

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 19. Выпуск 8
2024**

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

Сквозной номер 189

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 19. Issue 8
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	28.08.2024.
Подписан в свет	30.08.2024.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 21,25. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 236	

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Йозеф 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,*

Людмила Борисовна Корзухина

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Дизайн и верстка: *Алина Юрьевна Байкова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	30.08.2024

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*

Lyudmila B. Korzukhina

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.Н. Береговских
Градостроительное проектирование как интеллектуальный базис системы управления развитием территорий 1248

Е.Ю. Зайкова, С.С. Феофанова
Инженерно-технический дизайн магистральных улиц с интеграцией элементов зеленой инфраструктуры 1260

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

С.А. Соловьев, А.Э. Иньков, А.А. Соловьева, В.А. Смирнов
Анализ надежности конструкций стальных покрытий с использованием теории свидетельств 1274

Астахов И.В., Калюжный Д.В.
Оценка целесообразности учета податливости узлов металлических конструкций аутригера при расчете конструкций высотного здания 1285

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Т.А. Бахтина, Н.В. Любомирский, А.С. Бахтин, Г.Р. Биленко, И.А. Тюнюков
Разработка вяжущего вещества на основе фосфогипса, твердеющего по смешанному типу 1301

В.В. Володин, О.В. Тараканов, Т.А. Низина, В.М. Кяшкин, А.С. Балыков
Гидратация цементных вяжущих с минеральными добавками на основе глинистых и карбонатных пород . . . 1317

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

К.Л. Чертес, В.Н. Пыстин, О.В. Тупицына, И.М. Евграфова
Проблема нефтезагрязненной геосреды и пути ее решения 1328

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

В.А. Наумов, Н.Р. Ахмедова
Корреляционный анализ ежедневных уровней воды в реках Калининградской области по результатам наблюдений в 2008–2021 годах 1343

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.С. Ильиных, Е.В. Мигалатий, А.В. Корнеев
Разделение водонепятных эмульсий на поверхностно-модифицированных капиллярных ультрафильтрационных мембранах 1356

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.А. Лapidус
Метод повышения производительности труда в строительстве 1365

И.В. Каракозова, И.М. Лисицын, К.В. Болдышев
Методы проектирования рабочих операций в условиях внедрения цифровых технологий в строительстве 1373

С.Б. Сборщиков, Н.В. Лазарева
Рейтингинг бизнес-процессов в условиях применения новых организационных схем управления строительством 1390

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

Михайленко С.П.
Практика тестирования светопрозрачных фасадов на воздухо- и водонепроницаемость на опыте работы в Канаде и США и применимость этого опыта к реалиям Российской Федерации 1401

Требования к оформлению научной статьи 1413

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 8, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 8, 2024

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Anna N. Beregovskikh
Urban planning design as an intellectual basis of the territorial development management system 1248

Elena Yu. Zaykova, Sofiia S. Feofanova
Engineering and technical design of main streets with integration of green infrastructure elements 1260

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

Sergey A. Solov'ev, Aleksandr E. In'kov, Anastasiya A. Solov'eva, Vladimir A. Smirnov
Structural reliability analysis of steel structural covering based on the theory of evidence 1274

Ivan V. Astakhov, Denis V. Kalyuzhny
Estimation of expediency of taking into account the suppleness of outrigger metallic structures nodes in calculation of high-rise building structures 1285

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Tamara A. Bakhtina, Nikolay V. Lyubomirskiy, Aleksandr S. Bakhtin, Herman R. Bilenko, Ivan A. Tyunyukov
Development of binder based on phosphogypsum hardening by mixed type 1301

Vladimir V. Volodin, Oleg V. Tarakanov, Tat'yana A. Nizina, Vladimir M. Kyashkin, Artemiy S. Balykov
Hydration of cement binders with mineral additives based on clay and carbonate rocks 1317

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Konstantin L. Chertes, Vitaliy N. Pystin, Olga V. Tupitsyna, Irina M. Evgrafova
The problem of the oil-contaminated geo-environment and ways to solve it. 1328

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Vladimir A. Naumov, Natal'ya R. Ahmedova
Correlation analysis of daily water levels in rivers of the Kaliningrad region based on observation results in 2008–2021 1343

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Alexander S. Ilyinykh, Evgeny V. Migalatiy, Alexander V. Korneev
Oil-water emulsion separation on surface-modified capillary ultrafiltration membranes 1356

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Azariy A. Lapidus
A method of increasing labour productivity in construction 1365

Irina V. Karakozova, Ilya M. Lisitsyn, Konstantin V. Boldyshev
Methods of designing work operations in the conditions of digital technologies implementation in the construction industry 1373

Sergey B. Sborschikov, Natalia V. Lazareva
Reengineering of business processes in the context of application of new organizational schemes of construction management 1390

SHORT MESSAGES. DISCUSSIONS AND REVIEWS. INFORMATION

Sergei P. Mihhailenko
The practice of testing translucent facades for air and water permeability based on experience in Canada and the USA and the applicability of this experience to the realities of the Russian Federation 1401

Requirements for research paper design 1413

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

объявляет о возможности подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора по следующим темам:

«Система городских озелененных территорий общего пользования: методы изучения, планирования и прогнозирования»,

«Научно-методологические основы градостроительного планирования и проектирования

береговых территорий малых рек с учетом социально-экономических и эколого-функциональных факторов»

по научной специальности 2.1.13. «Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов» (технические науки).

Конкурсный отбор состоится на заседании Научно-технического совета

НИУ МГСУ 17.09.2024 в 14.00.

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 711

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1248-1259

Градостроительное проектирование как интеллектуальный базис системы управления развитием территорий

Анна Николаевна Береговских

Институт территориального планирования «Град» (ИТП «Град»);
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Управление градостроительной деятельностью в России за 20 лет действия Градостроительного кодекса существенно трансформировалось. С одной стороны, накоплен огромный опыт, территориальное планирование и градостроительное зонирование охватили все пространство страны, с другой — увеличивающееся число документов порождает новые конфликты, решения часто не синхронизированы и даже противоречивы. Повысить качество управленческих решений возможно за счет выстраивания целеполагания, формализации задач управления развитием территорий и системного преобразования в способах принятия управленческих решений на основе результатов градостроительного проектирования. Цель исследования — обосновать и сформулировать аргументы в пользу комплексного градостроительного проектирования как интеллектуального базиса для эффективного управления пространственными изменениями урбанизированных территорий.

Материалы и методы. Исследование проведено на основе сравнительного анализа разработанных под руководством автора комплексных градостроительных проектов в городах различных регионов России и влияния их решений на качество управления и эффективность развития территорий.

Результаты. Обоснованы преобразования видов градостроительной документации, определены их состав и содержание в целях оптимизации управленческих процессов и повышения качества принимаемых решений, обеспечивающих достижение цели комплексного социально-экономического и пространственного развития территорий за счет полноты, актуальности и юридической значимости данных об объектах градостроительного планирования и градостроительного регулирования — результатов градостроительного проектирования. Градостроительное проектирование — интеллектуальный базис для принятия научно обоснованных решений по пространственному развитию урбанизированных территорий.

Выводы. Сфера градостроительного проектирования существенно расширяется. Для обеспечения системного и эффективного управления развитием территорий предлагается пять видов градостроительной документации, результаты которых в совокупности будут представлять собой интеллектуальный базис системы управления пространственным развитием в формате цифровой информационной модели управления развитием территорий: стратегический план; комплексный инфраструктурно-инвестиционный план; генеральный план землепользования и застройки; мастер-план (стратегический, отраслевой или локальный); проект планировки и межевания территории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: градостроительное проектирование, управление развитием территорий, пространственное развитие, стратегический план, комплексный инфраструктурно-инвестиционный план, генеральный план землепользования и застройки, мастер-план, проект планировки и межевания территории, цифровая информационная модель управления развитием территорий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Береговских А.Н. Градостроительное проектирование как интеллектуальный базис системы управления развитием территорий // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1248–1259. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1248-1259

Автор, ответственный за переписку: Анна Николаевна Береговских, grad@itpgrad.ru.

Urban planning design as an intellectual basis of the territorial development management system

Anna N. Beregovskikh

Institute of territorial planning “Grad” (ITP “Grad”);
Omsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The management of urban planning in Russia has been significantly transformed over the 20 years of the Urban Planning Code. On the one hand, vast experience has been accumulated, territorial planning and urban zoning have covered the entire country, on the other hand, an increasing number of documents give rise to new conflicts, decisions are often not synchronized and even contradictory. It is possible to improve the quality of management decisions by build-

ing goal-setting, formalizing the tasks of managing the development of territories and systemic transformation in the ways of making management decisions based on the results of urban planning design. The purpose of the paper is to substantiate and formulate arguments in favour of integrated urban planning as an intellectual basis for effective management of spatial changes in urbanized territories.

Materials and methods. The study was conducted on the basis of a comparative analysis of complex urban development projects developed under the guidance of the author of the paper in cities of various regions of Russia and the impact of their decisions on the quality of management and the effectiveness of territorial development.

Results. The transformations of types of town-planning documentation were substantiated, their composition and content were determined in order to optimize management processes and improve the quality of decisions that ensure the achievement of the goal of integrated socio-economic and spatial development of territories due to the completeness, relevance and legal significance of data on the objects of town-planning planning and town-planning regulation — the results of town-planning design. Urban planning is an intellectual basis for making scientifically sound decisions on the spatial development of urbanized territories.

Conclusions. The field of urban planning is expanding significantly. To ensure systematic and effective management of the development of territories, five types of urban planning documentation are proposed, the results of which together will constitute the intellectual basis of the spatial development management system in the format of a digital information model for managing the development of territories: strategic plan; comprehensive infrastructure and investment plan; master plan for land use and development; master plan (strategic, sectoral or local); the project of planning and surveying the territory.

KEYWORDS: urban planning, territorial development management, spatial development, strategic plan, integrated infrastructure and investment plan, master plan for land use and development, master plan, draft planning and surveying of the territory, digital information model of territorial development management

FOR CITATION: Beregovskikh A.N. Urban planning design as an intellectual basis of the territorial development management system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1248-1259. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1248-1259 (rus.).

Corresponding author: Anna N. Beregovskikh, grad@itpgrad.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Управление развитием территорий — это деятельность уполномоченных органов государственной и муниципальной власти, направленная на сбалансированное инфраструктурное и инвестиционное совершенствование территорий, обеспечивающее последовательное улучшение качества среды жизнедеятельности посредством решения следующих задач:

- стратегического социально-экономического и пространственного планирования развития территорий;
- комплексного планирования развития всех видов инфраструктуры жизнеобеспечения;
- создания системы правового регулирования инвестиционной деятельности на основе полных, актуальных и юридически значимых данных;
- предоставления услуг в сфере градостроительной деятельности и исполнения управленческих функций в цифровом виде;
- мониторинга градостроительных изменений и своевременной перенастройке действующих инструментов и механизмов.

