 1; Directorate of Scientific and Technical Projects and Expertise; **Research Center of Construction**; 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; ID RSCI: 808973, ORCID: 0000-0001-6802-2888; tous2004@mail.ru.

Contribution of the authors:

Sergej B. Sborshchikov — scientific guidance, research concept, methodology development, writing the source text, scientific editing, final conclusions.

Natal'ya V. Lazareva — processing of the material, conducting the study, revision of the text description of the results and formation of conclusions of the study.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1835-1849

Модель прогнозирования материальных ресурсов и сметной стоимости на ранних этапах жизненного цикла объектов строительства

Михаил Владимирович Гуреев, Александр Николаевич Макаров
Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительная цифровизация предполагает возможность прогнозирования материальных ресурсов (МР) с заданной степенью точности на ранних этапах жизненного цикла (ЖЦ) объекта строительства (ОС), что позволит формировать стоимостные показатели, а также объемы МР и оборудования — одних из ключевых элементов управления и планирования различных стадий ЖЦ объекта. Возможность создания на основе технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) инструмента прогнозирования указанных параметров представляется перспективным направлением развития, позволяющим достичь высокого уровня точности планирования бюджета и продолжительности проекта на предпроектной стадии инвестиционно-строительного проекта.

Материалы и методы. Рассмотрена проектная документация для 37 многоквартирных жилых домов с выделенными и нормализованными параметрами: технико-экономические показатели, материально-технические ресурсы, стоимость и др. Для подготовки и обучения моделей ИИ на базе Python выбраны методы библиотеки scikit-learn для сравнения следующих математических моделей: деревья решений, регрессии и алгоритмы, основанные на бустинге.

Результаты. Обучение и исследование проводилось с применением способа автоматизированного машинного обучения (AutoML). На основе сравнения коэффициента детерминации R^2 и среднеквадратичного отклонения (RMSE) выбраны ансамбли моделей, формирующие прогноз для объемов МР и оборудования, а также для сметной стоимости с диапазоном погрешности $\pm 8\%$. Входными значениями моделей являлись 11 количественно-качественных параметров, описывающих характеристики планируемого объекта, формирование которых возможно на ранних этапах ЖЦ объекта без разработки проектной документации.

Выводы. Результаты исследования демонстрируют возможность получения на предпроектной стадии фактически проектных данных с точностью, соответствующей этапу разработки рабочей документации для объекта строительства. Значительно повышается точность прогнозов общей сметной стоимости, а также появляется возможность прогнозирования с заданной точностью объемов материалов и оборудования на ранних этапах ЖЦ ОС для оптимизации всего процесса строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ранние этапы жизненного цикла объекта, модель прогнозирования сметной стоимости, ансамбли моделей машинного обучения, проектные решения, объекты жилой недвижимости

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гуреев М.В., Макаров А.Н. Модель прогнозирования материальных ресурсов и сметной стоимости на ранних этапах жизненного цикла объектов строительства // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1835–1849. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1835-1849

Автор, ответственный за переписку: Михаил Владимирович Гуреев, mvgurееv@gmail.com.

Model of forecasting of material resources and estimated cost at early stages of life cycle of construction objects

Mikhail V. Gureev, Aleksandr N. Makarov

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

ABSTRACT

Introduction. Digitalization of construction involves the possibility of forecasting material resources with a given degree of accuracy at the early stages of the life cycle of the construction object, which will make it possible to form cost indicators, as well as the volume of material resources and equipment — one of the key elements of management and planning of various stages of the life cycle of the object. The possibility of creating a forecasting tool based on artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) technologies for these parameters seems to be a promising development direction, allowing to achieve a high level of accuracy in budget planning and project duration at the pre-project stage of an investment and construction project.

Materials and methods. Design documentation for 37 multi-apartment residential buildings with allocated and normalized parameters: technical and economic indicators, material and technical resources, cost and others. To prepare and train AI

models based on Python, the methods of the scikit-learn library were selected to compare the following mathematical models: decision trees, regressions and algorithms based on boosting.

Results. The training and research were conducted using the automated machine learning (AutoML) method. Based on a comparison of the coefficient of determination R^2 and the standard deviation (RMSE), ensembles of models were selected that form a forecast for the volume of material resources and equipment, as well as for the estimated cost with an error range of $\pm 8\%$. The input values of the models were 11 quantitative and qualitative parameters describing the characteristics of the planned object, the formation of which is possible at the early stages of the life cycle of the object without the development of design documentation.

Conclusions. The results of the study demonstrate the possibility of obtaining actual design data already at the pre-design stage with accuracy corresponding to the stage of development of working documentation for the construction object. Thus, the accuracy of forecasts of the total estimated cost is significantly increased, and it also becomes possible to predict with a given accuracy the volumes of materials and equipment at the early stages of the life cycle of the construction object in order to optimize the entire construction process.

KEYWORDS: early stages of the object's life cycle, an estimated cost forecasting model, ensembles of machine learning models, design solutions, residential real estate objects

FOR CITATION: Gureev M.V., Makarov A.N. Model of forecasting of material resources and estimated cost at early stages of life cycle of construction objects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1835-1849. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1835-1849 (rus.).

Corresponding author: Mikhail V. Gureev, mvgureev@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Многолетняя сложившаяся практика закрепила в качестве ключевых такие факторы управления инвестиционно-строительным циклом любого объекта, как объемы материальных ресурсов (МР) и оборудования, необходимые для строительства, а также, как производная величина, их стоимостные показатели, формирующие общую смету на строительство.

Вместе с тем точные значения объемов МР и оборудования, а также общая смета на строительство, в зависимости от этапа жизненного цикла (ЖЦ) объекта строительства (ОС), имеют разные допустимые значения точности, увеличивающиеся по мере продвижения от этапа инвестиционной оценки к этапу рабочей документации.

Однако точность, присущая этапу рабочей документации, востребована и на ранних этапах ЖЦ ОС для корректного обоснования инвестиционного проекта, проведения тендеров для выбора участников проекта, контроля разработки проектной документации и т.д.

Проблематика эффективного прогнозирования в строительстве обусловлена необходимостью оптимизации расходов и сокращения сроков строительства. Традиционные подходы, основанные на экспертных оценках и исторических данных, часто не учитывают сложности и динамику современных строительных проектов, что диктует потребность совершенствования нормативно-правового регулирования ценообразования в строительстве с одной стороны, а также формирует запрос на повышение достоверности определения сметной стоимости строительства с другой стороны [1]. В то же время на практике уже применяются методы машинного обучения (МО), решающие задачи прогнозирования с заданными диапазонами точности в короткий срок в различных отраслях, в том числе и в строительстве [2].

Таким образом, прогнозирование МР с заданной степенью точности на различных этапах ЖЦ

ОС, в частности на этапе обоснования инвестиций, позволит формировать стоимостные показатели по разделам проектной документации, а также объемам МР и оборудования, которые являются одними из ключевых элементов управления и планирования различных стадий ЖЦ объекта.

На сегодняшний день существующие подходы к расчету стоимости строительства, как правило, разделены на несколько итераций, соответствующих определенному этапу ЖЦ объекта, и имеют установленные допуски по точности.

Структура ЖЦ ОС представляет собой последовательный процесс реализации следующих этапов¹: инициирование проекта (определяет содержание, финансовые ресурсы, а также другие факторы, влияющие на конечный результат); планирование проекта (реализуется план по управлению проектом в строительстве, в том числе планирование бюджета проекта; планирование закупок для проекта; определение ключевых показателей эффективности и результатов проекта в строительстве) и реализация проекта строительства (стадия проектирования и строительства).

Как видно из описания, на различных этапах ЖЦ объекта требуется как оценка стоимости строительства, так и данные по объемам материалов и оборудования для решения различных управленческих задач.

Сегодня имеется несколько подходов к оценке стоимости строительства для жилых зданий. В частности, Минстроем России используются Укрупненные нормативы цены строительства². В общем виде,

¹ ГОСТ Р 57363–2016. Управление проектом в строительстве. Деятельность управляющего проектом (технического заказчика) : утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16.12.2016 № 2043-ст.

² Об утверждении укрупненных нормативов цены строительства. Укрупненные нормативы цены строительства. НЦС 81-02-01–2024. Сборник № 01. Жилые здания : Приказ Минстроя России от 21.02.2024 № 128/пр.

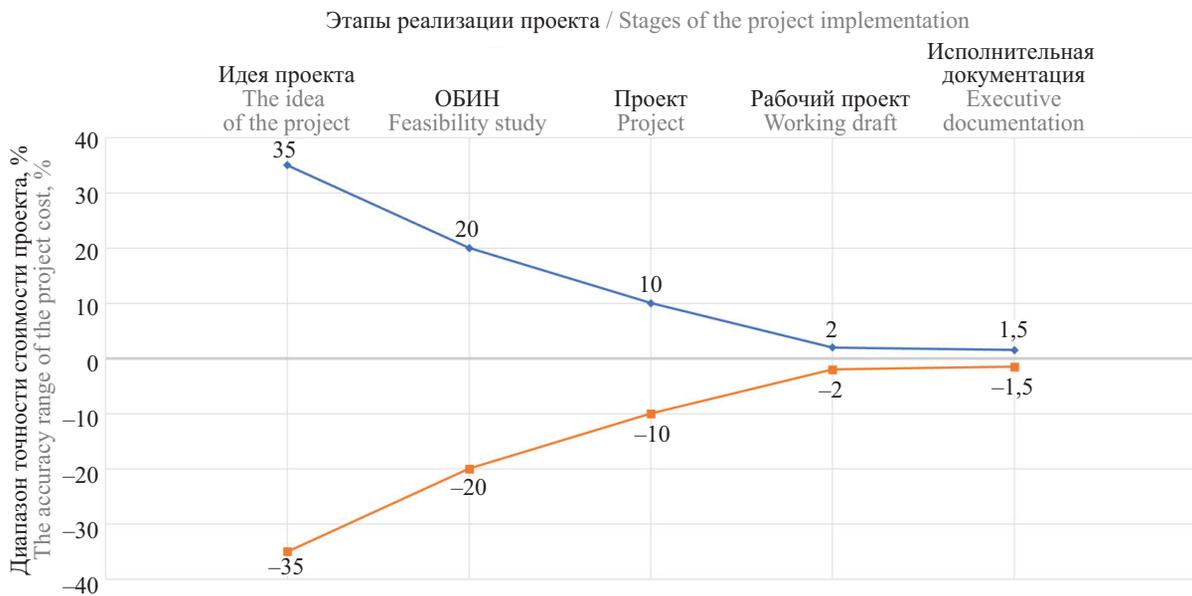


Рис. 1. Существующая точность оценки стоимости строительства на различных этапах жизненного цикла объекта (Минстрой РФ)

Fig. 1. The existing accuracy of estimating the cost of construction at various stages of the life cycle of the facility (Ministry of Construction of the Russian Federation)

основанная на нормативных способах оценка стоимости строительства и ее погрешность, в зависимости от различных этапов ЖЦ (идея проекта, обоснование инвестиций — ОБИН, проект, рабочий проект, исполнительная документация), обобщена Счетной палатой России³ (рис. 1).

В материале Счетной палаты России отмечается значимость приоритета перехода к применению полноценного ресурсного метода определения сметной стоимости строительства. В то же время специалистами устанавливается важность апробации новых подходов в рамках осуществляемой реформы ценообразования и сметного нормирования в строительстве и перехода к ресурсному (ресурсно-индексному) методу расчета сметной стоимости.

Для определения точности оценки стоимости строительства Международная ассоциация развития стоимостного инжиниринга (МАРСИ) рекомендует применять «Систему классификации стоимостных оценок в целях подготовки проектов, организации контрактной стратегии и строительства в обрабатывающих отраслях промышленности» от 02.02.2005 № 18R-97 (далее — система)⁴. В системе определена

точность расчетов [3] на основе обобщенного опыта крупных компаний, инвестиционно-строительные проекты (ИСП) которых обычно проходят через несколько стадий уточнения стоимости (рис. 2).

Как видно, традиционные способы оценки стоимости строительства на ранних этапах ЖЦ здания включают методы, основанные на экспертных оценках, анализе стоимости по аналогии, единичной стоимости и различных параметрических моделях. Эти методы варьируются по степени точности, зависящей от доступности данных, опыта оценщиков и специфики проекта.

Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время варьирование точности оценки стоимости реализации проекта находится в широких диапазонах на этапах 1–4 ЖЦ объекта. Это обстоятельство повышает риск ошибочной оценки стоимости проекта, что неблагоприятно сказывается на дальнейшем его развитии, так как именно на ранних стадиях ЖЦ формируются ключевые проектные, финансовые и организационно-технические решения, описанные выше.

Оценка стоимости проекта, проводимая на ранних этапах, как правило, на одном базовом параметре — общая площадь объекта, с одной стороны, предполагает уровень неопределенности, описанный в табл. 1, с другой — не дает возможность опираться на объемы МР и оборудования. Тогда как это ключевые параметры, влияющие на процессе управления в инвестиционно-строительном цикле.

Как справедливо указывает автор в работе [3], имеется высокая степень неопределенности ИСП, в особенности стоимости строительства, определяемой при проектировании и проходящей через мно-

³ Бюллетень Счетной палаты Российской Федерации. 2021. № 6. Ценообразование в строительстве.

⁴ AACE International Recommended Practice No. 18R-97 Cost Estimate Classification System — as Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries (Система классификации стоимостных оценок в целях подготовки проектов, организации контрактной стратегии и строительства в обрабатывающих отраслях промышленности от 02.02.2005 № 18R-97, разработанная Международной ассоциацией развития стоимостного инжиниринга (МАРСИ)).



Рис. 2. Существующая точность оценки стоимости строительства на различных этапах жизненного цикла объекта (МАРСИ)

Fig. 2. The existing accuracy of estimating the cost of construction at various stages of the life cycle of the facility (MARSИ)

Табл. 1. Диапазоны точности оценки стоимости реализации проекта на этапах жизненного цикла по различным методикам
Table 1. Ranges of accuracy in estimating the cost of project implementation at the stages of the life cycle using various methods

Этапы жизненного цикла объекта строительства (Минстрой/МАРСИ) Stages of the life cycle of the construction object (Ministry of Construction/MARSИ)	Диапазоны точности стоимостных оценок реализации проекта по различным методикам, % Ranges of accuracy of cost estimates of project implementation according to various methods, %		
	МАРСИ MARSИ	Минстрой Ministry of Construction	Перспективные методы МО Promising methods of ML
Идея проекта/предварительное ТЭО The idea of the project/preliminary feasibility study	-30...+50	-30...+30	-10...+10
Обоснование инвестиций/ТЭО Justification of investments/feasibility study	-20...+30	-20...+20	-10...+10
Проект/проектная документация Project/project documentation	-15...+20	-10...+10	-10...+10
Рабочий проект/рабочая документация Working draft/working documentation	-10...+15	-2...+2	-10...+10
Исполнительная документация/ рабочая документация Executive documentation/working documentation	-10...+15	-2...+2	-10...+10

жество этапов уточнения и изменения стоимостных показателей в зависимости от стадии проектирования и методов определения стоимости строительства. При этом стоимость строительства является главным фактором, оказывающим влияние на качество и достоверность оценки экономической эффективности ИСП.

Существующие методы оценки имеют ограниченную точность, особенно на ранних этапах, когда сведения о проекте неполны. Их точность также сильно зависит от качества и актуальности используемых данных, от опыта и субъективных суждений оценщиков. Фактические первые спецификации,

содержащие объемы МР и оборудования, на основе которых производится детальная оценка стоимости реализации проекта, появляются только по завершении стадии проектной документации, и даже в этом случае их точность часто оставляет желать лучшего.

Вместе с тем модели МО (табл. 1) предполагают значительные перспективы для улучшения процесса оценки стоимости строительства на ранних этапах. Алгоритмы машинного обучения могут анализировать большие объемы информации, выявляя сложные нелинейные зависимости между исходными параметрами проекта и объемами МР и оборудования,

а также его стоимостью. В перспективе это позволит делать более точные прогнозы, основанные на объективной информации, а не на субъективном опыте.

Стоит отметить, что внедрение инструментов МО в область строительного проектирования ведется достаточно активно с получением практических результатов. Методы МО дают возможность обрабатывать, систематизировать, прогнозировать и классифицировать огромные массивы информации по определенным признакам и условиям, что в разы сокращает трудозагрты и повышает эффективность работы [4].

В работе [5] автор пришел к выводу о том, что применение моделей машинного обучения приводит в данном случае к улучшению качества прогноза инвестиций в жилищное строительство на основе исследованных параметров.

Как показало исследование [6], система на основе искусственного интеллекта (ИИ) может отслеживать и оценивать сотни тысяч повреждений, генерировать отчеты для различных типов зданий и в конечном итоге прогнозировать сроки износа и повреждения тех или иных объектов с достаточной степенью надежности.

Применение ИИ [7] позволяет значительно снизить издержки в процессе проектирования, строительства и эксплуатации за счет сокращения количества ошибок при проектировании и их своевременного исправления, а также повысить качество прогнозирования, улучшая логистику непосредственно на строительной площадке. Технологии МО возможно применять в строительстве на протяжении всего ЖЦ проекта, включая такие начальные этапы, как идея проекта, обоснование инвестиций и проектирование.

Участники процесса проектирования и строительства могут использовать рекомендательный системный подход (контролируемое обучение), который использует МО для определения важных данных, необходимых для выработки управленческих решений. Эти приложения могут рекомендовать инженерам и архитекторам использовать конкретный дизайн, конструктивное решение (например, тип соединений — сварные или болтовые) или архитектурную отделку (например, навесные стены против оконных перегородок) на основе различных критериев (общая стоимость владения, сроки завершения строительства, вероятность дефектных конструкций — ошибки при выполнении). Конечным результатом является то, что участники процесса получают больше информации для принятия обоснованных управленческих решений [8].

Возможность внедрения подходов МО для решения задач прогнозирования МР на ранних этапах ЖЦ объекта описана в труде [9]. В статье раскрыты исходные входные параметры, влияющие на характеристики многоквартирных жилых домов (МКД). Выделены и нормализованы значимые с точки зрения экономических издержек и сроков МР (материалы и оборудование — выходные параметры). На осно-

ве коэффициентов корреляции Пирсона выявлена линейная статистическая взаимосвязь входных и выходных параметров выборки.

В рамках настоящего исследования ставится цель рассмотреть существующие модели МО и произвести на базе сравнения выбор оптимальной модели для прогнозирования выходных параметров объекта строительства (объем материалов и оборудования, необходимых для строительства объектов) с учетом значимых входных параметров (количественно-качественные показатели, описывающие характеристики объекта) для управления проектом строительства МКД на этапе обоснования инвестиций.

Задачи исследования:

- рассмотреть существующие модели, выбрать подходящие исследования;
- описать принципы работы имеющихся моделей;
- провести расчеты по выбранным моделям;
- проанализировать результаты и сделать вывод об оптимальной модели, укладываемой в цели исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач был выбран язык программирования Python, в частности методы, содержащиеся в библиотеке scikit-learn. В ее состав включены алгоритмы, среди которых и предназначенные для задач классификации, регрессионного и кластерного анализа данных. Кроме того, основываясь на современных подходах МО, выбран способ автоматизированного машинного обучения, а именно AutoSklearn — автоматизированный пакет машинного обучения, основанный на scikit-learn и генерирующий признаки на основе неструктурированных данных (далее — AutoML). В его состав входят различные алгоритмы, в том числе предназначенные для задач классификации, регрессионного и кластерного анализа данных, включая метод опорных векторов, метод случайного леса, градиентного бустинга и др. Библиотека разработана для взаимодействия с численными и научными библиотеками языка программирования Python. Данный пакет эффективно работает с небольшими объемами выборок и дает большую (по сравнению с другими подходами МО) точность [10].

Методы МО предполагают возможность обучения за счет использования решений множества сходных задач или существующих верифицированных сведений (в данном случае готовых разделов проектной документации для жилых зданий), что позволяет обучать модель и увеличивать точность прогнозирования, что является одним из ключевых аспектов, определяющих выбор этого метода.

Использование методов МО обусловило следующие последовательные этапы работы.

Подготовка данных

В контексте решения поставленных задач был произведен сбор и анализ 37 комплектов проектной

документации для жилых домов, расположенных в Москве и Московской области, проектирование которых осуществлялось в 2015–2022 гг. Произведено их распознавание в машиночитаемый вид и последующая унификация под единые форматы входных и выходных параметров для каждого из зданий (суммарно более 300 тысяч строк данных, представленных в табличной форме) — создание обучающей и тестовой выборки.

В работе [9] описан подход к формированию выборки для обучения модели. В частности, отобраны количественно-качественные входные параметры, влияющие на характеристики проектируемого объекта (техничко-экономические показатели, отдельные архитектурные, объемно-планировочные и технические решения — входные параметры).

В качестве выходных параметров, значимых в рамках поставленной задачи, первично были выбраны материальные ресурсы, имеющие суммарный стоимостной показатель более 68 % от общей сметной стоимости (что эквивалентно более 93 % от сметной стоимости всех материалов, необходимых для строительства, без учета совокупных затрат непосредственно на монтажные работы и использование механизмов) в общих расходах на строительство МКД. Кроме того, в качестве производного параметра от МР и оборудования в набор данных обучающей выборки был добавлен ключевой параметр для последующей оценки эффективности работы модели — общая сметная стоимость строительства.

Представленные выходные параметры обобщены до предельных классов, к примеру, арматуры

различных диаметров были обобщены до класса «арматура» с единицами измерения в тоннах. Указанное обобщение в рамках одного класса фактически представляло собой первый этап процесса нормализации данных, который предшествует построению моделей на базе МО и обеспечивает корректную и устойчивую работу будущих моделей.

Нормализация — важный этап подготовки МО, призванный привести различные сведения в разных единицах измерения и диапазонах значений к единому виду, что позволит впоследствии сравнивать их между собой или использовать для расчета схожести объектов.

Вторым этапом нормализации данных было устранение выбросов посредством функции линейной регрессии.

В результате сформирован первичный объем выборки, состоящей из нормализованных проектных решений для каждого из выбранных объектов, при этом сформированная выборка МР (выходных параметров) отвечает одновременно двум параметрам:

1) каждое выходное значение выборки имеет значимый стоимостной показатель в общих расходах на строительство МКД;

2) среди совокупности выходных параметров представлены все основные разделы проектной документации⁵, содержащие материальные ресурсы, необходимые для строительства, а именно — архи-

⁵ О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию : Постановление Правительства Российской Федерации от 16.02.2008 № 87.

Табл. 2. Значения коэффициента корреляции Пирсона значимых параметров выборки

Table 2. Pearson correlation coefficient values of significant selection parameters

Наименование параметра Name of the parameter	Общая площадь объекта The total area of the object	Строительный объем объекта The building volume of the object	Строительный объем подземной части здания The construction volume of the underground part of the building	Строительный объем надземной части здания The building volume of the aboveground part of the building	Общая площадь квартир объекта The total area of the apartments of the object	Количество подземных этажей Number of underground floors	Среднее значение площади подземного этажа The average value of the underground floor area	Количество жителей объекта The number of residents of the object	Суммарная площадь ветроенных помещений надземной части здания The total area of the built-in premises of the above-ground part of the building	Общее количество машино-мест на подземной стоянке автомобилей The total number of parking spaces in the underground parking lot	Суммарная площадь помещения по всем этажам стоянки автомобилей The total area of the premises on all floors of the parking lot
Наружное остекление Exterior glazing	0,98	0,93	0,81	0,92	0,89	0,68	0,77	0,83	0,72	0,81	0,82

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Наименование параметра Name of the parameter	Общая площадь объекта The total area of the object	Строительный объем объекта The building volume of the object	Строительный объем подземной части здания The construction volume of the underground part of the building	Строительный объем надземной части здания The building volume of the aboveground part of the building	Общая площадь квартир объекта The total area of the apartments of the object	Количество подземных этажей Number of underground floors	Среднее значение площади подземного этажа The average value of the underground floor area	Количество жителей объекта The number of residents of the object	Суммарная площадь ветровенных помещений надземной части здания The total area of the built-in premises of the above-ground part of the building	Общее количество машино-мест на подземной стоянке автомобилей The total number of parking spaces in the underground parking lot	Суммарная площадь помещения по всем этажам стоянки автомобилей The total area of the premises on all floors of the parking lot
Арматура Fittings	0,97	0,91	0,80	0,90	0,87	0,66	0,77	0,81	0,69	0,80	0,80
Монолитный железобетон Monolithic reinforced concrete	0,92	0,95	0,82	0,96	0,92	0,62	0,84	0,88	0,68	0,79	0,80
Щит электрический Electric shield	0,89	0,85	0,64	0,90	0,92	0,54	0,70	0,87	0,55	0,62	0,66
Насосная установка Pumping station	0,87	0,92	0,91	0,86	0,72	0,79	0,69	0,62	0,84	0,89	0,91
Прибор отопления Heating device	0,89	0,92	0,77	0,93	0,90	0,65	0,76	0,88	0,65	0,77	0,77
Труба пластиковая Plastic pipe	0,63	0,69	0,47	0,76	0,75	0,37	0,59	0,79	0,44	0,42	0,44
Труба стальная Steel pipe	0,82	0,78	0,75	0,73	0,64	0,64	0,67	0,60	0,66	0,75	0,79
Электрокабель Electric cable	0,89	0,92	0,87	0,93	0,91	0,84	0,76	0,87	0,83	0,88	0,90
Телекоммуникационный шкаф Telecommunication cabinet	0,79	0,73	0,62	0,74	0,75	0,59	0,54	0,68	0,51	0,69	0,69
Извещатель пожарный Fire detector	0,88	0,87	0,72	0,89	0,90	0,72	0,69	0,86	0,60	0,75	0,71
Общая сметная стоимость строительства The total estimated cost of construction	0,94	0,94	0,68	0,92	0,94	0,09	0,85	0,94	0,70	0,77	0,81

тектурные решения (AP), конструктивные и объемно-планировочные решения (KP), сведения об инженерном оборудовании, о сетях и системах инженерно-технического обеспечения (ИОС).