На первый профессиональный взгляд очевидно, что решение названных задач управления развитием территорий лежит в плоскости градостроительного проектирования. Однако в практике современного российского управления градостроительное проектирование далеко не всегда предвещает решение по развитию территорий. Главными движущими силами пространственных преобразований являются ведомственные бюджетные (государственные, муниципальные) программы или инвестиционные проекты. Стратегическое планирование, как правило,

обособлено от задач пространственного развития. Традиционно муниципальные стратегии социально-экономического развития представляют собой общественно-политическую декларацию местной администрации по улучшению своей деятельности в рамках муниципальных полномочий¹.

Законодатель не обязывает органы государственной или муниципальной власти руководствоваться профессионально разработанным градостроительным проектом при утверждении, например, таких важнейших государственных и муниципальных программ, как «Жилье и городская среда», «Образование», «Здравоохранение», «Культура», «Туризм», «Чистый город», направленных на реализацию национальных проектов и достижение целевых показателей комплексного социально-экономического развития и обновления городов. Ни одна из таких программ не может быть реализована без пространственных преобразований. Инвестор, правообладатель земельных участков также имеет право инициировать градостроительные изменения,

¹ См., напр.: Решение Орловского окружного Совета народных депутатов от 22.06.2023 № 235-МПА «Об утверждении стратегии социально-экономического развития Орловского муниципального округа Орловской области на 2023–2027 годы»; Постановление администрации муниципального образования Гусь-Хрустальный район Владимирской области от 02.11.2023 № 1277 «О Стратегии социально-экономического развития муниципального образования Гусь-Хрустальный район»; Решение Совета народных депутатов Камешковского района от 28.06.2021 № 106 «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития муниципального образования Камешковский район на 2021–2030 годы».

и нередко внесение изменений в градостроительную документацию осуществляется на основании судебных решений, принятых по искам правообладателей недвижимости, без обосновывающих градостроительных проектов².

Почему так происходит? Стратегическое планирование муниципального уровня находится за рамками градостроительной деятельности. Возможность принятия стратегии у муниципалитетов есть в соответствии с федеральными законами о стратегическом планировании³ и общих принципов организации местного самоуправления⁴, но обязанности нет. Требования к содержанию стратегий не предусмотрены. Градостроительное проектирование не рассматривается законодателем как вид градостроительной деятельности. Градостроительный кодекс РФ (ГрК РФ) определяет обязательность архитектурно-строительного проектирования (п. 1 ст. 1), а территориальное планирование, градостроительное зонирование или планировка территорий осуществляются посредством подготовки генерального плана, правил землепользования и застройки, проектов планировки и межевания территорий, утверждаемых нормативными правовыми актами, имеющими в итоге статус нормативных правовых актов. Тщательно контролируются и соблюдаются юридические процедуры организации подготовки и прохождения согласований проектов нормативных правовых актов на соответствие законодательству их состава и содержания, утвержденным административным регламентам; решениям, принятым вышестоящими органами. Но качество градостроительного решения не проверяется никем. Требования к профессионализму исполнителя государственного или муниципального контракта, осуществляющего подготовку документа территориального планирования или градостроительного зонирования, документации по планировке территорий, нет, профессиональной государственной экспертизы тоже нет.

Действующая модель управления градостроительными преобразованиями территорий не предусматривает стратегического пространственного планирования на муниципальном уровне. Законодательное нововведение о едином документе территориального планирования и градостроительного зонирования конфликтует с ранее принятыми поправками к ГрК РФ о возможности исключения

из состава генерального плана карты планируемого размещения объектов местного значения⁵. В последний раз комплексные методические рекомендации (инструкция) к разработке градостроительной документации были утверждены в 2002 г. и не подлежат применению согласно приказу Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 июня 2018 г. № 354/пр «О признании не подлежащим применению постановления Государственного комитета Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу от 29 октября 2002 г. № 150 “Об утверждении Инструкции о порядке разработки, согласования, экспертизы и утверждения градостроительной документации”» (зарегистрирован в Минюсте РФ 12.07.2018 № 51595).

Принятые ведомственные государственные и муниципальные бюджетные программы, инвестиционные проекты являются документами — основаниями для внесения изменений в документы территориального планирования и градостроительного зонирования. При этом доказательство правильности принятых программами решений не требуется. Для получения разрешения на строительство объекта правообладателю земельного участка, как правило, документация по планировке территории также не требуется (ГрК РФ, ч. 3 ст. 41⁵).

Закрепленный на законодательном уровне приоритет бюджетного и инвестиционного планирования по отношению к планированию территориальному, осуществляемому посредством градостроительного проектирования, несет в себе значительные риски неэффективного расходования бюджетных средств и часто наносит прямой ущерб качеству городской среды. Повысить качество управленческих решений возможно за счет выстраивания целеполагания и формализации задач управления развитием территорий и соответствующего задачам системного преобразования в способах принятия управленческих решений на основе результатов градостроительного проектирования.

Цель исследования — обосновать и сформулировать аргументы в пользу комплексного градостроительного проектирования как интеллектуального базиса для эффективного управления пространственными изменениями урбанизированных территорий, предложить оптимальную структуру градостроительной документации и ее содержание, формализующее результаты как совокупность данных об объектах градостроительного планирования и градостроительного регулирования, необходимых для управления сбалансированным и эффективным развитием территорий множеством участников.

² См., напр.: Апелляционное определение Судебной коллегии Верховного суда Российской Федерации от 13.10.2016 № 50-АПГ16-13; Решение Приморского краевого суда от 17.05.2017 № 3А-105/2017.

³ О стратегическом планировании в Российской Федерации : Федеральный закон от 28.06.2014 № 172-ФЗ.

⁴ Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации : Федеральный закон от 06.10.2003 № 131-ФЗ.

⁵ Градостроительный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 25.12.2023), п. 1 ч. 9 ст. 23.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование базируется на изучении действующей модели управления развитием территорий и анализе влияния результатов градостроительного проектирования на принятие управленческих решений. В основу исследования положена методология комплексного подхода. Аналитическая часть исследования проведена посредством применения общелогических, теоретических и эмпирических методов. При аргументации собственной позиции по обозначенной в статье проблеме использовались положения основных нормативно-правовых актов, действующих в сфере управления развитием территории; научные взгляды и экспертные оценки; а также результаты научно-исследовательских работ и их экспериментальной апробации в комплексных градостроительных проектах, разработанных Институтом территориального планирования «Град» под руководством автора статьи в различных городах регионов России (Тюмень, Мегион, Омск, Нижневартовск, Тобольск, Уссурийск, Южно-Сахалинская агломерация и др.), и влияние их решений на качество управления и эффективность развития территорий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Градостроительное проектирование — это интеллектуальный базис для принятия обоснованного решения по пространственному развитию урбанизированных территорий, в том числе архитектурно-художественных, социальных и экономических изменений в сложном современном мире. Этот вывод подтверждается множеством научных профессиональных взглядов [1–13] и неоднократно публикуемыми результатами исследований автора статьи [14–17].

В основе комплексного градостроительного проектирования лежит системный подход. Градостроительные решения, с одной стороны, носят иерархический характер, с другой — обладают полифункциональными характеристиками и зависят от множества межведомственных и земельно-имущественных отношений. Современный градостроительный проект — результат научного исследования, оформленный в виде текста, описывающего основные проектные решения, плюс мультимасштабная и бесшовная цифровая информационная модель пространственных данных в пределах региона, агломерации, города или другой проектируемой территории. Локальный градостроительный проект — это всегда часть целого, он должен быть вложен, встроен в более масштабный проект. Концептуальный, инфраструктурный, отраслевой или локальный проект всегда должен быть соподчинен стратегическому проекту. Связность и соподчиненность градостроительных проектов обеспечиваются за счет применения единой системы

требований к цифровому описанию объектов градостроительного планирования, объектов градостроительного регулирования и объектов, формирующих информационную основу.

Градостроительное проектирование направлено на принятие взаимосвязанных комплексов стратегических, тактических и регулирующих решений. Логика последовательного принятия решений, основанных на результатах градостроительного проектирования, следующая.

Стратегические решения принимаются на базе научных исследований, включающих изучение исторических, политических, экологических и экономических предпосылок; оценку существующего состояния и использования территорий с учетом градостроительных ограничений; утвержденных и реализуемых проектов; выявленных ценностей и приоритетов для живущих и будущих поколений; инвестиционных потенциалов и бюджетных возможностей, направленных на позитивное преобразование городской среды, повышение качества жизни людей.

На стратегическом уровне, основываясь на выявленных ценностях посредством вовлечения жителей, демографическом и инвестиционном прогнозах, комплексной оценке потенциалов и рисков, проектируется согласованный с региональной стратегией социально-экономического развития стратегический план развития муниципального образования: формулируются цели и задачи социально-экономического и пространственного развития; определяются приоритетные направления; устанавливаются целевые показатели по каждому направлению в горизонтах планирования, принятых национальными проектами (2030, 2035, 2040 и т.д.); устанавливаются стандарты жизнеобеспечения, в том числе предельные показатели обеспеченности и доступности социально значимых услуг населению (образование, здравоохранение, культура, спорт, транспорт, энергетика, тепло, вода, связь и т.д.); формируются пространственные каркасы: транспортно-планировочный, природно-экологический, социокультурный, экономический; выстраивается планировочная структура и планировочная организация территории: формируется схема укрупненного функционального зонирования (селитебные, промышленные, рекреационные и некоторые другие зоны, характеризующиеся взаимодополняемыми функциями); формулируются политики градостроительных преобразований, определяющие не функцию, а отношение города к территории (стабильности, трансформации, регенерации и т.д.) в структуре планировочной организации территории, разработанной на основе пространственных каркасов; разрабатывается дорожная карта реализации стратегического плана, включающая перечень и сроки исполнения мероприятий, а также перечень стратегически значимых проектов и их характеристик.

Стратегический план является основой как для инфраструктурного планирования в рамках бюджетных обязательств, так и для инвестиционного освоения или преобразования территорий, в том числе жилищного строительства. Широкое вовлечение жителей и предпринимательских сообществ в разработку стратегического плана, применение методов партисипаторного проектирования не только придадут стратегическому плану статус политической декларации, но и превратят его в настоящий общественный договор, принятый властью, жителями и бизнесом, о котором уже многие годы говорят выдающиеся российские и зарубежные ученые-градостроители [18–21].

С целью обеспечения взаимно согласованной деятельности между инфраструктурными направлениями (транспортная, социальная, коммунальная, энергетическая, промышленная, туристическая, рекреационная инфраструктуры) и ее синхронизации с бюджетным планированием на разных уровнях государственного и муниципального управления может быть запроектирован комплексный инфраструктурно-инвестиционный план (КИИП). КИИП включает все необходимые мероприятия по развитию инфраструктуры регионального и муниципального уровня в соответствии с целевыми показателями социально-экономического и пространственного развития территорий города и предельными показателями обеспеченности и доступности социально значимых услуг населению, намеченных стратегическим планом, а также все инвестиционные проекты, вошедшие в решения региональной стратегии социально-экономического развития и плана реализации муниципального стратегического плана или на реализацию которых выдана разрешительная документация. При отсутствии решения по разработке единого КИИП потребуется еще более сложное градостроительное проектирование множества документов территориального планирования, схем и программ развития социальной, транспортной и коммунальной инфраструктуры, документации по планировке территорий, предназначенных для размещения инфраструктурных объектов федерального, регионального, местного и иного значения.