На основании коэффициента корреляции Пирсона по каждому из выбранных параметров подтверждена верность альтернативной гипотезы — значения полученных коэффициентов (табл. 2) демонстрируют значимую линейную взаимосвязь выделенных входных и выходных параметров ОС.

Обучение моделей

Процесс выбора лучшей модели/ансамбля моделей МО для прогнозирования основывался на срав-

нении нескольких типов регрессионных моделей, включая метод опорных векторов (SVM), ARD регрессию (ARDRegression), гауссовский процесс регрессии (GaussianProcessRegressor) и градиентный бустинг регрессор (GradientBoostingRegressor). Модели представляют собой различные подходы в МО, каждый из которых имеет уникальные особенности, делающие подходящими для решения поставленных задач, включая прогнозирование МР и оборудования для строительства.

Процесс обучения разделен на эпохи — полные циклы обучения модели МО на итерации набора данных. По итогу завершения каждой эпохи об-

учения с помощью вычисления корня квадратного из среднеквадратичной ошибки (RMSE) производилась проверка качества работы модели для оценки прогресса модели и принятия решения об окончании обучения для последующей проверки на тестовой выборке. Такой подход обусловлен сложным набором неструктурированных данных и позволял итеративно добиться требуемых диапазонов RMSE, отслеживая при этом прогресс обучения моделей.

После обучения качество обучения полученной модели оценивалось на тестовой выборке. Для каждой модели вычислялся коэффициент детерминации R^2 , который отражает долю вариации зависимой переменной, объясненную независимыми переменными модели. Высокое значение R^2 указывает на лучшее качество прогнозов модели.

Коэффициент детерминации является статистическим показателем, используемым для оценки качества модели в задачах регрессии. Он показывает, какая доля вариации зависимой переменной объясняется независимыми переменными модели:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где n — количество наблюдений; y_i — фактические значения зависимой переменной; \hat{y}_i — предсказанные моделью значения; \bar{y} — среднее значение фактических значений зависимой переменной.

Коэффициент детерминации колеблется от 0 до 1, где 0 указывает на то, что модель не объясняет вариацию зависимой переменной, а 1 — что модель идеально объясняет вариацию. В общем, чем ближе значение R^2 к 1, тем лучше модель «подходит» для данных. Это позволяет оценить, насколько хорошо модель может предсказывать или описывать исходы в рамках данных, на которых она была обучена.

Другой важной метрикой, определяющей эффективность предсказания модели, является RMSE прогноза тестовой выборки. Среднеквадратичная ошибка — метрика, показывающая, насколько далеки в среднем прогнозируемые значения от наблюдаемых (фактических) значений в модели. RMSE рассчитывается по формуле:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\hat{y}_k - y_k)^2},$$

где N — количество наблюдений; \hat{y}_k — предсказанные моделью значения; y_k — фактические значения зависимой переменной.

В качестве дополнительного параметра также анализировались значения средней абсолютной ошибки (MAE) для каждой модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Благодаря использованию инструмента AutoML удалось получить ансамбли на основе сразу нескольких моделей, что позволило на представленном наборе

данных получить достаточно точные предсказания параметров на тестовой выборке.

В общем виде AutoML представляет собой итеративный процесс обучения различных моделей на базе обучающей выборки, содержащий эксперименты с несколькими алгоритмами МО. В действительности предсказать на начальном этапе, какие модели будут давать приемлемые результаты при работе с заданной обучающей выборкой сложно, поэтому AutoML фактически перебирает значительное количество моделей, чтобы сравнить их точность, прежде чем выбрать модель/ансамбль моделей, максимально адаптированный под обучающую выборку. Решение сложной вычислительной задачи предполагает использование ансамблей — сочетания нескольких алгоритмов МО, одновременно обучающихся и исправляющих ошибки друг друга. При этом каждая итерация фактически представляет собой определенную эпоху обучения. При работе с заданной обучающей выборкой для каждого класса было произведено от 25 до 80 эпох обучения (рис. 3).

Последующий выбор ансамбля моделей (в большинстве случаев объединение нескольких моделей в одну и прогноз выходных данных на базе ансамбля моделей превосходит результат одной модели) можно было бы определить по метрике модели. Различные показатели модели возвращаются после обучения регрессионных и классификационных моделей, запускающих инструмент обучения с использованием AutoML.

Результаты, полученные для каждой модели, сравниваются на основе их R^2 и RMSE на тестовой выборке. Модели, обладающие наименьшим значением корня квадратного из среднеквадратичной ошибки и с самым высоким коэффициентом детерминации, выбираются в ансамбль как лучшие, поскольку они демонстрируют наибольшую точность прогнозирования в сравнении с другими моделями. В качестве примера приведен анализ моделей на примере выходного параметра «Арматура» (табл. 3), при этом аналогичное сравнение было проведено для всех выходных параметров. В табл. 4 представлен анализ моделей по определению общей сметной стоимости объекта.

Исследование показало, что для каждого класса ансамбли модели, основанные на методах опорных векторов и градиентного бустинга, показали лучшие результаты и отобраны с целью дальнейшей работы по прогнозированию объемов материалов и оборудования, а также сметной стоимости для ранних этапов ЖЦ ОС.

Метод опорных векторов (SVM) — один из популярных алгоритмов машинного обучения, который используется для задач классификации и регрессии. Он основан на идее поиска оптимальной гиперплоскости, которая разделяет данные разных классов [11].

Отдельно следует обратить внимание, что модели МО, основанные на методе опорных векторов,

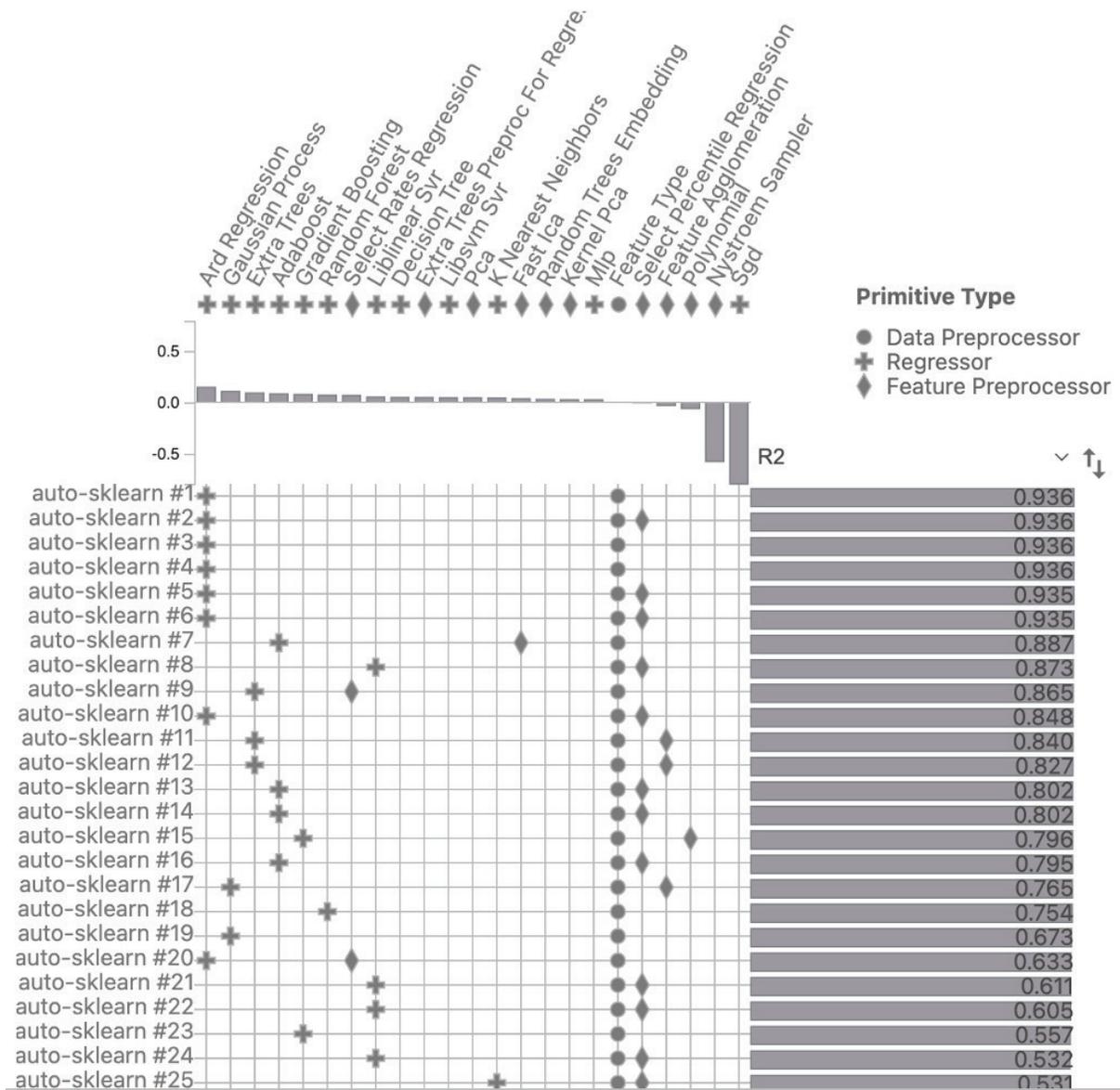


Рис. 3. Первые 25 эпох обучения моделей с помощью AutoML для класса «Арматура»

Fig. 3. The first 25 epochs of model training using AutoML for the “Armature” class

Табл. 3. Сравнительный анализ результатов работы моделей для класса «Арматура»

Table 3. Comparative analysis of the results of the models for the “Armature” class

Параметры каждой модели, отобранной в ансамбль Parameters of each model selected in the ensemble				Параметры ансамбля моделей, выполняющего прогноз Parameters of the ensemble of models performing the forecast		
Наименование модели Name of the model	ensemble_ R ²	ensemble_ MAE	ensemble_ RMSE	R ²	MAE	RMSE
Гауссовская регрессия Gaussian_process	0,882677821	226177,6406	111672000000	0,90062	245654,4863	94591846877
АОР регрессия Ard_regression	0,739256749	342365,543	248186000000	0,90062	245654,4863	94591846877
Метод опорных векторов Libsvm_svr	0,657690116	418923,4844	325825E000000	0,90062	245654,4863	94591846877
Градиентный бустинг Gradient_boosting	0,919311528	190765,6953	76802678072	0,90062	245654,4863	94591846877
Метод опорных векторов Libsvm_svr	0,8827941	250391,5391	111562000000	0,90062	245654,4863	94591846877

Табл. 4. Сравнительный анализ результатов работы моделей по определению общей сметной стоимости

Table 4. Comparative analysis of the results of the models to determine the total estimated cost

Параметры каждой модели, отобранной в ансамбль Parameters of each model selected in the ensemble				Параметры ансамбля моделей, выполняющего прогноз Parameters of the ensemble of models performing the forecast		
Наименование модели Name of the model	ensemble_R ²	ensemble_MAE	ensemble_RMSE	R ²	MAE	RMSE
АОР регрессия Ard_regression	0,838993445	1982810,362	5,84055E+12	0,9375	1227033,666	2,26758E+12
Алгоритм усиления классификаторов Adaboost	0,679393077	2128835,404	1,16301E+13	0,9375	1227033,666	2,26758E+12
Метод опорных векторов Libsvm_svr	-0,846241455	7573039,332	6,69729E+13	0,9375	1227033,666	2,26758E+12
АОР регрессия Ard_regression	0,83899669	1982793,837	5,84044E+12	0,9375	1227033,666	2,26758E+12
Метод опорных векторов Liblinear_svr	0,721958326	2820051,539	1,0086E+13	0,9375	1227033,666	2,26758E+12
Многослойный персептрон Mlp	0,231702029	3811885,179	2,78702E+13	0,9375	1227033,666	2,26758E+12
Алгоритм усиления классификаторов Adaboost	0,172470109	2373370,854	3,00189E+13	0,9375	1227033,666	2,26758E+12
Метод опорных векторов Liblinear_svr	0,542422317	2401944,004	1,65987E+13	0,9375	1227033,666	2,26758E+12

открыли новые возможности для инновационных исследований в области экономики энергетики и финансов [12–21]. В частности, по энергетическому и финансовому применению различных методов МО прогнозирование цен на сырую нефть и электроэнергию [13, 14] является наиболее популярной областью использования, при этом SVM-модели — одни из наиболее актуальных методов МО, применяемых в области экономики энергетики.