Для согласованности государственной политики и частных инициатив необходима система координат, которая создается за счет единого цифрового информационно-аналитического пространства, включающего не только актуальные юридически значимые данные о современном состоянии и использовании территории (сведения, формирующие информационную основу), но и полный набор пространственных данных об объектах градостроительного регулирования: элементы планировочной структуры — населенный пункт, планировочный район, планировочный микрорайон, планировочный квартал; красные линии (существующие и перспективные), уточняющие границы элементов планировочной структуры

(планировочных микрорайонов и планировочных кварталов) с точностью ведения единого государственного реестра недвижимости (ЕГРН); территориальные зоны и градостроительные регламенты, включающие виды и параметры разрешенного использования земельных участков с учетом особенностей их расположения в территориальной зоне, требования к архитектурно-градостроительному облику (все без исключения территории делятся на территориальные зоны, в том числе территории общего пользования); зоны с особыми условиями использования территорий (установленные, нормативные и планируемые); границы территорий с особым правовым режимом использования (комплексное развитие территорий, особые экономические зоны и т.д.), которые должны составлять один или несколько элементов планировочной структуры. Совокупность перечисленных объектов градостроительного регулирования может быть запроектирована при разработке генерального плана землепользования и застройки (ГПЗЗ). Сведения об объектах градостроительного регулирования обеспечат автоматизацию предоставления основной услуги в сфере градостроительства — выдаче градостроительного плана земельного участка (ГПЗУ), проинформируют любое заинтересованное лицо о возможностях и рисках преобразования территорий.

Инвестиционная деятельность развивается на основе мастер-планирования и планировки территорий в соответствии с установленными территориальными зонами, видами их разрешенного использования и градостроительными регламентами. Для обоснования своей идеи заинтересованное лицо обеспечивает градостроительное проектирование мастер-плана и документации по планировке территорий (мастер-план может быть разработан в виде самостоятельного документа или в составе обосновывающих материалов документации по планировке), результатом которых являются: социально-экономическая и архитектурно-градостроительная модель будущего преобразования территории; устанавливаемые или изменяемые красные линии; зоны планируемого размещения объектов капитального строительства; образуемые или изменяемые границы земельных участков; уточненные виды и параметры будущего использования земельных участков.

Описанные выше методологические подходы в большей или меньшей степени применены Институтом территориального планирования «Град» в градостроительном проектировании под руководством автора статьи в разных городах России в течение действия ГрК РФ.

Комплексный проект градостроительного развития Тюмени (800 тыс. жителей) доказал, что одновременная разработка концепции пространственного развития, генерального плана, проектов планировки и межевания всей территории города

и правил землепользования и застройки на основе архитектурно-планировочного решения показала высокую управленческую эффективность. В Тюмени скоординировано инвестиционное и инфраструктурное развитие. Единый план красных линий и установленные специальные территориальные зоны для каждого социально значимого объекта составляют прочную основу правового регулирования градостроительных и земельно-имущественных отношений. Создание базы градостроительных данных по единой системе требований в 2008 г. обеспечило возможность мониторинга изменений и быстрой перенастройки принятых тактических решений в зависимости от меняющихся политических и экономических условий, инвестиционной активности стейкхолдеров.

Комплексный проект развития Мегиона (50 тыс. жителей) включил максимальное количество решений, необходимых для управления городскими территориями, и показал свою эффективность. В составе проекта: стратегия социально-экономического развития, местные нормативы градостроительного проектирования, генеральный план, проекты планировки и межевания всех городских территорий, правила землепользования и застройки (ПЗЗ), концепция инвестиционного развития, автоматизированная система

управления развитием территории, включающая геоинформационный портал. Содержание комплексного проекта развития малого города целесообразно расширять на основе стратегических приоритетов и задач социально-экономического и пространственного развития, текущих проблем городского развития (жилье, образование, озеленение и благоустройство, малый бизнес), активное вовлечение в разработку проекта жителей всех поколений многократно повышает как качество проектных решений, так и их реализуемость в управленческих процессах.

Градостроительный проект развития Омска (1 млн 150 тыс. жителей), включающий концепцию пространственного развития, генеральный план и ПЗЗ, но не содержащий документацию по планировке территорий, с одной стороны, представляет собой целостную систему градостроительных решений, с другой — не обеспечивает их реализацию, так как множество утвержденных проектов планировки и межевания, несоответствующих новым генеральному плану и ПЗЗ, не отменено, в них не внесены изменения. Инфраструктурные программы также не откорректированы. Полумера принесла больше вреда, чем пользы — тормозятся частные инициативы (бизнес-идея противоречит либо ПЗЗ, либо проекту планировки и отклоняется уполномочен-

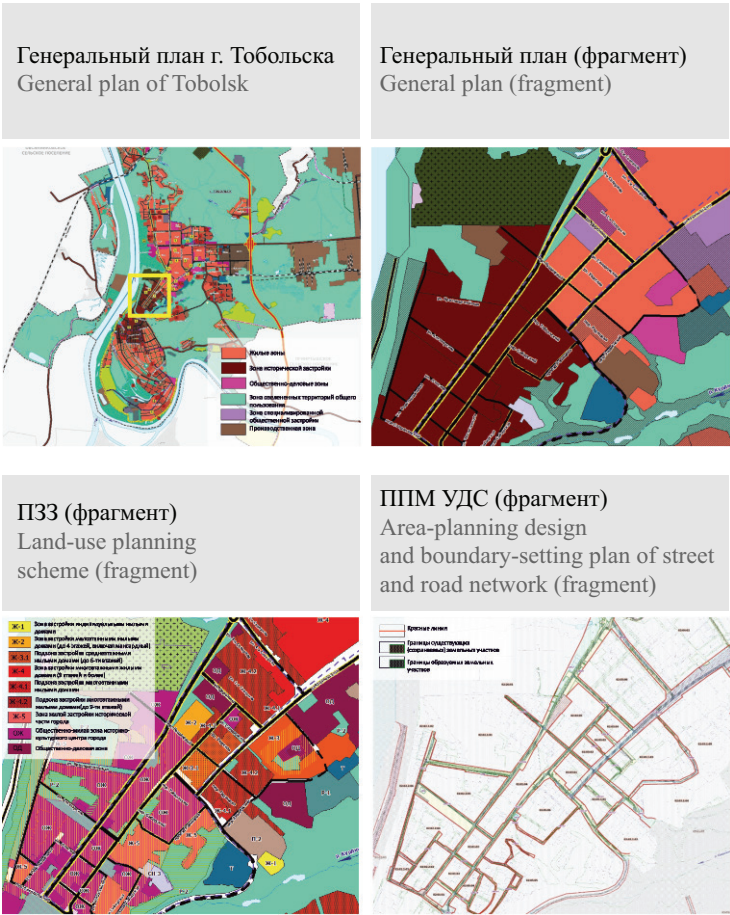


Рис. 1. Комплексный проект градостроительного развития г. Тобольска

Fig. 1. Comprehensive urban development project of Tobolsk

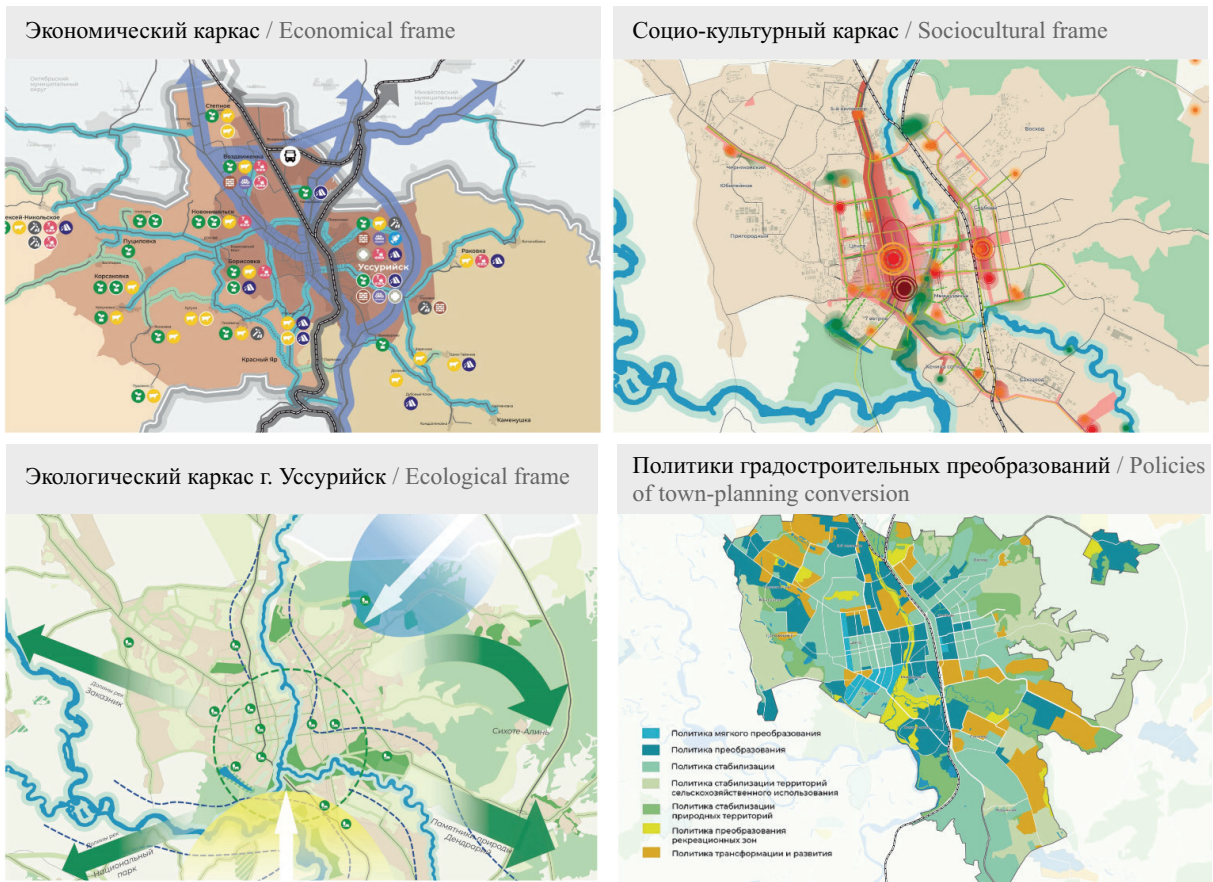


Рис. 2. Стратегический план развития г. Уссурийска
Fig. 2. Strategic development plan for the city of Ussuriysk

ным органом), бессистемная реализация отдельных инфраструктурных объектов часто дает отрицательный управленческий эффект.