Градиентный бустинг (XGBoost) известен своей способностью достигать высоких уровней точности в различных задачах МО. Это достигается через усовершенствованные методы регуляризации, а именно L1 (лассо регрессия) и L2 (ридж-регрессия), которые помогают предотвратить переобучение, что является критически важным во многих реальных приложениях [15]. В целом [16–18] XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) представляет собой ансамблевый алгоритм МО, используемый для уменьшения смещения и дисперсии в обучении с учителем.

Этот метод отвечает на вопрос о возможности «слабых» обучающихся алгоритмов с результатами ненамного лучше случайного гадания усовершенствоваться до «сильного» обучающегося алгоритма произвольной точности. Таким образом, основополагающий принцип метода бустинга заключается в последовательном применении слабых алгорит-

мов обучения с каждым последующим уменьшением смещения всей модели. Такой алгоритм позволяет преобразовать слабые модели в мощную ансамблевую [19].

Использование моделей МО существенно повышает качество массовой оценки по сравнению с традиционными статистическими моделями на основе линейной регрессии. При этом все три использованные модели дают одинаковую точность аппроксимации исходных данных.

После выбора базового ансамбля моделей был проведен дополнительный анализ результатов, включая проверку на переобучение и интерпретацию значимости используемых признаков (табл. 5).

Приведенные в табл. 5 данные наглядно демонстрируют прогнозы выбранных ансамблей моделей, в частности, среднее значение отношения фактических к прогнозным значениям для классов, содержащих объемы материалов и оборудования (совокупное среднее значение для всех классов, приведенных в табл. 2), составило 0,813 в меньшую сторону и 1,205 в большую сторону (установлено для класса «Арматура»). Вместе с тем среднее значение отношения фактических к прогнозным значениям для общей сметной стоимости строительства объекта составило 0,927 в меньшую сторону и 1,035 в большую сторону. Таким образом, диапазон по-

Табл. 5. Сравнительный анализ результатов работы ансамбля моделей

Table 5. Comparative analysis of the results of the ensemble of models

Номер объекта тестовой выборки The number of the test selection object	Наименование прогнозируемого класса Name of the predicted class	Тестовая выборка Test selection		Значение точности прогноза The value of forecast accuracy	
		Фактическое значение The actual value	Прогнозное значение The predicted value	Отношение фактического к прогнозному значению по каждому объекту The ratio of the actual to the forecast value for each object	Среднее значение отношения фактического к прогнозному значению по каждому объекту The average value of the ratio of the actual to the forecast value for each object
15	Арматура Fittings	2551856	1923616,3	0,85	0,928
13		591533	581380,59	0,98	0,928
09		1721781	1591521,3	0,92	0,928
03		3134300	3475629,2	1,11	1,205
24		951343	1234753,2	1,3	1,205
21		3373092	3111124,4	0,92	0,928
08		3096100	2815636,3	0,91	0,928
04		2473160	2443746,7	0,99	0,928
15	Общая сметная стоимость (в ценах 2000 г.) Total estimated cost (expressed in 2000 prices)	14862660	14579207	0,98	0,927
28		10350570	10753252	1,04	1,035
09		14710230	12101471	0,82	0,927
14		10658730	9955923	0,93	0,927
24		9996520	8755112	0,88	0,927
6		14862660	14579207	0,98	0,927
31		16941090	17369726	1,03	1,035
34		12664580	12249583	0,97	0,927

грешности при определении сметной стоимости составил $\pm 8\%$, что, в свою очередь, (табл. 1) приближено к точности, соответствующей этапу «Рабочая документация».

На основе полученных результатов исследования можно сделать вывод о значительном потенциале применения методов МО в строительной отрасли не только для предсказания потребностей в ресурсах, но и для оптимизации всего процесса строительства. Прежде всего необходимо отметить, что благодаря использованию ансамбля моделей МО, основанного на методе опорных векторов и градиентного бустинга, точность прогнозирования составила $\pm 8\%$, при этом в качестве входных параметров (или параметров, вводимых пользователем для проведения оценки) использовались 11 количественно-качественных входных параметров, описывающих характеристики проектируемого объекта, формирование которых возможно на ранних этапах ЖЦ объекта без разработки проектной и предпроектной документации. Итак, значительно повышается точность (до диапазонов, соответствующих этапу разработки

рабочей документации для объекта строительства) прогнозов общей сметной стоимости, а также появляется возможность прогнозирования с заданной точностью объемов материалов и оборудования на ранних этапах ЖЦ ОС.

Кроме того, фактически появляется вариативность выявления общей сметной стоимости, которую условно можно разделить на два класса — ресурсный и сметный методы определения общей стоимости строительства. Сметный метод предполагает непосредственный прогноз общей сметной стоимости, тогда как ресурсный метод позволяет определять общую сметную стоимость как производный параметр на базе полученного прогноза по объемам материалов и оборудованию.

Наличие прогноза по материалам и оборудованию с приведенной степенью точности позволит сформировать методику принятия управленческих решений на различных этапах ЖЦ объекта, которая может оптимизировать такие процессы, как выбор генеральной подрядной организации, разработка проекта организации строительства, контроль каче-

ства разработки предпроектной и проектной документации.

На основе полученных результатов исследования для прогнозирования потребностей в строительных материалах и оборудовании можно предположить несколько ключевых направлений для дальнейших исследований в данной области:

1. Расширение исходных данных.

Для улучшения точности и обобщаемости моделей МО в строительстве будущие исследования могут включать, с одной стороны, больший объем данных в виде готовых разделов проектной документации по МКД, с другой — более широкий спектр выходных параметров объекта, формирующих объемлющую матрицу параметров (например, введение дополнительных классов по материалам и оборудованию, определение параметров технических присоединений и т.д.), прогнозирование которых позволит качественно улучшить процесс принятия управленческих решений на различных этапах ЖЦ объекта, таких как климатические условия, экономические индикаторы и данные о поставщиках. Интеграция этих сведений может способствовать разработке более надежных прогностических моделей с более высокими диапазонами точности.

2. Рассмотрение других классов функционального назначения объектов строительства.

В проведенном исследовании авторы ограничили область изучения до МКД, однако очевидно, что предложенный подход релевантен и для других типов объектов строительства — общественных, производственных и складских.

3. Автоматизация процессов принятия решений.

Интеграция моделей МО с системами управления проектами может способствовать автоматизации процессов принятия решений, ускоряя планирование и реализацию строительных проектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены существующие модели МО, на основе сравнения результатов работы моделей выбраны оптимальные для прогнозирования выходных параметров объекта строительства (объем материалов и оборудования, необходимых для строительства объектов, а также общая сметная стоимость) на базе значимых входных параметров (количественно-качественные показатели, описывающие характеристики объекта) — ансамбли модели, основанные на методах опорных векторов и градиентного бустинга. Представлено заключение о точности работы модели, находящейся в диапазоне $\pm 8\%$, что соответствует этапу «Рабочая документация».

Приведен вывод о перспективности применения указанной модели для повышения точности прогнозов и оптимизации принятия управленческих решений на ранних этапах ЖЦ ОС. Кроме того, сделано предположение о возможности формирования методики принятия управленческих решений на различных этапах ЖЦ объекта, оптимизирующей такие процессы, как выбор генеральной подрядной организации, разработка проекта организации строительства, контроль качества разработки предпроектной и проектной документации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Секушин С.В., Курбацкая Е.П., Петровский А.И. Актуальные вопросы ценообразования и сметного нормирования в строительной отрасли Российской Федерации // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». 2022. № 7. С. 40–45. EDN CFMOZV.

2. Сорокин И.В., Настычук А.В. Анализ опыта применения методов машинного обучения в строительной отрасли России // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 1. С. 18. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-11-1-18-18. EDN WEOBVP.

3. Петровский А.И., Капустина Н.В. Взаимосвязь точности оценки стоимости строительства и экономической эффективности инвестиционно-строительных проектов // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки. 2021. № 1. С. 165–169. DOI: 10.22394/2079-1690-2021-1-1-165-169. EDN FVZTTT.

4. 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. № 11. С. 1537–1550. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1537-1550. EDN JFYSSO.

5. Кирьянова Л.В., Сулейманов Н.Ф. Сравнение регрессионных моделей стоимости жилищного строительства в Венгрии, полученных методами машинного обучения // Экономика и предпринимательство. 2023. № 5 (154). С. 636–641. DOI: 10.34925/EIP.2023.154.5.123. EDN HSQACR.

6. Михайлова Е.В., Савина В.В., Савин И.М. Искусственный интеллект как инструмент оптимизации ресурсных графиков // Строительное производство. 2022. № 2. С. 52–56. DOI: 10.54950/26585340_2022_2_52. EDN AODBGS.

7. Колчин В.Н. Специфика применения технологии «искусственного интеллекта» в строительстве // Инновации и инвестиции. 2022. № 3. С. 250–253. EDN JJLECU. EDN JJLECU.

8. Blanco J.L., Fuchs S., Parsons M., Ribeirin-ho M.J. Artificial intelligence: Construction technology's next frontier // Capital projects & infrastructure. April 2018.

9. Макаров А.Н., Гуреев М.В. Определение параметров модели прогнозирования материальных ресур-

сов для строительства жилых зданий на этапе обособления инвестиций // Строительное производство. 2023. № 4. С. 97–104. DOI: 10.54950/26585340_2023_4_97. EDN XELYIL.

10. Низамов И.В., Еловенко Д.А. Обзор технологий AutoML, имеющихся инструментов, пример применения и сравнительный анализ с классическим решением // Молодежный вестник ИрГТУ. 2022. Т. 12. № 3. С. 468–475. EDN TMBATS.

11. Добашин А.С., Степанов Г.С., Гоголин И.А., Гаджиев Д.М. Использование математической статистики и программирования для решения практических задач машинного обучения // Актуальные исследования высшей школы 2023 : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 229–242. DOI: 10.46916/03052023-2-978-5-00174-965-3. EDN NKBEGL.

12. Саранин З.А. Обзор практики применения методов машинного обучения в экономике энергетики // Молодежная неделя науки Института промышленного менеджмента, экономики и торговли : сб. тр. Всеросс. студ. науч.-учеб. конф. 2023. С. 256–258. EDN OHSVAR.

13. Entezari A., Aslani A., Zahedi R., Noorollahi Y. Artificial intelligence and machine learning in energy systems : a bibliographic perspective // Energy Strategy Reviews. 2023. Vol. 45. P. 101017. DOI: 10.1016/j.esr.2022.101017

14. Ahmad T., Zhu H., Zhang D., Tariq R., Bas-sam A., Ullah F. et al. Energetics Systems and artificial intelligence: applications of industry 4.0 // Energy Reports. 2022. Vol. 8. Pp. 334–361. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.256

15. Сухов А.А., Суханкин А.А. Сравнительный анализ лучших алгоритмов градиентного бустинга:

CATBOOST, XGBOOST, LIGHT GBM. Рекомендации к их применению // Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности : сб. мат. XXIII Междунар. науч.-практ. конф. 2024. С. 287–293. EDN AKOAVR.

16. Machado M.R., Karray S., de Sousa I.T. Light-GBM: an effective decision tree gradient boosting method to predict customer loyalty in the finance industry // 2019 14th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). 2019. Pp. 1111–1116. DOI: 10.1109/ICCSE.2019.8845529

17. Chen T., Guestrin C. XGBoost // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. Pp. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785

18. Liu X., Wang T. Application of XGBOOST model on potential 5G mobile users forecast // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2023. Pp. 1492–1500. DOI: 10.1007/978-981-19-3387-5_177

19. Острикова А.Л., Селютин В.В. Инновационные технологии массовой оценки жилой недвижимости // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2023. Т. 1. № 8. С. 147–154. DOI: 10.23885/2500-395X-2023-1-8-147-154. EDN PYQMGE.

20. Faisal A., Yigitcanlar T., Kamruzzaman M., Paz A. Mapping two decades of autonomous vehicle research : a systematic scientometric analysis // Journal of Urban Technology. 2020. Vol. 28. Issue 3–4. Pp. 45–74. DOI: 10.1080/10630732.2020.1780868

21. Sari R., Voyvoda E., Lacey-Barnacle M., Karababa E., Topal C., Islambay D. Energy justice: a social sciences and humanities cross-cutting theme report. Cambridge, 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.33861.35043

Поступила в редакцию 19 июня 2024 г.

Принята в доработанном виде 21 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 25 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Михаил Владимирович Гуреев** — аспирант кафедры технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6188-6750, ORCID: 0009-0002-3069-7614; mvgureev@gmail.com;

Александр Николаевич Макаров — кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2460-1473, ORCID: 0000-0001-8421-1013; anmakarof@yandex.ru.

Вклад авторов:

Гуреев М.В. — концепция исследования, разработка методологии, написание исходного текста и итоговые выводы.

Макаров А.Н. — научное руководство, доработка концепции исследования, развитие методологии, доработка текста и итоговых выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Sekushin S.V., Kurbatskaya E.P., Petrovsky A.I. Current issues of price formation and cost estimating in Russian construction industry. *Bulletin of the Scientific Council of JSC "IERT"*. 2022; 7:40-45. EDN CFMOZV. (rus.).
2. Sorokin I., Nastychuk A. Analysis of the experience of applying machine learning methods in the Russian construction industry. *Construction and Architecture*. 2023; 11(1):18. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-11-1-18-18. EDN WEOBBP. (rus.).
3. Petrovskiy A.I., Kapustina N.V. Relationship between construction cost estimation accuracy and cost effectiveness of investment and construction projects. *State and Municipal Management. Scholar Notes*. 2021; 1:165-169. DOI: 10.22394/2079-1690-2021-1-1-165-169. EDN FVZTTT. (rus.).
4. 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. EDN JFYSSO. (rus.).
5. Kirianova L.V., Suleimanov N.F. Comparison of machine learning regression models of housing costs in Hungary. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2023; 5(154):636-641. DOI: 10.34925/EIP.2023.154.5.123. EDN HSQACR. (rus.).
6. Mikhailova E.V., Savina V.V., Savin I.M. Artificial intelligence as a tool for optimizing resource schedules. *Construction Production*. 2022; 2:52-56. DOI: 10.54950/26585340_2022_2_52. EDN AODBGs. (rus.).
7. Kolchin V.N. The specifics of the use of "artificial intelligence" technology in construction. *Innovations and Investments*. 2022; 3:250-253. EDN JJLECU. (rus.).
8. Blanco J.L., Fuchs S., Parsons M., Ribeirinho M.J. Artificial intelligence: Construction technology's next frontier. *Capital projects & infrastructure*. April 2018.
9. Makarov A.N., Gureev M.V. Determining the parameters of a model for forecasting material resources for the construction of residential buildings at the investment feasibility assessment stage. *Construction Production*. 2023; 4:97-104. DOI: 10.54950/26585340_2023_4_97. EDN XELYIL. (rus.).
10. Nizamov I.V., Elovenko D.A. Overview of AutoML technology, available tools, application example and comparative analysis with the classic solution. *Young Researchers' Journal of ISTU*. 2022; 12(3):468-475. EDN TMBATS. (rus.).
11. Dobashin A.S., Stepanov G.S., Gogolin I.A., Gadzhiev D.M. Using mathematical statistics and programming to solve practical machine learning problems. *Actual Studies of Higher Education 2023: collection of articles of the International Scientific and Practical Conference*. 2023; 229-242. DOI: 10.46916/03052023-2-978-5-00174-965-3. EDN NKBEGI. (rus.).
12. Saranin Z.A. Review of the practice of applying machine learning methods in energy economics. *Youth Science Week of the Institute of Industrial Management, Economics and Trade : proceedings of the All-Russian Student Scientific and educational conference*. 2023; 256-258. EDN OHSVAR. (rus.).
13. Entezari A., Aslani A., Zahedi R., Noorollahi Y. *Artificial intelligence and machine learning in energy systems : a bibliographic perspective. Energy Strategy Reviews*. 2023; 45:101017. DOI: 10.1016/j.esr.2022.101017
14. Ahmad T., Zhu H., Zhang D., Tariq R., Basam A., Ullah F. et al. *Energetics Systems and artificial intelligence: applications of industry 4.0. Energy Reports*. 2022; 8:334-361. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.256
15. Sukhov A.A., Sukhankin A.A. Comparative analysis of the best gradient boosting algorithms: CATBOOST, XGBOOST, LIGHT GBM. Recommendations for their application. *Challenges of modernity and strategies for the development of society in a new reality : collection of materials of the XXIII International Scientific and Practical Conference*. 2024; 287-293. EDN AKOAVR. (rus.).
16. 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. *2019 14th International Conference on Computer Science & Education (ICCSSE)*. 2019; 1111-1116. DOI: 10.1109/ICCSSE.2019.8845529
17. Chen T., Guestrin C. XGBoost. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2016; 785-794. DOI: 10.1145/2939672.2939785
18. Liu X., Wang T. Application of XGBOOST model on potential 5G mobile users forecast. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2023; 1492-1500. DOI: 10.1007/978-981-19-3387-5_177
19. Ostrikova A.L., Selyutin V.V. Innovative technologies for mass valuation of residential real estate. *Ecology. Economy. Informatics. System Analysis and Mathematical Modeling of Ecological and Economic Systems*. 2023; 1(8):147-154. DOI: 10.23885/2500-395X-2023-1-8-147-154. EDN PYQMGE. (rus.).
20. Faisal A., Yigitcanlar T., Kamruzzaman M., Paz A. Mapping two decades of autonomous vehicle research : a systematic scientometric analysis. *Journal of Urban Technology*. 2020; 28(3-4):45-74. DOI: 10.1080/10630732.2020.1780868
21. Sari R., Voyvoda E., Lacey-Barnacle M., Karababa E., Topal C., Islambay D. *Energy Justice: A Social Sciences and Humanities Cross-Cutting Theme Report*. Cambridge, 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.33861.35043

Received June 19, 2024.

Adopted in revised form on June 21, 2024.

Approved for publication on September 25, 2024.

BIONOTES: **Mikhail V. Gureev** — postgraduate student of the Department of Technologies and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6188-6750, ORCID: 0009-0002-3069-7614; mvgureev@gmail.com;

Aleksandr N. Makarov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2460-1473, ORCID: 0000-0001-8421-1013; anmakarof@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Mikhail V. Gureev — research concept, methodology development, writing the source text and final conclusions.

Aleksandr N. Makarov — scientific guidance, revision of the research concept, development of methodology, revision of the text and final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Стратегическое планирование инновационной деятельности строительного предприятия в проекции системно-сетевых подхода

Инесса Галеевна Лукманова, Вячеслав Александрович Власенко,
Светлана Сергеевна Уварова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Необходимость ускоренного инновационного развития строительных предприятий в условиях высокого уровня неопределенности внешней среды и постоянно реализуемых организационно-экономических изменений обуславливает создание новых научно-методических основ стратегического планирования инновационной деятельности на базе методологии системно-сетевых подходов.

Материалы и методы. Ускоренное создание и внедрение инноваций, необходимое для достижения целей технологического суверенитета, исходя из анализа статистических данных, выводов исследователей и оценки передового зарубежного опыта, осуществляется в рамках сетевого инновационного процесса при взаимодействии множества различных предприятий и организаций по поводу создания новой ценности строительной продукции для потребителей (инновации ценности) на основе долгосрочных общеэкономических и отраслевых трендов, задаваемых форсайт-прогнозом.

Результаты. Обоснована целесообразность применения системно-сетевых подходов при построении инновационной стратегии строительных предприятий, исходя из сетевого характера взаимодействий участников инновационной деятельности в строительстве. В результате когнитивного анализа и моделирования основных показателей инновационной деятельности выявлены драйверы инновационного развития строительного предприятия, в числе которых — развитие стратегических партнерств и кооперационных связей в инновационно-инвестиционной сети.

Выводы. Предложена методика оптимизации сетевых инновационных взаимодействий, в результате практического применения которой повышается эффективность и скорость диффузии инноваций при создании «точек инновационного роста».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительное предприятие, инновационная деятельность, стратегическое планирование, система, сетевые взаимодействия, драйверы, точка роста

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лукманова И.Г., Власенко В.А., Уварова С.С. Стратегическое планирование инновационной деятельности строительного предприятия в проекции системно-сетевых подходов // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1850–1860. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1850-1860

Автор, ответственный за переписку: Светлана Сергеевна Уварова, uvarova_s.s@mail.ru.

Strategic planning of innovation activities of a construction enterprise in the projection of a system-network approach

Inessa G. Lukmanova, Vyacheslav A. Vlasenko, Svetlana S. Uvarova

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

ABSTRACT

Introduction. The need for accelerated innovative development of construction enterprises in conditions of a high level of uncertainty in the external environment and constantly implemented organizational and economic changes determines the creation of new scientific and methodological foundations for strategic planning of innovative activities based on the methodology of the system-network approach.

Materials and methods. Accelerated creation and implementation of innovations necessary to achieve the goals of technological sovereignty, based on the analysis of statistical data, research findings and assessment of advanced foreign experience, is carried out within the framework of a network innovation process with the interaction of many different enterprises and organizations regarding the creation of new construction value products for consumers (value innovation) based on long-term general economic and industry trends set by foresight forecast.

Results. The paper substantiates the feasibility of using a system-network approach when building an innovative strategy for construction enterprises, based on the network nature of interactions between participants in innovative activities in con-

struction. As a result of cognitive analysis and modelling of the main indicators of innovation activity, the drivers of innovative development of a construction enterprise were identified, including the development of strategic partnerships and cooperation links in the innovation and investment network.

Conclusions. A methodology of optimization of network innovative interactions is proposed, the practical application of which increases the efficiency and speed of diffusion of innovations when creating “points of innovative growth”.

KEYWORDS: construction enterprise, innovative activity, strategic planning, system, network interactions, drivers, growth point

FOR CITATION: Lukmanova I.G., Vlasenko V.A., Uvarova S.S. Strategic planning of innovation activities of a construction enterprise in the projection of a system-network approach. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1850-1860. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1850-1860 (rus.).

Corresponding author: Svetlana S. Uvarova, uvarova_s.s@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях высокого уровня неопределенности среды и внешних шоков строительные предприятия и в целом инвестиционно-строительная сфера (ИСС), как открытые самоорганизующиеся системы [1], стремятся к состоянию динамической устойчивости для обеспечения эффективного функционирования и развития. Динамическая устойчивость инвестиционно-строительного комплекса, обеспечивающая не только сохранение на имеющемся уровне, но и стабильный рост показателей, может быть достигнута только при непрерывном взаимосвязанном обновлении производственно-технической базы, организационной структуры управления и экономических основ функционирования на основе инноваций [2]. Именно инновации (в первую очередь технические и технологические) генерируют или катализируют процесс развития, исходя из принципа инновационности [2].

Современное строительство характеризуется активизацией спроса на различные новые эффективные технологические решения, строительные материалы, методы управления и цифровизации, но имманентно присущая данной отрасли инновационная пассивность до сих пор не преодолена и нуждается в единой методологии стратегического планирования. Совершенствование методологии формирования инновационной стратегии строительных предприятий должно основываться на учете существующей ситуации, необходимости формирования технологического суверенитета и реализации политики импортозамещения в строительстве, трендах и тенденциях развития строительной науки и практики, специфике функционирования и взаимодействий субъектов инвестиционно-инновационного процесса. Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы является обоснование методического инструментария стратегического планирования инновационной деятельности строительного предприятия как базового звена ИСС на основе системно-сетового подхода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для достижения цели исследования авторами выбрана следующая последовательность действий:

- обоснование сетевого характера взаимодействий субъектов ИСС с позиции системно-сетового подхода;
- выявление специфики субъектного состава инновационной деятельности в строительстве;
- идентификация драйверов инновационного развития строительных предприятий методом когнитивного анализа и моделирования;
- оптимизация инновационно-инвестиционных взаимодействий строительного предприятия при создании «точки инновационного роста»;
- оценка влияния применения предложенного научно-методического инструментария на стратегию инновационного развития строительного предприятия.

Ускоренное создание и внедрение инноваций, необходимое для достижения целей технологического суверенитета, исходя из анализа статистических данных [3], выводов исследователей [4, 5] и оценки передового зарубежного опыта, осуществляется в рамках сетевого инновационного процесса (ИП) при взаимодействии множества различных предприятий и организаций по поводу создания новой ценности строительной продукции для потребителей (инновации ценности) на основе долгосрочных общеэкономических и отраслевых трендов, задаваемых форсайт-прогнозом [6]. Следует также учесть, что каждая последующая компания в процессе создания ценности является своего рода потребителем продукции на данном технологическом этапе. Это предположение привело исследователей к выводу о создании потребительской стоимости и соответствующей полезности внутри ИСС, а также о возможности роста полезности продукции при увеличении сети [4].

Сложность и разнообразие технологических процессов по созданию инновации ценности предполагают мультисубъектность инновационно-инвестиционных сетевых взаимодействий в строительстве. В результате анализа научной, нормативно-методической, нормативно-технической литературы по рассматриваемой проблематике, а также на основании результатов проведенной экспертной оценки значимости функций каждого из участников инвестиционно-строительного процесса, а также ИП [4, 5, 7–11] сделан ряд выводов относительно субъектного состава инновационной деятельности в строительстве.