Анализ реализации проекта развития Тобольска (100 тыс. жителей) подтвердил мнение автора о минимально возможном составе комплексного проекта: концепция; генеральный план; проект планировки и межевания территории улично-дорожной сети (УДС); правила землепользования и застройки (рис. 1). Основным результатом проекта планировки и межевания территории УДС является единый план красных линий как каркас градостроительных и земельно-имущественных правоотношений. Все остальные локальные проекты обязаны встроиться в общую для города систему координат, созданную единым планом красных линий, который в совокупности с картой градостроительного зонирования, установившей виды, границы и градостроительный регламент использования территориальных зон, обеспечивает правовое регулирование градостроительных и земельно-имущественных отношений.

В составе комплексного проекта развития Уссурийска (300 тыс. жителей) на основе мастер-плана разработана и утверждена стратегия социально-экономического развития, включающая основные пространственные каркасы (транспортно-планировочный, социокультурный, природно-экологический,

экономический) и карту политик градостроительного преобразования, служащую базой для всех принимаемых управленческих юридически значимых решений по планированию инфраструктурных объектов и регулированию правоотношений (рис. 2).

Весь проект развития Нижневартовска (300 тыс. жителей) строился как создание информационной базы для управления развитием территорий, включающий алгоритмы и механизмы решения наиболее актуальных управленческих задач. Именно нижневартовский проект заложил фундаментальную основу для оформления комплексного знания, выработки целесообразной структуры градостроительной документации и методологии градостроительного проектирования. Результатом проекта стала цифровая информационная модель управления развитием территории (ЦИМ УРТ), представляющая собой комплекс взаимосвязанных, актуализируемых в установленные сроки информационных ресурсов, включающих цифровые данные о существующем состоянии и планируемом развитии территории, автоматизированных методов и функций, обеспечивающих моделирование сценариев развития территории и поддержку принятия решений.

Проект развития Южно-Сахалинской агломерации (500 тыс. жителей), подтвердив целесообразность одновременного проектирования всех не-

обходимых для управления развитием территорий документов, показал преимущества комплексного инфраструктурного плана регионального развития перед отдельными картами планируемого размещения объектов местного значения и отдельными для каждого города программами развития транспортной, социальной и коммунальной инфраструктур, при том что в каждом регионе реализация инфраструктурных объектов независимо от их государственного или местного значения, как правило, осуществляется на основании региональной адресной инвестиционной программы с преобладающим объемом государственного финансирования (рис. 3).

Обобщение опыта реализации комплексных градостроительных проектов позволило сформулировать ключевые принципы управления развитием территорий, которые в свою очередь, легли в основу выстраивания логики градостроительного проектирования и подготовки предложений по оптимизации

видов и содержания градостроительной документации. Принципы управления развитием территорий:

- единство стратегического социально-экономического и пространственного планирования;
- придание юридического статуса данным об объектах градостроительного планирования и регулирования только на основе комплексного градостроительного проектирования, включающего научные исследования;
- гибкое и эффективное управление развитием территорий может быть обеспечено только за счет перехода от управления на основе разрозненных и противоречащих друг другу документов к управлению на базе структурированных, полных и юридически значимых данных об объектах градостроительного планирования и регулирования, работающих на благо развития городов за счет создания ЦИМ УРТ.

Анализ практик комплексного градостроительного проектирования и достигнутых управ-

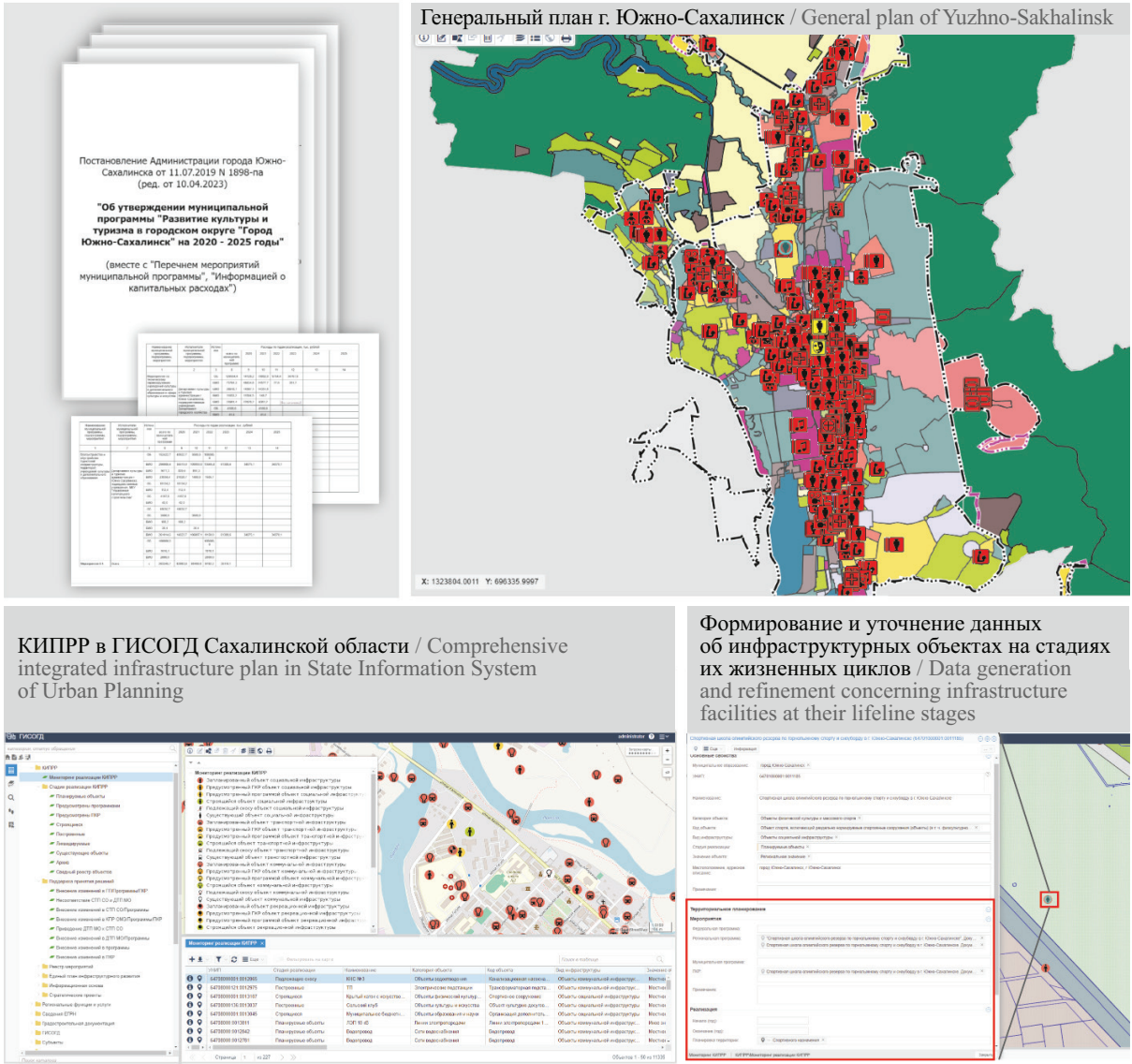


Рис. 3. Комплексный инфраструктурно-инвестиционный план Южно-Сахалинской агломерации
Fig. 3. Integrated infrastructure and investment plan of the Yuzhno-Sakhalinsk agglomeration

ленческих эффектов с использованием результатов проектирования в разных российских городах и сформулированных на основе анализа принципов позволил сделать вывод о необходимости и своевременности перехода от разрозненных градостроительных документов к цифровой информационной модели управления развитием территорий, интегрированной с цифровой информационной основой ЕГРН через платформу государственной информационной системы обеспечения градостроительной деятельности (ГИСОГД), база данных которой формируется на основе результатов градостроительного проектирования, представляющих собой комплекс взаимосвязанных объектов градостроительного планирования (стратегического и тактического) и градостроительного регулирования, данные о которых обновляются на каждом этапе жизненного цикла каждого из этих объектов.

Цифровая информационная модель управления развитием территории — комплекс взаимосвязанных, актуализируемых в установленные сроки информационных ресурсов, включающих цифровые данные о существующем состоянии и планируемом развитии территории (информационная основа), сведения об объектах градостроительного планирования и объектах градостроительного регулирования, автоматизированных методов и функций, обе-

спечивающих моделирование сценариев развития территории и поддержку принятия решений (рис. 4).

Объект стратегического планирования не наделяется юридическим статусом и понимается как пространственный объект, характеризующий общественно-политическую декларацию целей и задач пространственного развития, определенных стратегическим планом. Объект тактического планирования — это юридически значимый пространственный объект, предполагающий образование объекта недвижимости. Объект градостроительного регулирования — объект, определяющий режим (возможности и ограничения) градостроительной деятельности, безусловно, обладающий юридическим статусом.

Для формирования базы данных ЦИМ УРТ необходимо утверждение системы требований к пространственным данным — совокупности норм и правил цифрового описания пространственных данных градостроительной деятельности, обеспечивающих единство цифрового описания пространственных сведений об объектах градостроительного планирования и объектах градостроительного регулирования, их интероперабельность при использовании в информационных системах градостроительной деятельности и других государственных системах в рамках создания Национальной системы пространственных данных Российской Федерации.

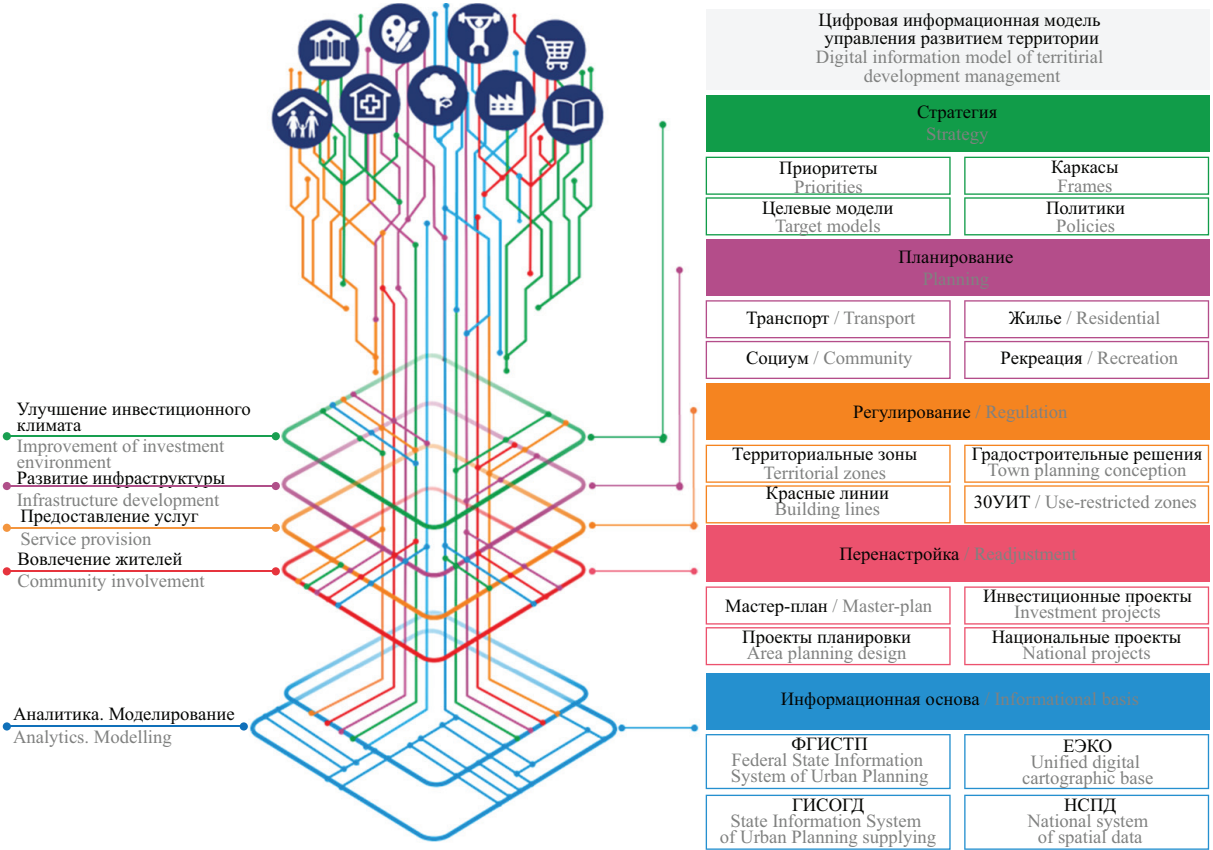


Рис. 4. Структурная схема цифровой информационной модели управления развитием территории