Исходя из анализа научной и нормативно-методической литературы, важнейшим классификационным признаком участников инновационной деятельности в ИСС является спектр выполняемых ими функций. Относительно данного признака существует множество предлагаемых авторами классификаций, носящих как подробный, так и укрупненный характер [12]. Стоит выделить классификации по институциональному и организационному признаку, разделяющие участников по секторам науки [13, 14]. Считаем, что такая классификация имеет ограниченное применение, сфокусированное на специфике целеполагания и финансирования инновационной деятельности. Классификации, включающие не только исследовательский, но и управляющий функционал, также нашедшие отражение в научной литературе, систематизируют субъектный состав относительно функции генерации и управления инновационной деятельностью, не отражая специфики ИСС. Аналогичной характеристикой обладают классификации субъектов, отражающие проектный характер инновационной деятельности, а также стадию развития инновационной компании.

Достаточное количество научных работ в сфере управления инновациями в строительстве [7], а также соответствующие методические рекомендации [10] приводят собственные классификации участников реализации ИП в строительстве. Как правило, эти классификации делят участников на три большие группы, включающие разработчиков, потребителей инновации, а также организации, реализующие внедрение и инвестирование инноваций. Необходимо отметить, что в классификациях отсутствует связь с участниками инвестиционно-строительной деятельности (ИСД). Методические рекомендации по оценке эффективности инноваций в строительстве [10] предлагают схему взаимодействия участников инновационной деятельности в привязке к субъектному составу инвестиционно-строительного проекта, однако не включая в этот аспект научно-исследовательские и образовательные организации, что, на наш взгляд, не отражает полного спектра участников сетевых инновационных взаимодействий.

Наиболее полные классификации участников ИСД приведены в работах [4, 8], которые также не включают в спектр субъектов научные и образовательные организации. С позиции сетевого характера ИП достаточно полно спектр участников отражен в труде [15]. Согласимся с мнением исследователей [11, 16] о наличии специфики субъектного состава инновационной деятельности крупных предприятий, особенно холдингового типа.

В процессе реализации ИСД многочисленные субъекты ИСС осуществляют взаимодействия по реализации соответствующих функций. В узком смысле инвестиционно-строительная сфера состоит из ряда предпринимательских сетей, различного типа взаимодействия участников сети, в том числе по поводу раз-

работки и внедрения инноваций. В широком смысле ИСС представляет собой сетевое объединение региональных строительных кластеров (рис. 1).

В целях моделирования инновационно-инвестиционных взаимодействий сетевую модель предлагаем трактовать как консолидированную структуру [17], учитывая ряд свойств и допущений:

- сеть организована для реализации сложного многостадийного волнового процесса создания и диффузии инновации ценности;
- каждый из участников сети наделен определенной ключевой функцией, создающей приращение полезности создаваемой продукции в рамках создания инновации ценности;
- число участников достаточно многообразно;
- участники ИП являются автономными организациями, либо подразделениями холдинга;
- структура и форма сети зависят от процесса создания инновации ценности;
- среди участников безмасштабной сети выделяются участники-аттракторы, представляющие узлы-хабы в рамках сети;
- взаимодействие между участниками сети может носить различный характер и описываться различными потоками ресурсов (материальных, финансовых, информационных и т.п.).

Зачастую динамика специфических особенностей современной ИСС приводит к реорганизации и реструктуризации предприятий, поиску новых сетевых взаимодействий, которые оказываются более или менее эффективными, нежели существующие.

Исходя из разнонаправленности целевых ориентиров участников инновационно-инвестиционной сети, найти оптимальный баланс интересов достаточно сложно, поэтому требуется оптимизировать сетевые инновационные взаимодействия в целевой фокусировке инновации ценности в строительстве. Следовательно, определяется необходимость создания в инновационно-инвестиционной сети узлов-хабов, осуществляющих генерацию первичного спроса, ретрансляция которого на другую продукцию и увеличение вторичного спроса создают в конечном итоге «точку инновационного роста». С учетом результатов эмпирического анализа инновационной деятельности крупных предприятий в строительстве [18, 19] можно сделать вывод, что крупные предприятия, стратегически нацеленные на реализацию инновации ценности, могут являться узлами-хабами безмасштабной сети инновационных взаимодействий в строительстве.

Сетевая форма организации ИП в строительстве приводит к целесообразности применения теории графов и соответствующих методов оптимизации для моделирования сетевых инновационных взаимодействий.

Относительно инновационной деятельности в сети ИСС следует отметить практическое отсутствие прорывных инноваций среди ИП, реализуемых круп-

ными предприятиями, а также имеющиеся тенденции реализации улучшающих инноваций [18]. Преодоление данной инновационной инертности возможно при реализации инновации ценности и формировании «точек инновационного роста» [20–22].

Активизация и развитие точек инновационного роста, а также эффективность диффузии инициировавших их инноваций ценности невозможны без влияния факторов-драйверов. Для идентификации ключевых факторов-драйверов целесообразно

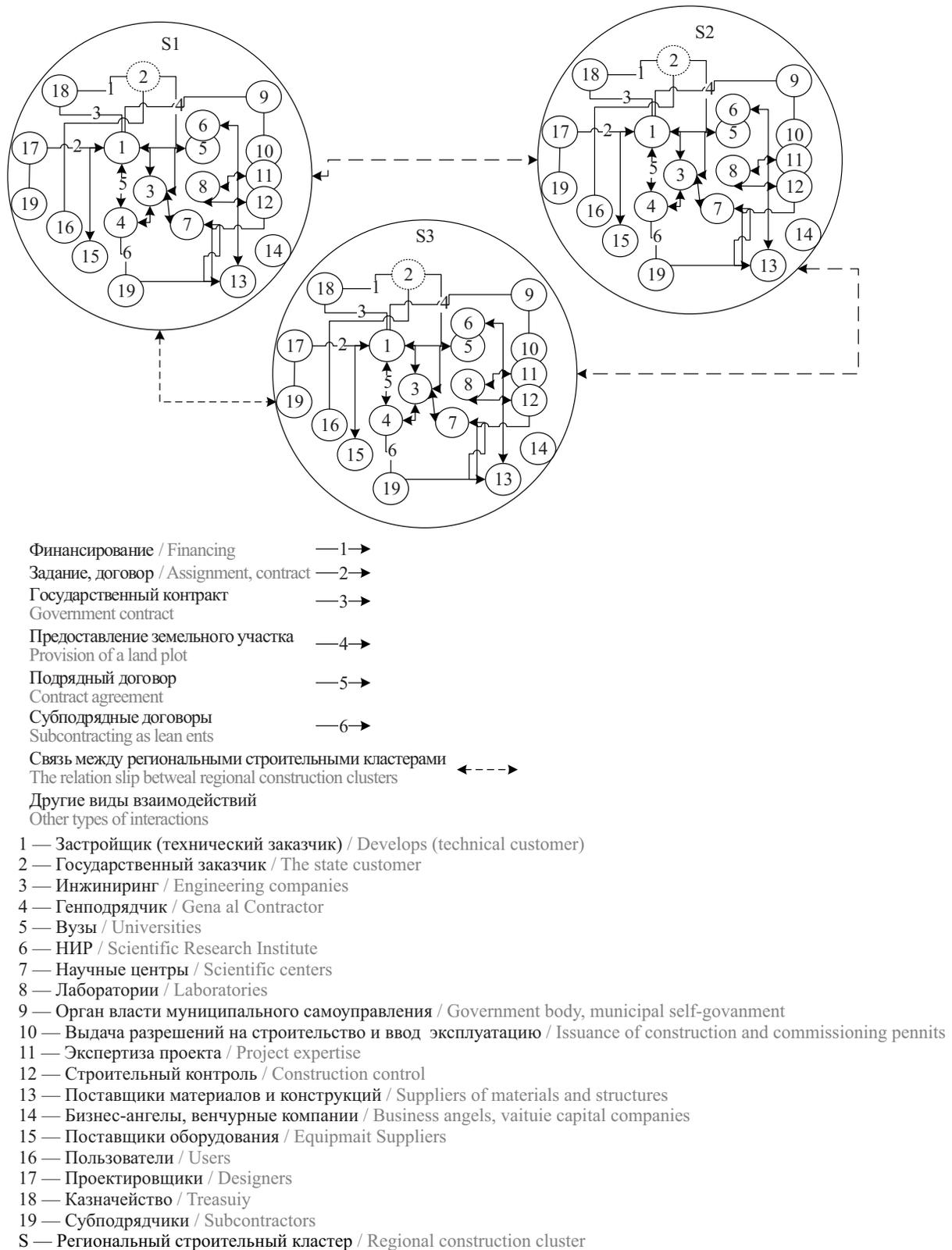


Рис. 1. Сетевое представление функционирования инвестиционно-строительной сферы в инновационной экономике

Fig. 1. Network representation of the functioning of the investment and construction sector in the innovative economy

произвести расчет по модифицированной нечеткой когнитивной карте [20]. Так как предложенная когнитивная карта является нечеткой, по оси ординат приводятся шкалы значений факторов.

При прогнозировании на множестве факторов когнитивной карты определяется целевой образ:

$$O = (P, I(P)),$$

где O — целевой образ развития инновационной деятельности в экономической системе; $P = \{p \in P : i(p) \neq 0\}$ — целевое подмножество показателей или индикаторов развития инновационной деятельности в экономической системе согласно форсайту, стратегии и когнитивному анализу; $I(P)$ — задаваемый импульс показателя.

Для решения задач, поставленных в данной работе, авторами представлена динамика стратегического развития строительного предприятия при создании инновации ценности и соответствующей «точки инновационного роста», на основе когнитивного моделирования обоснованы драйверы активизации «точек инновационного роста» для строительного предприятия АО «РЖДстрой», предложен методический инструмент оптимизации сетевых инновационных взаимодействий на основе теории графов, показана эффективность применения предложенного научно-методического инструментария в стратегическом планировании деятельности компании.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Инновационное развитие предприятия в обычном режиме происходит по циклу формирования и замены устойчивых конкурентных преимуществ [23]. При создании инновации ценности создаются более

долгосрочные конкурентные преимущества, которые, формируя «точки инновационного роста» за счет диффузии инноваций по Хагерстранду на микроуровне, препятствуют продлению жизненного цикла конкурентного преимущества без стадии спада (рис. 2).

Следование инновационной парадигме «форсайт проблем — согласованность взаимодействий по созданию инновации ценности — инновации — спрос» приводит к необходимости повышения согласованности взаимодействий по созданию инновации ценности, что позволит обеспечить эффективное инновационно-стратегическое развитие.

Модель создания инновации ценности и формирования «точек инновационного роста» применена в практике деятельности АО «РЖДстрой» при построении стратегии развития холдинга до 2030 г. В качестве инновации ценности для предприятия еще в 2014 г. выбрано строительство железно-дорожных путей с применением инновационной LVT-технологии, которая на этапе стратегического планирования деятельности до 2030 г. развилась в процесс производства соответствующих инновационных конструкций. Далее инновация ценности привела к формированию «точек инновационного роста» на уровне деятельности предприятия. Принимая в качестве первичного спроса производство инновационных железнодорожных конструкций по технологии LVT и реализацию строительно-монтажных работ (СМР) по их укладке, расширение спектра производимой продукции (за счет доработки в соответствии с климатическими и региональными условиями регионов России) и работ с применением данной технологии, — все это приводит к дальнейшему развитию технологии безбалластного верхнего

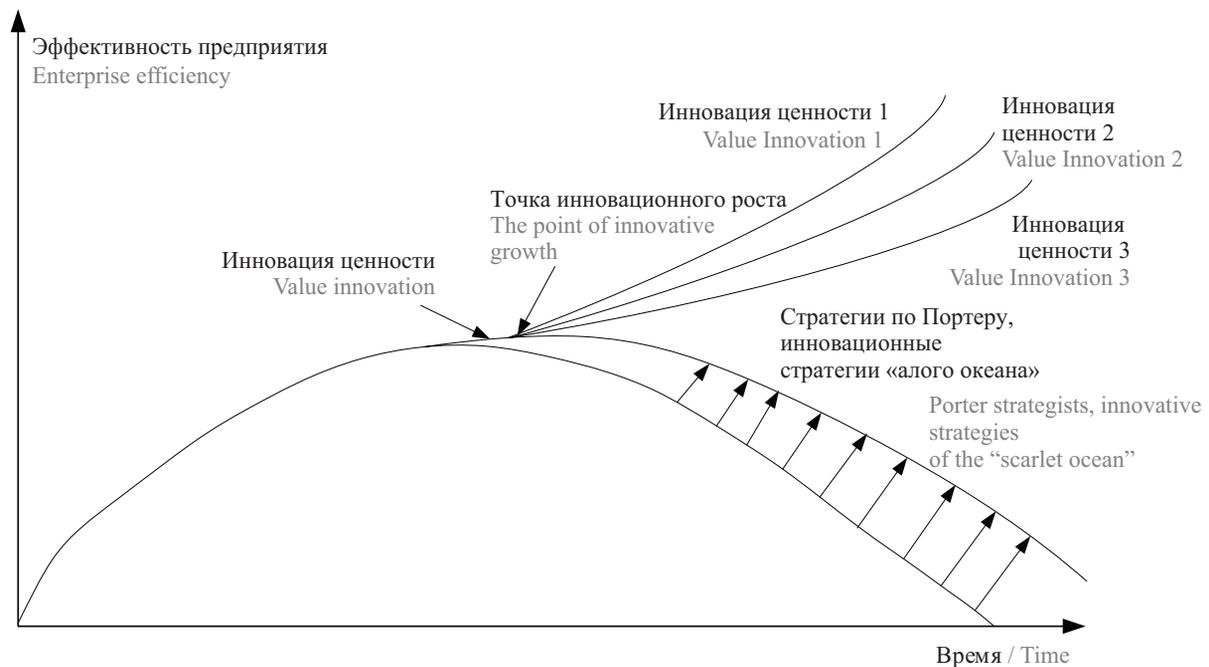


Рис. 2. Инновационное развитие предприятия согласно традиционной и инновационной парадигме