Fig. 4. Block diagram of a digital information model for managing the development of a territory

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из перечисленных комплексов градостроительных решений, необходимых для обеспечения системного управления развитием территорий, следует заключить, что для оптимизации управления и обеспечения эффективности развития территорий достаточно пяти видов градостроительных проектов, результаты которых в совокупности будут представлять собой интеллектуальный базис системы управления развитием территорий в формате цифровой информационной модели управления развитием территорий:

- стратегический план;
- комплексный инфраструктурно-инвестиционный план;
- генеральный план землепользования и застройки;
- мастер-план (стратегический, отраслевой или локальный);
- проект планировки и межевания территории.

КИИП и ГПЗЗ в предлагаемой конструкции выступают инструментами реализации стратегического плана. КИИП заменит документы территориального планирования в части размещения объектов регионального и местного значения, обеспечит сбалансированное инфраструктурное обустройство территорий муниципальных образований. ГПЗЗ

объединит в себе все объекты градостроительного регулирования и не только обеспечит предоставление услуг в сфере градостроительства, но и сообщит всем правообладателям земельных участков и потенциальным инвесторам обо всех допустимых преобразованиях с учетом возможных рисков.

Мастер-планы и проекты планировки и межевания территорий станут играть роль инструментов перенастройки, уточняющих и детализирующих решения, принятые на стратегическом уровне.

Цифровая информационная модель управления развитием территории создается и перенастраивается посредством профессионального градостроительного проектирования и является поставщиком решений для принятия бюджетных и инвестиционных программ, направленных на достижение целевых показателей комплексного социально-экономического развития и качественное обновление городской среды.

Предлагаемая система принятия градостроительных решений требует высокого профессионального уровня градостроительного проектирования, который невозможно обеспечить без пересмотра отношения государства к институционализации градостроительной деятельности, интеллектуальный базис которой составляет институт градостроительного проектирования, развитие которого может обеспечить только новый уровень градостроительного образования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Reimer M., Getimis P., Blotevogel H. Spatial planning systems and practices in Europe: a comparative perspective on continuity and changes. London : Routledge, 2014. 336 p.
2. Mäntysalo R., Kangasojä J.K., Kanninen V. The paradox of strategic spatial planning: a theoretical outline with a view on Finland // Planning Theory & Practice. 2015. Vol. 16. Issue 2. Pp. 169–183. DOI: 10.1080/14649357.2015.1016548
3. Hoidn B., Wang W. 21BB model region. Berlin Brandenburg. Zurich, 2020. 176 p.
4. Амин Э., Трифт Н. Города: переосмысляя городское / пер. с англ. М. : Красная ласточка, 2017. 218 с.
5. Лефевр А. Производство пространства / пер. с фр. Ирина Стаф. М. : Strelka Press, 2015. 405 с.
6. Рамти К., Клодел М. Город завтрашнего дня. Сенсоры, сети, хакары и будущее городской жизни / пер. с англ. Е. Бондал. М. : Издательство института Гайдара, 2017. 248 с.
7. Рыбчинский В. Городской конструктор. Идеи и города / пер. с англ. М. : Коробочкин. М. : Strelka Press, 2014. 250 с.
8. Леви Дж.М. Современное городское планирование. М. : Strelka Press, 2020. 389 с.
9. Миколайт А., Пюркхауэр М. Код города. 100

наблюдений, которые помогут понять город / пер. с англ. А. Тарасенко. М., 2020. 152 с.

10. Вильнер М.Я. О проблемах действующей системы регулирования градостроительной деятельности в России // Управление развитием территории. 2019.

11. Вильнер М.Я. Методологические основы реформирования управления развитием территории : монография. М., 2018. 115 с.

12. Береговских А.Н. Стуканева И.Г., Старченкова Н.С., Макарова О.С. и др. Генеральный план Омска. Омск, 2021. 280 с.

13. Колонтай А.Н. Если не генплан, то что? // Проект Россия. 2021.

14. Береговских А.Н. Государственное и муниципальное управление развитием территорий: градостроительство и пространственные данные // Градостроительство. 2022. № 3–4 (79–80). С. 10–15. EDN UDVLQT.

15. Береговских А.Н. КИПРР — это генплан, работающий каждый день // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году : сб. науч. тр. 2022. С. 177–187.

16. Береговских А.Н. Развитие регионов и городов. Стратегия – тактика – регулирование – перенастройка // Градостроительство. 2022. № 1–2 (77–78). С. 32–38. EDN XCJTIT.

17. Береговских А.Н. Совершенствование системы планирования развития территорий. Цели и принципы // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году : сб. науч. тр. РААСН. 2020. С. 144–150. EDN LNEYR.

18. Анализ новейшего международного методического опыта планирования реконструкции городов (к методике разработки генерального плана

г. Новоуральска) : сб. мат. / под ред. В.Л. Глазычева // Сайт памяти В.Л. Глазычева.

19. Глазычев В.Л., Егоров М.М., Ильина Т.В. и др. Городская среда. Технология развития: Настольная книга / под ред. В.Л. Глазычева. М. : Лада, 1995. 240 с.

20. Городские исследования и практики. Т. 6. № 3. Соучаствующее проектирование: опыт и перспективы вовлечения горожан в проекты пространственного развития II / гл. ред. В.В. Анашвили. М. : Высшая школа экономики, 2021. 100 с.

21. Санофф Г. Соучаствующее проектирование. Практики общественного участия в формировании среды больших и малых городов / пер. с англ. А. Коннова. Вологда : Проектная группа 8, 2015. 169 с.

Поступила в редакцию 27 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 4 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 19 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: Анна Николаевна Береговских — руководитель; Институт территориального планирования «Град» (ИТП «Град»); советник Российской академии архитектуры и строительных наук; 644024, г. Омск, ул. Щербанева, д. 35; grad@itpgrad.ru.

REFERENCES

1. Reimer M., Getimis P., Blotevogel H. *Spatial planning systems and practices in Europe: A comparative perspective on continuity and changes*. London, Routledge, 2014; 336.

2. Mäntysalo R., Kangasoja J.K., Kanninen V. The paradox of strategic spatial planning: a theoretical outline with a view on Finland. *Planning Theory & Practice*. 2015; 16(2):169-183. DOI: 10.1080/14649357.2015.1016548

3. Hoidn B., Wang W. *21BB Model Region. Berlin Brandenburg*. Zurich, 2020; 176.

4. Amin E., Trift N. *Cities: rethinking urban*. Moscow, Krasnaya lastochka Publ., 2017; 218. (rus.).

5. Lefebvre A. *The production of space*. Moscow, Strelka Press, 2015; 405. (rus.).

6. Ratti K., Claudel M. *The City of Tomorrow. Sensors, networks, hackers and the future of urban life*. Moscow, Izdatel'stvo instituta Gaydara, 2017; 248. (rus.).

7. Rybchinsky V. *City designer. Ideas and cities*. Moscow, Strelka Press, 2014; 250. (rus.).

8. Levy J.M. *Modern urban planning*. Moscow, Strelka Press, 2020; 389. (rus.).

9. Mikolait A., Purkhauer M. *The area code. 100 observations that will help you understand the city*. Moscow, 2020; 152. (rus.).

10. Vilner M.Ya. On the problems of the current system of regulation of urban planning activities in Russia. *Management of Territory Development*. 2019. (rus.).

11. Vilner M.Ya. *Methodological foundations of the reform of territorial development management: monograph*. Moscow, 2018; 115. (rus.).

12. Beregovskikh A.N., Stukaneva I.G., Starchenkova N.S., Makarova O.S. et al. *General plan of Omsk*. Omsk, 2021; 280. (rus.).

13. Kolontai A.N. If not a master plan, then what? *Project Russia*. 2021. (rus.).

14. Beregovskikh A.N. State and municipal management of territorial development: urban planning and spatial data. *Urban Planning*. 2022; 3-4(79-80):10-15. EDN UDVLQT. (rus.).

15. Beregovskikh A.N. CIPRR is a master plan that works every day. *Fundamental, search and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021*. 2022; 177-187. (rus.).

16. Beregovskikh A.N. Development of regions and cities. Strategy – tactics – regulation – reconfiguration. *Urban Planning*. 2022; 1-2(77-78):32-38. EDN XCJTIT. (rus.).

17. Beregovskikh A.N. Improving the planning system for territory development. Goals and principles. *Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction in-*

dustury of the Russian Federation in 2019. 2020; 144-150. EDN LNEYR. (rus.).

18. Analysis of the latest international methodological experience in planning urban reconstruction (towards the methodology for developing a master plan for the city of Novouralsk) : collection of proceedings. V.L. Glazychev (ed.). *Site in memory of V.L. Glazychev*. (rus.).

19. Glazychev V.L., Egorov M.M., Ilyina T.V. et al. Urban environment. *Development technology* :

handbook. Moscow, Ladya Publ., 1995; 240. (rus.).

20. *Urban research and practice. Vol. 6, 3: Participatory design: experience and prospects for involving citizens in spatial development projects II* / Ed.V. V. Anashvili. Moscow, Higher School of Economics, 2021; 100. (rus.).

21. Sanoff G. Participatory design. *Practices of public participation in shaping the environment of large and small cities*. Vologda, Project group 8, 2015; 169. (rus.).

Received February 27, 2023.

Adopted in revised form on March 4, 2023.

Approved for publication on April 19, 2024.

B I O N O T E S: **Anna N. Beregovskikh** — Head, advisor to the Russian Academy of architecture and construction sciences; **Institute of territorial planning “Grad” (ITP “Grad”)**; 35 T.K. Shcherbaneva st., Omsk, 644024, Russian Federation; grad@itpgrad.ru.