Fig. 2. Innovative development of the enterprise according to the traditional and innovative paradigm

строения пути (БСВП) и производству соответствующих плит БСВП. Сертифицированные и одобренные для применения в проектах железнодорожных высокоскоростных магистралей (ВСМ) БСВП для ВСМ и подготовленный к реализации проект создания нового завода по их производству обеспечит преимущество предприятия на вновь создаваемом рынке железнодорожных конструкций, активизируя вторичный спрос на данную продукцию и создавая новую точку инновационного роста путем разработки еще одной инновации ценности. Элементы этой технологии, включая необходимость их соответствия «зеленым» стандартам, автоматизацию и цифровизацию соответствующих транспортных узлов, формируют и расширяют вторичный спрос на производство СМР по «зеленым» стандартам с последующей реализацией проектов устойчивого развития транспортных узлов и возведением сертифицированных объектов строительства, что, в свою очередь, приводит к расширению вторичного спроса на реализацию проектных и СМР по автоматизации и цифровизации транспортных узлов.

Активизация и развитие «точек инновационного роста», а также эффективность диффузии инициировавших их инноваций ценности невозможны без влияния драйверов [24]. В целях идентификации ключевых драйверов диффузии инновации ценности АО «РЖДстрой», а также прогнозирования результатов влияния соответствующих управляющих воздействий на динамику объемов реализации СМР предприятием (наряду с соответствующим объемом инновационной продукции, работ

и услуг) как основного измерителя диффузии инноваций и влияния «точки инновационного роста» авторами произведен расчет по модифицированной когнитивной карте [19].

Практическая реализация предложенной модификации построения когнитивной карты на примере инновационной деятельности АО «РЖДстрой» показала наличие в качестве «точки инновационного роста» собственного производства инновационных строительных материалов (на базе LVT-технологии и технологий БСВП), а в качестве факторов-драйверов — динамику объемов строительства железных дорог в городских агломерациях (как, например, метрополитен или МЦК, МЦД) и активизацию стратегического партнерства при внедрении инноваций (рис. 3–5).

В результате сравнения альтернатив управляющих воздействий можно сделать выводы о необходимости совершенствования сетевых коммуникаций и взаимодействий АО «РЖДстрой» на основе кооперации по реализации ИП и процессов, целесообразности формирования инновационной политики на основе создания «точек инновационного роста» и участия АО «РЖДстрой» в создании таковых агломераций, необходимости оптимизации механизмов финансирования инвестиций и в инновации для предприятия.

Совершенствование сетевых взаимодействий предприятия при создании инновации ценности и «точки инновационного роста» можно производить по предложенному алгоритму оптимизации (рис. 6).

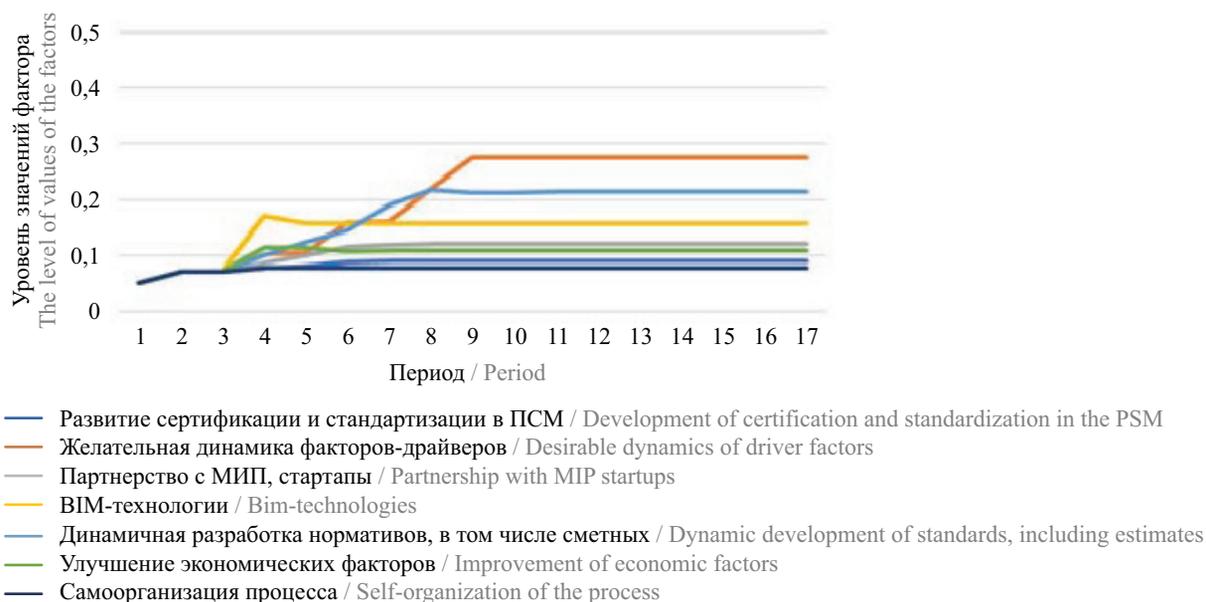


Рис. 3. Прогноз влияния альтернативных управляющих воздействий по целевым показателям (диффузии инноваций, определяемой как рост инновационной продукции в смежных отраслях и регионах) когнитивной карты инновационной деятельности АО «РЖДстрой» при импульсном воздействии на показатели ($vq = +1$)

Fig. 3. Forecast of the impact of alternative control actions on target indicators (diffusion of innovations, defined as the growth of innovative products in related industries and regions) of the cognitive map of innovation activity of JSC “RZDstroy” with an impulse effect on indicators ($vq = +1$)

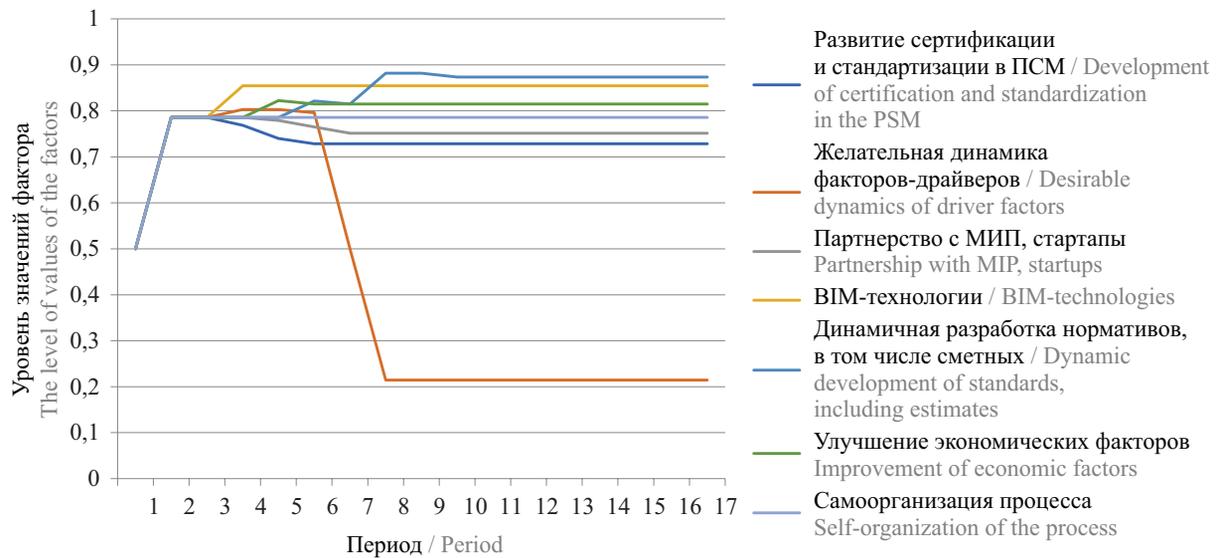


Рис. 4. Прогноз влияния альтернативных управляющих воздействий по целевым показателям (затратам на инновации) когнитивной карты инновационной деятельности АО «РЖДстрой» при импульсном воздействии на показатели ($vq = +1$)

Fig. 4. Forecast of the impact of alternative control actions on target indicators (innovation costs) of the cognitive map of innovation activity of JSC “RZDstroy” with an impulse effect on indicators ($vq = +1$)

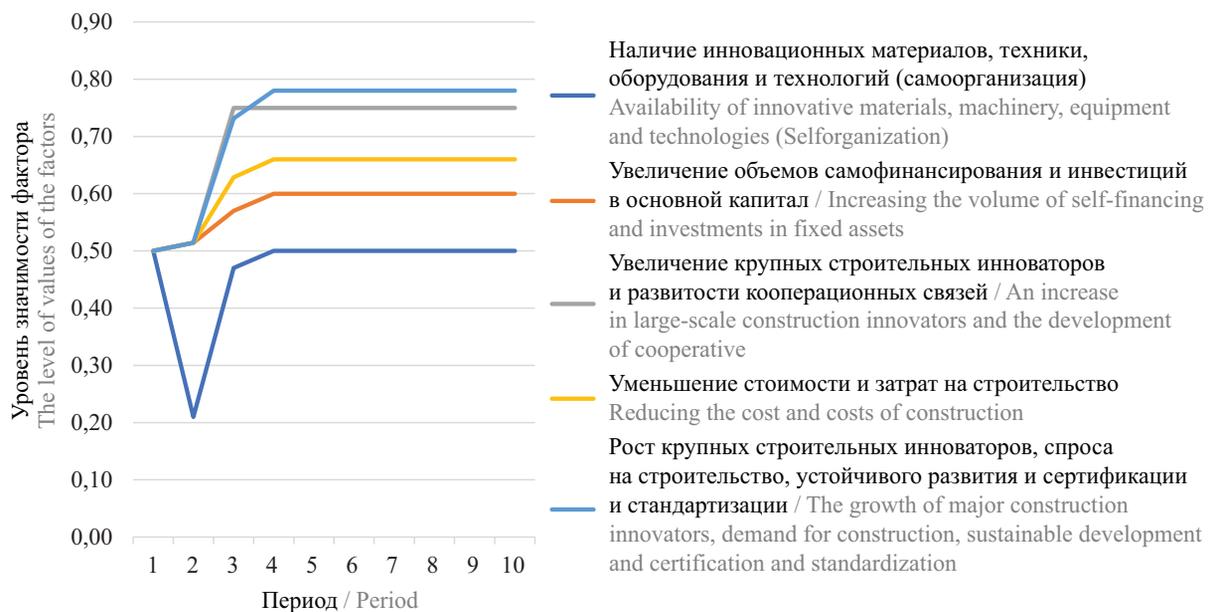


Рис. 5. Когнитивный прогноз динамики объемов инновационной продукции АО «РЖДстрой» при импульсном воздействии на показатели ($vq = +1$)

Fig. 5. Cognitive forecast of the dynamics of the volumes of innovative products of JSC “RZDstroy” with an impulse effect on indicators ($vq = +1$)

Определив субъектный состав участников инновационно-инвестиционной сети для создания «точки инновационного роста» и построив соответствующий граф взаимодействий, можно провести оптимизацию графа по различным критериям оптимальности, т.е. с различными целевыми функциями.