Инженерно-технический дизайн магистральных улиц с интеграцией элементов зеленой инфраструктуры

Елена Юрьевна Зайкова, София Сергеевна Феофанова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Климатические характеристики имеют ключевое значение в современной градостроительной практике. Увеличение количества атмосферных осадков «бросает вызов» устаревшим нормативным документам. Для повышения адаптационных возможностей городов к потеплению климата в 80-х гг. XX в. западными специалистами было предложено использовать зеленую инфраструктуру (ЗИФ). В нормативных документах РФ понятия, которое включало бы в себя применение науки и математики для решения проблемы подтопления городских пространств, еще не существует. Авторы предлагают свое видение решения обозначенной проблемы.

Материалы и методы. Дано авторское определение «инженерно-технического дизайна», указана разница между существующими видами действия в городской среде в этом вопросе, и выделены основные этапы внедрения данного определения в научную и практическую деятельность. Установлено, что часто подтапливаемые ливневыми водами городские территории в Москве — это магистральные улицы 2-го класса регулируемого движения в ЗАО. Проведен градостроительный анализ территории исследования с учетом климатических характеристик, обозначена роль ЗИФ и биоинженерных сооружений.

Результаты. Авторский расчет средней скорости потока ливневой воды в биоинженерном сооружении необходим для выбора размеров элементов ЗИФ, которые планируется разместить на территории. Скорость течения ливневой воды по непроницаемой поверхности почти в три раза выше, чем с сопротивлением почвы и растительности, в зависимости от уклона территории.

Выводы. Предложен вариант внедрения инженерно-технического дизайна на магистральной улице в Москве — Мичуринском проспекте, включающий дизайн-идею пространства с использованием структуры рукотворных биотопов. Ливневая вода аккумулируется и перераспределяется через биоинженерные сооружения, подпитывая растительность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инженерно-технический дизайн, зеленая инфраструктура, биоинженерные сооружения, рукотворный биотоп, скорость потока ливневой воды, дух места, дизайн-код

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С. Инженерно-технический дизайн магистральных улиц с интеграцией элементов зеленой инфраструктуры // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1260–1273. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1260-1273

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

Engineering and technical design of main streets with integration of green infrastructure elements

Elena Yu. Zaykova, Sofia S. Feofanova

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

ABSTRACT

Introduction. Climatic characteristics are of key importance in modern urban planning practice. The increase in precipitation 'challenges' outdated normative documents. In order to increase the adaptive capacity of cities to climate warming in the 80s of the XX century, Western specialists proposed the use of green infrastructure (GIF). In the regulatory documents of the Russian Federation, the concept that would include the application of science and mathematics to resolve the problem of flooding urban spaces does not yet exist. The authors offer their own vision of solving this problem.

Materials and methods. The author's definition of "engineering and technical design" is given, the difference between the existing types of action in the urban environment is indicated, and the main stages of implementation are highlighted. The authors found that urban areas in Moscow that are often flooded by stormwater are main streets of the 2nd class of regulated traffic in the western administrative district. An urban planning analysis of the study area was carried out taking into account climatic characteristics, and the role of "green infrastructure" and bioengineering structures was also identified.

Results. The author's calculation of the average flow rate of stormwater in a bioengineered structure is necessary to select the size of the elements of the green infrastructure that are planned to be placed on the territory. The flow rate of stormwater over an impenetrable surface is almost three times higher than with soil and vegetation resistance, depending on the slope of the territory.

Conclusions. The variant of the implementation of engineering and technical design on the main street of Moscow — Michurinsky Prospekt, which includes the design idea of space using the structure of man-made biotopes, is offered. Storm water is accumulated and redistributed through bioengineered structures, feeding vegetation.

KEYWORDS: engineering and technical design, green infrastructure, bioengineering constructions, man-made biotope, stormwater flow rate, spirit of place, design code

FOR CITATION: Zaykova E.Yu., Feofanova S.S. Engineering and technical design of main streets with integration of green infrastructure elements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1260-1273. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1260-1273 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Климатические изменения неизбежно влекут за собой такие последствия, как повышение концентрации парниковых газов в атмосфере, удлинение тепловых волн и учащение подтоплений городов ливневыми водами. В городах уже отмечается повышение температуры вследствие изменения климата и прогнозируется усугубление потепления в будущем. Водные объекты на урбанизированных территориях могут способствовать снижению температуры и уменьшению эффекта теплового острова из-за процессов интенсивного испарения и высокой теплоемкости, а также за счет воздействия на местный воздушный поток [1]. Так, территории с водоемами, которые имеют более сложную форму и поддерживаются большим количеством зеленых насаждений рядом благоприятнее всего влияют на температуру и влажность воздуха. Чем больше видов есть в растительном сообществе, тем менее выраженными будут колебания температуры почвы под ним. Такое сглаживание происходит по причине роста концентрации почвенного углерода и увеличения площади поверхности листьев, которые характерны для экосистем с высоким биоразнообразием [2].

Существует и обратное воздействие города на озелененные территории: загрязнение воздушного бассейна, воды и почвы, сокращение природных ландшафтов, уменьшение видового разнообразия биоценоза. Одной из важных задач в функционировании и развитии города служит создание благоприятной экологической обстановки, сохранение и развитие целостной системы «природа – общество – человек» [3].

Для решения этой задачи США и страны Европы в 80-х гг. XX в. предложили использовать озелененные участки городских территорий и ввели понятие «зеленая инфраструктура» (ЗИФ) — специально спланированная система природных территорий естественного и антропогенного происхождения, расположенная в границах населенного пункта, способная осуществлять широкий спектр экосистемных услуг¹. На сегодняшний день это взаимо-

выгодное «сотрудничество» с растениями и почвой, чтобы собрать, замедлить и очистить ливневые стоки² расширилось до создания «ингредиентов» для решения городских и климатических проблем путем взаимодействия с природой — биофильтрационных склонов, биодренажных канав, дождевых садов. Эти «элементы зеленой инфраструктуры» проводят в городе адаптацию к климату, снижают тепловой стресс, улучшают качество воздуха и здоровые почвы, а также выполняют более антропоцентрические функции, такие как повышение качества жизни, посредством отдыха и предоставления тени и укрытия в городах и вокруг них³.

Таким образом, появились первые законодательно утвержденные программы по внедрению ЗИФ в зарубежных городах: «Экологическое управление ливневыми стоками» [4], «Технология экологически щадящего подхода к дизайну территории»⁴, «Зеленый город, чистые воды»⁵, «Города-губки» [5], «Городской дизайн, чувствительный к воде»⁶ и др.

В России нормативно закрепленным инструментом для решения поставленной задачи является «инженерное благоустройство». Это понятие охватывает ряд вопросов: инженерной подготовки территории, инженерного оборудования, озеленения, инженерного благоустройства естественных и искусственных водоемов, санитарного благоустройства города, малых архитектурных форм [6]. Также под «благоустройством» из п. 3.2 СП 82.13330.2016

² Что такое зеленая инфраструктура? // San Francisco Water Power Sewer. 2011. URL: <https://sfpu.org/ru/programs/san-franciscos-urban-watersheds/what-green-infrastructure>

³ «Зеленая инфраструктура» // РусАльянс «Сова». 2023. URL: <https://sowa-ru.com/article/top/ekosistema/zelenaya-infrastruktura/>

⁴ Revising Local Codes to Facilitate Low Impact Development. Creating LID—Local Development Code Connections Will Assist With Implementation // EPA. USA. 2021. P. 8. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-06/documents/lid_fact_sheet_codes_june_2021_508.pdf

⁵ Greenworks Philadelphia // Greenworks. USA : Philadelphia, 2022. P. 64. URL: <https://www.phila.gov/media/20220421120407/OOS-Greenworks-Review-2022.pdf>

⁶ Water Sensitive Urban Design (WSUD)? // Water by design. Australia. 2020. URL: <https://waterbydesign.com.au/wsud>

¹ Глоссарий «Зеленая инфраструктура» // Экоурбанист. 2023. URL: <https://ecourbanist.ru/glossary/zelenaya-infrastruktura/>

«Благоустройство территорий»⁷ отдельно отмечают мероприятия, направленные на улучшение функционального, экологического и эстетического состояния участка. То есть предполагается комплексное действие в рамках городской среды, однако на практике этого не происходит.

С другой стороны, понятие «дизайн архитектурной среды» включает широкий спектр проектирования как предметов, так и пространственной среды⁸. Также существуют уточняющие определения для этих сфер:

- «промышленный дизайн» — процесс проектирования, применяемый к физическим продуктам, которые должны производиться массовым производством [7];

- «ландшафтный дизайн» — это наука о построении гармоничного пространства, видах растений, малых архитектурных формах [8];

- «дизайн городской среды» — комплексное формирование общественного пространства города⁹.

Следовательно, дизайн среды — это направление, которое включает самые разные виды дизайна: от ландшафтного до выставочного, от предметного до интерьерного.

В нормативных документах РФ, регулирующих эти сферы, понятия, которое включало бы в себя применение науки и математики для решения проблемы подтопления городских пространств, еще не существует. В городе необходимы инженерные сооружения, поглощающие ливневую воду и выполненные технически правильно, т.е. справляющиеся с предотвращением подтопления. Исходя из этого, авторы ставят перед собой цель научно описать в настоящей статье современный подход к решению обозначенной проблемы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определение и этапы внедрения инженерно-технического дизайна

Авторы рекомендуют ввести понятие «инженерно-технический дизайн» и предлагают его определение: это модель благоустройства, которая включает в себя дизайн-идею пространства с использованием атмосферной воды как для ее аккумуляции за счет элементов ЗИФ, так и создания

структуры авторских рукотворных биотопов во времени без последующего поддержания.

Под процессом внедрения инженерно-технического дизайна городских территорий авторы подразумевают детальные расчеты количества ливневой воды¹⁰, скорости ее течения (авторский расчет, приведенный в данной статье), инфильтрации [9] и испарения [10], наличие инженерных коммуникаций на территории и внесение изменений в градостроительные нормативные документы. При создании инженерно-технического дизайна необходимо продумать все технические нюансы относительно передвижения воды в биоинженерных сооружениях, а также работ по озеленению территории и создания «умного благоустройства».

Инженерно-технический дизайн с интеграцией элементов ЗИФ сочетает в себе способы благоустройства территории (инженерной подготовки территории, ее озеленение, создание дорожек, освещение, обустройство мест отдыха, обустройство искусственных водоемов) и приемов ландшафтного дизайна (композиция, соотношение, перспектива, цвет, светотень, а также способы интеграции озеленения в здания [11]) на природных территориях естественного и антропогенного происхождения в границах населенных пунктов.