Целевая функция — критерий эффективности сети должен быть оптимальным (рассматриваются поочередно критерии оптимизации для каждого субъекта

инновационно-инвестиционной сети или синергетический критерий):

$$F = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow opt.$$

В качестве синергетического критерия эффективности могут быть выбраны объемные показатели (объем инновационной продукции, затраты на инновации, доля инновационной продукции, доля про-

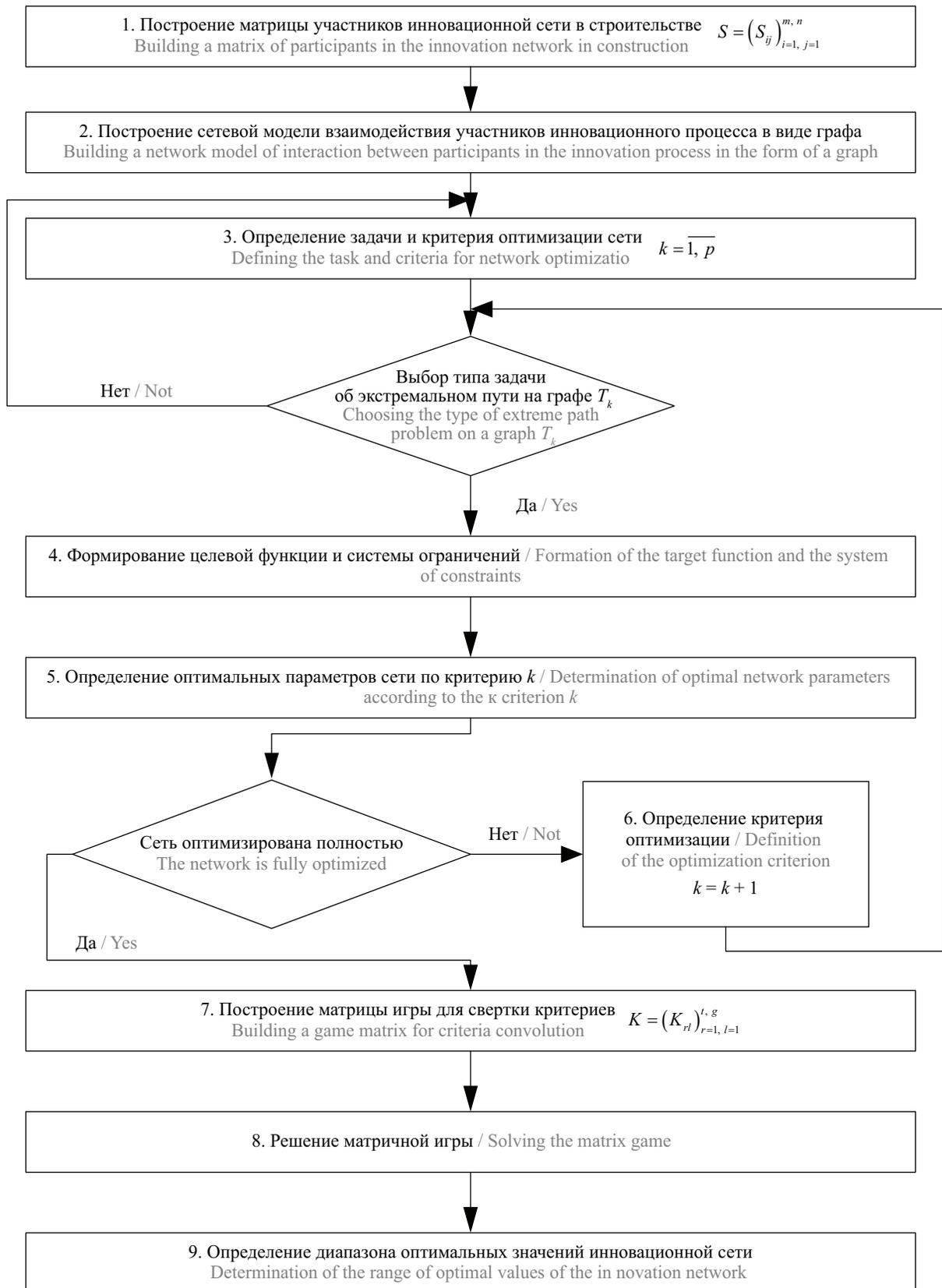


Рис. 6. Блок-схема алгоритма оптимизации сетевых инновационных взаимодействий в ИСС на основе методов теории графов и матричных игр

Fig. 6. Flowchart of an algorithm for optimizing network innovation interactions in the INC based on graph theory and matrix game methods

ривных инноваций и т.п.), структурные характеристики графа (связность, замкнутость, плотность, центральность, структурная избыточность), экономические показатели (транзакционные издержки, затраты, эффект от инновации и т.п.).

Согласно выбранным критериям оптимальности можно провести оптимизацию сетевого графа с целью поиска экстремальных (максимальных и минимальных) путей.

Ограничениями задач оптимизации при этом могут выступать локальные критерии каждого участника инновационной сети (по параметрам затрат, ресурсообеспеченности, рентабельности, прибыли, сроков и т.п.) в зависимости от цели расчета. Интегральный показатель эффективности объединения участников ИС. в инновационную сеть может быть определен при помощи методов матричных игр, исходя из принципа синергизма, заключающегося в необходимости превышения интегральной эффективности сети автономной деятельности участников сети.

Как показала оценка модельных графов взаимодействия предприятий при формировании инновационных стратегий, планирование инновационной деятельности на основе оптимизации сетевых инновационных взаимодействий предприятия в достаточной степени способствует кластеризации экономики

и повышению эффективности диффузии инноваций путем создания «точек инновационного роста».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Опережающее развитие инноваций, считаем, может быть обеспечено путем реализации научно обоснованных управленческих воздействий в рамках стратегического планирования инновационной деятельности на микро-, мезо- и макроуровне экономики. При этом для поддержки принятия грамотных и эффективных управленческих решений и реализации проактивных управленческих воздействий, по мнению авторов, должна быть создана система поддержки принятия решений, основанная на объективных методах экономико-математического моделирования. Поддержка принятия решений на всех уровнях управления инновационной деятельностью должна быть системной и основанной на адаптации методологии форсайта и стратегического планирования к процессам самоорганизации систем, реализации методического инструментария создания «точек инновационного роста» с учетом специфики регионов и отраслей, результативной реализации сетевых инновационных взаимодействий инновационно-активных акторов и эффективного инвестирования инновационной деятельности инновационно-инвестиционной сети.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Trabskaja J., Mets T. Ecosystem as the Source of Entrepreneurial Opportunities. *Foresight and STI Governance*. 2019; 13(4):10-22. DOI: 10.17323/2500-2597.2019.4.10.22
2. Gumba K., Belyaeva S. Specific character of sustainable innovative development of transport construction in self-regulation conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 90:012163. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012163. EDN ZWGFDF.
3. Kopmann J., Kock A., Killen C.P., Gemünden H.G. The role of project portfolio management in fostering both deliberate and emergent strategy. *International Journal of Project Management*. 2017; 35(4):557-570. DOI: 10.1016/j.ijproman.2017.02.011
4. Chen W., Yu M., Hou J. Synergistic Relationship, Agent Interaction, and Knowledge Coupling: Driving Innovation in Intelligent Construction Technology. *Buildings*. 2024; 14(2):542. DOI: 10.3390/buildings-14020542
5. Gumba K., Belyantseva O., Kochetova L. Justification of the Sources of Forming Competitive Advantages of Underground Construction Companies under the Production Concentration Conditions. *Procedia Engineering*. 2016; 165:1323-1327. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.858. EDN XGOJWZ.
6. Gumba K., Uvarova S., Belyaeva S., Vlasenko V. Innovations as sustainable competitive advantages in the digital economy: substantiation and forecasting. *E3S Web of Conferences*. 2021; 244:10011. DOI: 10.1051/e3sconf/202124410011. EDN OLKJIM.
7. Lekan A., Clinton A., Owolabi J. The disruptive adaptations of Construction 4.0 and Industry 4.0 as a pathway to a sustainable innovation and inclusive industrial technological development. *Buildings*. 2021; 11(3):79. DOI: 10.3390/buildings11030079
8. Walker D.H., Davis P.R., Stevenson A. Coping with uncertainty and ambiguity through team collaboration in infrastructure projects. *International Journal of Project Management*. 2017; 35(2):180-190. DOI: 10.1016/j.ijproman.2016.11.001
9. Zhang X., Le Y., Liu Y., Liu M. Fostering ambidextrous innovation in infrastructure projects: Differentiation and integration tactics of cross-functional teams. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2021; 147(6). DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002060
10. Lo J.T., Kam C. Innovation of organizations in the construction industry: Progress and performance attributes. *Journal of Management in Engineering*. 2022; 38(6). DOI: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0001093
11. Golov R., Smirnov V., Narezhnaya T., Ovsyannikova A., Zhutaeva E., Sizova E. et al. Adaptation of industrial and energy enterprises to the implementation of the concept of open innovation. *E3S Web of Conferences*.

2019; 110:02130. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002130. EDN FWLUHS.

12. Bivand R. Spatial diffusion and spatial statistics: Revisiting hägerstrand's study of innovation diffusion. *Procedia Environmental Sciences*. 2015; 27:106-111. DOI: 10.1016/j.proenv.2015.07.103

13. Bhatti S.H., Zakariya R., Vrontis D., Santoro G., Christofi M. High-performance work systems, innovation and knowledge sharing. *Employee Relations: The International Journal*. 2020; 43(2):438-458. DOI: 10.1108/ER-10-2019-0403

14. Ding X., Feng L., Huang Y., Li W. The interactive effects of communication network structure and organizational size on task performance in project-based organizations: The mediating role of bootleg innovation behavior. *Buildings*. 2024; 14(1):98. DOI: 10.3390/buildings14010098

15. Tipili L.G., Ojeba P.O., Ilyasu M.S. Evaluating the effects of communication in construction project delivery in Nigeria. *Global Journal of Environmental Science and Technology*. 2014; 2(5):48-54.

16. Shi Q., Chen X., Xiao C., Han Y. Network perspective in megaproject management : a systematic review. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022; 148(7). DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002304

17. Adner R. *Ecosystem as Structure*. *Journal of Management*. 2017; 43(1):39-58. DOI: 10.1177/0149206316678451

18. Sizova E., Zhutaeva E., Gorshkov R. Methodical bases for forming the structure of management of in-

novative activity of large building holdings. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 170:01126. DOI: 10.1051/matec-conf/201817001126

19. Wang N., Gong Z., Xu Z., Liu Z., Han Y. A quantitative investigation of the technological innovation in large construction companies. *Technology in Society*. 2021; 65:101533. DOI: 10.1016/j.techsoc.2021.101533

20. Vlasenko V.A. Formation of sustainable competitive advantages in the development of a construction company strategy based on value innovation. *Real Estate: Economics, Management*. 2023; 3:37-41. DOI: 10.22337/2073-8412-2023-3-37-41. EDN BZTQPD.

21. Sörlin S. Hägerstrand as historian: innovation, diffusion and the processual landscape. *Landscape Research*. 2020; 45(6):712-723. DOI: 10.1080/01426397.2020.1790506

22. Tyapukhin A.P. *Logistics and supply chain management: a new sight*. Deutschland, Saarbrücken, LAP Lambert Academic Publishing, 2012; 127.

23. Gumba K., Belyantseva O., Kochetova L. Justification of the sources of forming competitive advantages of underground construction companies under the production concentration conditions. *Procedia Engineering*. 2016; 165:1323-1327. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.858. EDN XGOJWZ.

24. Yaskova N., Kolosova T. The investment and construction activities transformation at the modern development stage of Russia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(6):062050. DOI: 10.1088/1757-899X/869/6/062050

Поступила в редакцию 13 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 23 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 23 сентября 2024 г.

О Б АВТОРАХ: **Инесса Галеевна Лукманова** — доктор экономических наук, профессор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655039, Scopus: 57190412717, ResearcherID: B-4128-2016, ORCID: 0000-0002-2835-8181; lukmanova@mgsu.ru;

Вячеслав Александрович Власенко — кандидат технических наук, докторант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 895092, Scopus: 57225754557, ResearcherID: GQH-6333-2022, ORCID: 0000-0003-0307-8930; slava.vasenko.80@mail.ru;

Светлана Сергеевна Уварова — доктор экономических наук, доцент, профессор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 656227, Scopus: 57192670466, ResearcherID: W-4990-2018, ORCID: 0000-0002-9385-8182; uvarova_s.s@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Received September 13, 2024.

Adopted in revised form on September 23, 2024.

Approved for publication on September 23, 2024.

BIONOTES: **Inessa G. Lukmanova** — Doctor of Economic Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Fe-

deration; ID RSCI: 655039, Scopus: 57190412717, ResearcherID: B-4128-2016, ORCID: 0000-0002-2835-8181; lukmanova@mgsu.ru;

Vyacheslav A. Vlasenko — Candidate of Technical Sciences, doctoral student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 895092, Scopus: 57225754557, ResearcherID: GQH-6333-2022, ORCID: 0000-0003-0307-8930; slava.vasenko.80@mail.ru;

Svetlana S. Uvarova — Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 656227, Scopus: 57192670466, ResearcherID: W-4990-2018, ORCID: 0000-0002-9385-8182; uvarova_s.s@mail.ru.

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

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом **IMRaD** и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (\mathbf{a} , \mathbf{b} и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников *на русском языке* оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников *на английском языке* (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия^{2...}

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы второго автора; город, страна – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