Авторы предлагают внедрить инженерно-технический дизайн на магистральных улицах городов и примагистральных территориях. Это понятие характеризуется инновационным технологическим подходом к озеленению, использованию биоинженерных сооружений и раскрытию фиторемедиационного потенциала городских территорий не только с утилитарной точки зрения, но и с «дизайнерской» — в контексте архитектурной среды города. Авторы выделяют основные этапы внедрения инженерно-технического дизайна такие, как:

- 1) оценка потенциала территории (форма и площадь участка для возможного внедрения зеленой инфраструктуры, условия рельефа, биоклиматические условия, возможность сбора ливневых вод, наличие коммуникаций для подключения);

- 2) анализ градостроительной ситуации (близость социальной и транспортной инфраструктур, жилой застройки, других пространственных ограничений);

- 3) оценка возможных рисков и препятствий (наличие экологических ограничений, наличие подземных коммуникаций, нормативные ограничения);

- 4) проведение инженерной подготовки территории (вертикальная планировка, выбор элементов ЗИФ, переустройство коммуникаций);

¹⁰ Об утверждении Методических указаний по расчету объема принятых (отведенных) поверхностных сточных вод : Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 17.10.2014 № 639/пр. 2014. URL: <https://base.garant.ru/70877958/>

5) создание зрительной запоминаемости территории (в контексте духа места и исторического аспекта, с помощью цветового дизайн-кода места через подбор и посадку растений).

Градостроительный анализ считается наиболее сложным типом предпроектного исследования, так как проводится на основе данных, которые зачастую отсутствуют в открытых источниках в структурированном виде, и требует обширного знания градостроительных документов. Для инженерно-технического дизайна магистральных улиц важное значение имеют нормативные документы, регулирующие создание, содержание и охрану зеленых насаждений, которые отличаются от города к городу из-за совместного ведения этих территорий Российской Федерацией и субъектами РФ.

Климат — один из недооцененных факторов, не полностью учитываемых в градостроительстве [12]. Так, строительная климатология изучает те элементы климата, которые воздействуют на здания и требуют учета при их проектировании, строительстве и эксплуатации. Также есть предмет «архитектурная климатология» — часть архитектурной физики, которая раскрывает связи между климатическими условиями и архитектурой зданий [13]. В СП 42.13330.2016¹¹ учи-

тываются следующие основные климатические характеристики: температура и влажность воздуха, ветровой режим и инсоляция. Также принимаются в расчет антропогенные факторы: уровень загрязнения атмосферы и гидросферы, состояние почвенно-растительного покрова, уровень шума и вибрации и т.д. Однако есть еще одна климатическая переменная, оказывающая значительное влияние на городскую среду и биоразнообразие [14], — количество осадков. Таким образом, нормативные документы в сфере градостроительства и зеленых насаждений не учитывают атмосферные осадки и скапливающиеся ливневые воды.

Градостроительный анализ территории исследования

Наиболее часто подтапливаемые территории в городе — это участки улично-дорожной сети (УДС) и общественных пространств с пониженным рельефом, куда естественным образом стекаются излишки атмосферных осадков и ливневой воды. Центр организации дорожного движения ГУП «Мосводосток» ведут статистику таких случаев. Авторами были изучены почти 50 адресов, которые встречались чаще всего за последние 3 года (рис. 1).

Так, наибольшее количество подтоплений УДС происходит в ЗАО Москвы на магистральных ули-

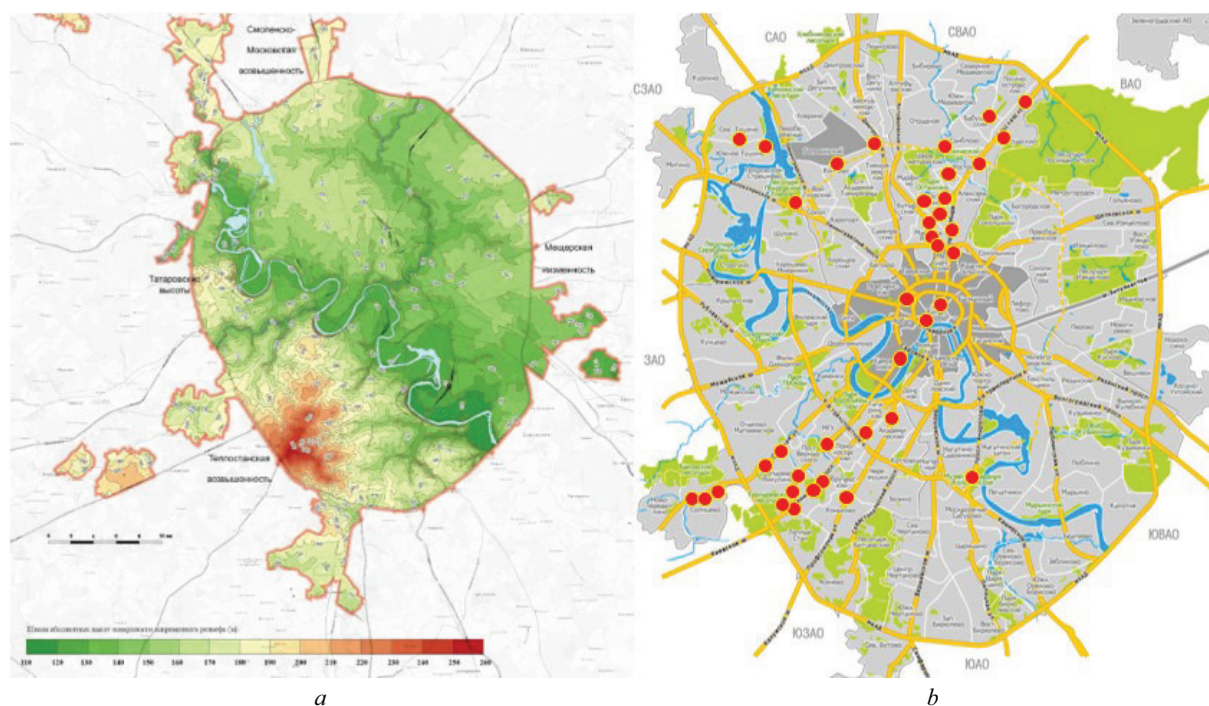


Рис. 1. Гипсометрическая карта современного рельефа г. Москвы (а)¹² и карта частых подтоплений улично-дорожной сети 2020–2023 гг. (b) (схема авторов)

Fig. 1. Hypsometric map of the Moscow modern relief (a)¹² and map of frequent flooding of the street and road network in 2020–2023 (b) (authors' scheme)

¹¹ СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89* (с Изменениями № 1, 2). 2017. URL: <http://sniprf.ru/sp42-13330-2016>

¹² Перечень специальностей и направлений подготовки. Дизайн архитектурной среды // Институт архитектуры и строительства ВолГТУ. 2023. URL: <https://vgasu.ru/abitur/perechen-spetsialnostey-i-napravleniy-podgotovki/dizayn-arkhitekturnoy-sredy/>

цах 2-го класса регулируемого движения — проспектах Ленинский, Мичуринский и Вернадского, несмотря на недавнее благоустройство. Это объясняется возросшим количеством осадков в Москве и низинным рельефом местности, поэтому выберем их для проведения исследования. В табл. 1 приведен краткий градостроительный анализ территории исследования.

Климат Москвы характеризуют как умеренно континентальный. Зимой наряду с устойчивыми морозами почти ежегодно наблюдаются оттепели, летом ясная и довольно жаркая погода перемежается

с дождливой и относительно прохладной. Вегетационный период в Москве составляет 175–216 дней, с апреля по ноябрь, большую часть которого солнце светит по 15–17 ч, а температура воздуха имеет положительные значения.

При проведении анализа климатических данных авторы выявили проблему: период осреднения данных об осадках приходится на 1961–1990 гг.¹³ Сказывает-

¹³ Среднемесячные климатические данные для г. Москвы // Гидрометцентр России. 2023. URL: <https://meteoinfo.ru/categ-articles/98-climate-cat/1709-moskva-climat>

Табл. 1. SWOT-анализ территории исследования

Table 1. SWOT analysis of the research area

Фактор Factor	Положительные стороны The positive aspects	Отрицательные стороны The negative aspects
Внутренняя среда Internal environment	Ширина проспектов колеблется от 50 до 120 м The width of streets ranges from 50 to 120 m	Наблюдается перегруженность системы отведения ливневых вод There is an overload of the stormwater drainage system
	Наличие пешеходных и транспортных потоков The presence of pedestrian and traffic flows	При проектировании для стока воды не был учтен естественный рельеф The natural relief was not taken into account when designing for the water flow
	Наличие озелененных полос и ООПТ The presence of green areas and protected areas	Непонятное расположение подземных инженерных коммуникаций The location of the underground utilities is unclear
Внешняя среда External environment	Влажный континентальный климат Humid continental climate	Современное благоустройство не отвечает международным стандартам Modern landscaping does not meet international standards
	Механическая фильтрация сточных вод Mechanical filtration of wastewater	Часто выпадает большое количество осадков There is often a lot of precipitation
	Отсутствие проницаемых покрытий The absence of permeable coatings	Строительство новых километров ливневой канализации и дополнительных очистных сооружений экономически невыгодно The construction of new kilometers of storm sewers and additional sewage treatment plants is economically unprofitable

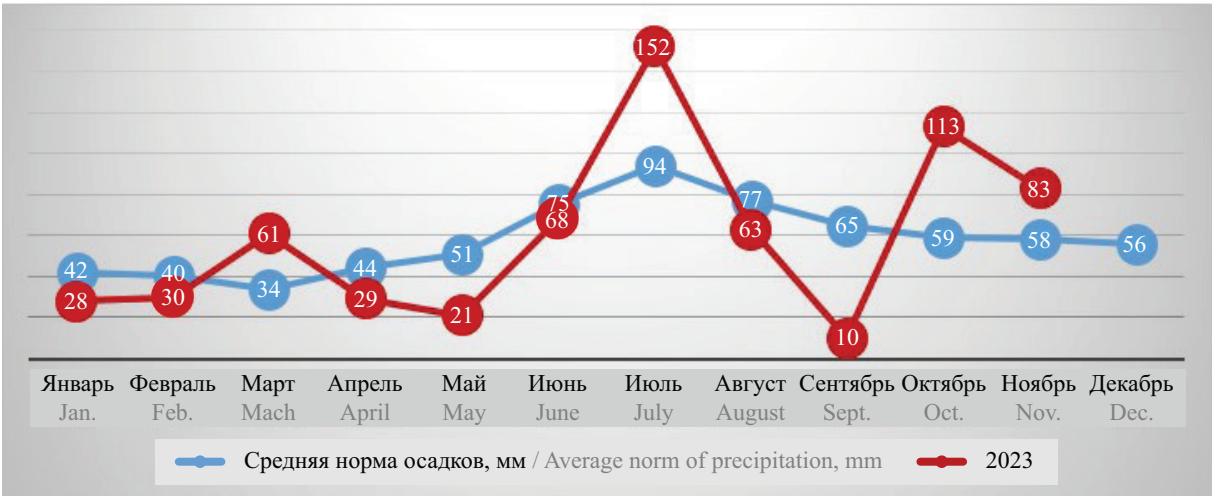
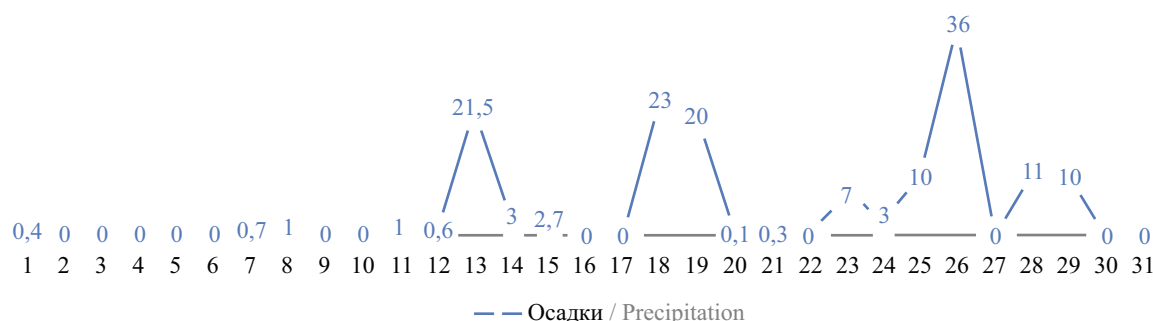


Рис. 2. Сравнение количества осадков за 2023 г. относительно средней нормы (схема авторов)

Fig. 2. Comparison of precipitation for 2023 relative to the average norm (authors' scheme)

Рис. 3. График осадков за июль 2023 г.¹⁴ (схема авторов)Fig. 3. Precipitation chart for July 2023¹⁴ (authors' scheme)

ся отсутствие полноценных исследований по комплексному учету природных климатических факторов в России с 1990-х гг. до настоящего времени [15].

На рис. 2 отмечается два месяца в вегетационный период с 1,5–2-кратным превышением нормы осадков — июль и октябрь 2023 г. Так сказывается рост среднегодовой температуры из-за изменения климата. Таким образом, увеличение количества осадков становится еще более заметным относительно устаревших данных.

Рассмотрим подробнее рис. 3. Четко видно пиковое значение — 36 мм осадков за 26 июля, что означает ливень. Прослеживаются еще три всплеска: два эпизода сильного дождя с 12 по 14 июля и с 18 по 20 июля — в среднем по 22 мм осадков, и один эпизод умеренного дождя 28–29 июля по 10 мм осадков. Такой неравномерный характер атмосферных осадков является следствием глобального потепления с увеличением количества «залповых» ливней, когда за один раз выпадает треть месячной нормы.

Для дальнейших расчетов авторы предлагают взять за основу данные о ливневом дожде 26 июля 2023 г. — 36 мм осадков, который длился около трех часов с 14 до 17 ч. За 1 ч дождя выпало около 12 мм осадков на 1 м². Такое количество осадков — это 12 кг воды на каждый квадратный метр. Из-за уклонов рельефа выпавшие осадки стекают в пониженные места, образуя бурные ручьи и глубокие лужи на непроницаемых поверхностях, в то время как на территориях зеленых насаждений поток ливневой воды гораздо меньше.

ЗИФ в инженерно-техническом дизайне магистральных улиц

Инженерно-технический дизайн в городской среде также оперирует понятиями из «зеленой инфраструктуры» и использует технологические инновации для упрощения процедур содержания зеленых насаждений в эстетическом виде. Наиболее распространенные биоинженерные сооружения, помогающие управлять ливневыми водами в горо-

де, — биофильтрационный склон, биодренажная канава и дождевой сад [16].

Для этих элементов ЗИФ авторами предложены группы растений, отличающиеся по норме водопотребления в 1,5 раза друг от друга. Так, растения, которым требуется от 1 до 7 л воды в сутки на 1 м² посадки, относятся к сухому биотопу 1, например, медуница (*Pulmonria*) и ацена мелколистная (*Acaena microphylla*). Такой биотоп поливается естественными осадками. Растения с водопотреблением от 7,1 до 14 л воды в сутки на 1 м² посадки относятся к сухому биотопу 2, например, вероника (*Veronica*), шалфей дубравный (*Salvia nemorosa*) и ястребинка (*Hieracium*). Растения с нормой полива от 14,1 до 25 л воды в сутки на 1 м² посадки относятся к сухому биотопу 3, например, колокольчик (*Campanula*), лапчатка (*Potentilla*) и горечавка (*Gentiana*). В такие биотопы возможно устройство дополнительного водоотведения с тротуаров. Под сухими биотопами могут располагаться подземные коммуникации, так как предполагается движение небольшого количества ливневой воды по территории, необходимой для полива растений.

Высшие водные и прибрежно-водные растения с нормой водопотребления от 25 до 50 л в сутки авторы относят к полувлажному биотопу, например, полынь (*Artemisia*) и волжанка (*Aruncus*). Растения, которым требуется более 50 л в сутки входят в состав влажного биотопа, например, рогоз (*Typha*) и камыш укореняющийся (*Scirpus radicans*). Очевидно, что в полувлажном и влажном биотопах, которые авторы предлагают устроить в дождевых садах и биодренажных канавах, невозможно наличие подземных коммуникаций.

Наиболее эффективная форма дождевого сада зависит от распределения направлений ветра: на территориях, где преобладает штиль, более эффективным будет округлый водоем, в то время как в местах с выраженным направлением ветра более эффективным будет удлиненный водоем в его направлении [17]. Высшими водными растениями подавляется развитие водорослей, а значит, устраняется вредное «цветение» воды, выделяются во внешнюю среду физиологически активные вещества, убивающие микроорганизмы, поэтому в дождевом саду бу-

¹⁴ Погода в Москве в июле 2023 года // World Weather. 2023. URL: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/moscow/july-2023/>

дет наблюдаться частичная или полная стерилизация воды. Водные растения играют роль сорбента и плотителя, ускоряя самоочищение воды даже от такого стойкого загрязнителя, как нефть [18].

Инженерная подготовка территорий для устройства биоинженерных сооружений — обязательная часть инженерно-технического дизайна, чтобы адаптировать элементы ЗИФ к условиям рельефа улиц и количеству принимаемых ливневых вод. Определено, что на территории исследования существует достаточный запас места для размещения нескольких элементов зеленой инфраструктуры [19].

Отвод поверхностных вод следует осуществлять со всего «бассейна», предусматривая ливневую канализацию закрытого типа или открытую систему отвода поверхностных вод. Выпадающие на территории города атмосферные осадки не полностью стекают и поступают в водосточную сеть. Авторами установлено, что только 20 % осадков попадают в ливневую канализацию и 40 % осадков испаряется [16]. Таким образом, простейшим способом сбора оставшихся поверхностных ливневых вод является открытая система — лотки, каналы, кюветы, канавы, которая без механической очистки перенаправляет поток в ближайший водоем. Эти регулирующие пруды рассчитываются на дождевой сток, так как интенсивность дождя обычно значительно выше интенсивности снеготаяния [20].

Существуют нормативы по скорости потока воды в трубе ливневой канализации¹⁵, однако нормативов для сбора и перераспределения поверхностного стока ливневых вод в настоящий момент нет. Такой расчет необходим для выбора размеров элементов ЗИФ, которые планируется разместить на территории. Для расчетов скорости поверхностного потока ливневых вод нужно учитывать, что часть осадков впитывается в почву, часть остается в виде смачивающего слоя на водонепроницаемых поверхностях и испаряется в атмосферу.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вычисление средней скорости потока ливневой воды в биоинженерных сооружениях

Эмпирическая формула Маннинга применяется для оценки средней скорости воды, текущей в открытом канале в местах, где нецелесообразно сооружать водослив или лоток для измерения расхода с большей точностью. Эмпирическая формула является приближенной к экспериментальным данным, простым аналогом более сложного точного теоретического соотношения. В 2000-х гг. эта формула была получена теоретически с использованием феноменологической теории турбулентности. В 2018 г. профессор Османд Э. Шарпантье из Панамы создал

физико-математическую демонстрацию формулы, доказав ее жизнеспособность [21].

Вычислим среднюю скорость потока ливневой воды в открытом русле по эмпирической формуле Маннинга [22]:

$$V = \frac{k}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где V — средняя скорость безнапорного потока в открытом русле, м/с; k — переводной коэффициент для СИ, м^{1/3}; n — коэффициент шероховатости поверхности протекания потока, с/м^{1/3}; I — гидравлический уклон, м/м; R — гидравлический радиус, м, рассчитываемый по формуле [23]:

$$R = \frac{A}{P}, \quad (2)$$

где A — площадь потока ливневых вод (на 1 м²); P — смоченный периметр, м.

Коэффициент шероховатости характеризует грунт или непроницаемое покрытие ложа потоков. Величина коэффициента шероховатости грунта определяется величиной выступов на дне и стенках русла, формой русла в плане, наличием в нем растительности и других источников местных сопротивлений (рис. 4).

Степень увеличения коэффициента зависит от растений, их густоты и занятой доли глубины потока, которые в большинстве случаев рассредоточены в русле беспорядочно [24]. Запишем эти данные для начала вычисления в табл. 2. Проведем вычисление средней скорости течения ливневой воды в биоинженерных сооружениях и на непроницаемом покрытии в табл. 2.

Вычисленные скорости движения ливневого потока примерно равны половине скорости обычного течения реки, а значит, расчеты можно признать верными. Переменность скорости потока ливневых вод объясняется тем, что по мере хода дождя происходит насыщение поверхности стока водой и ее впитывание постепенно прекращается или стабилизируется. Если определенная по расчету скорость воды превышает допустимую на размыв, следует применять отвод поверхностных вод колодцами-поглотителями¹⁶.

Авторы предлагают к сравнению скорость течения ливневой воды в биоинженерных сооружениях и по непроницаемой поверхности. Из-за сопротивления растительности скорость ливневого потока в биоинженерном сооружении почти втрое ниже, чем по условному асфальту, в зависимости от уклона территории. Таким образом, можно сделать вывод, что растительность замедляет поверхностный сток, впитывая его и удерживая на участках зеленых насаждений. Также биоинженерные сооружения го-

¹⁵ СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03-85 (с Изменением № 1). 2018. URL: <http://sniprf.ru/sp32-13330-2018>

¹⁶ СП 100.13330. СНиП 2.06.03-85. Мелиоративные системы и сооружения. 2016. URL: http://sudexpertiza.org/upload/iblock/a23/sp-100.13330.2016-snip-2.06.03_85-meliorativnye-sistemy-i-sooruzheniya.pdf

товы принять на себя дополнительный объем воды, чтобы снизить вероятность затопления улиц и повысить комфортность городской среды.

Произведенный расчет поможет при выборе биоинженерного сооружения для устройства на городских озелененных пространствах. Авторы рекомендуют предложенную методику использовать для дополнения и расширения содержания нормативных документов.

Инженерно-технический дизайн магистральных улиц

Ландшафт служит основой для развития городской среды и культурной неповторимости [25]. Вос-

приятие архитектурной городской среды происходит с различных плоскостей пространства, и наиболее привычной позицией для восприятия города человеком является уровень зрительного восприятия каждого конкретного пользователя, т.е. при прохождении. Следовательно, восприятие города как целостной визуальной среды обусловлено структурой движения по основным магистралям [26]. Так, благоустройство помогает «идентифицировать» пространство: жители ощущают себя дома, а туристы запечатлевают уникальность. Все это создает условия для выявления «духа места» — первоначального смысла территории, сохраняющегося и передающегося в будущее,

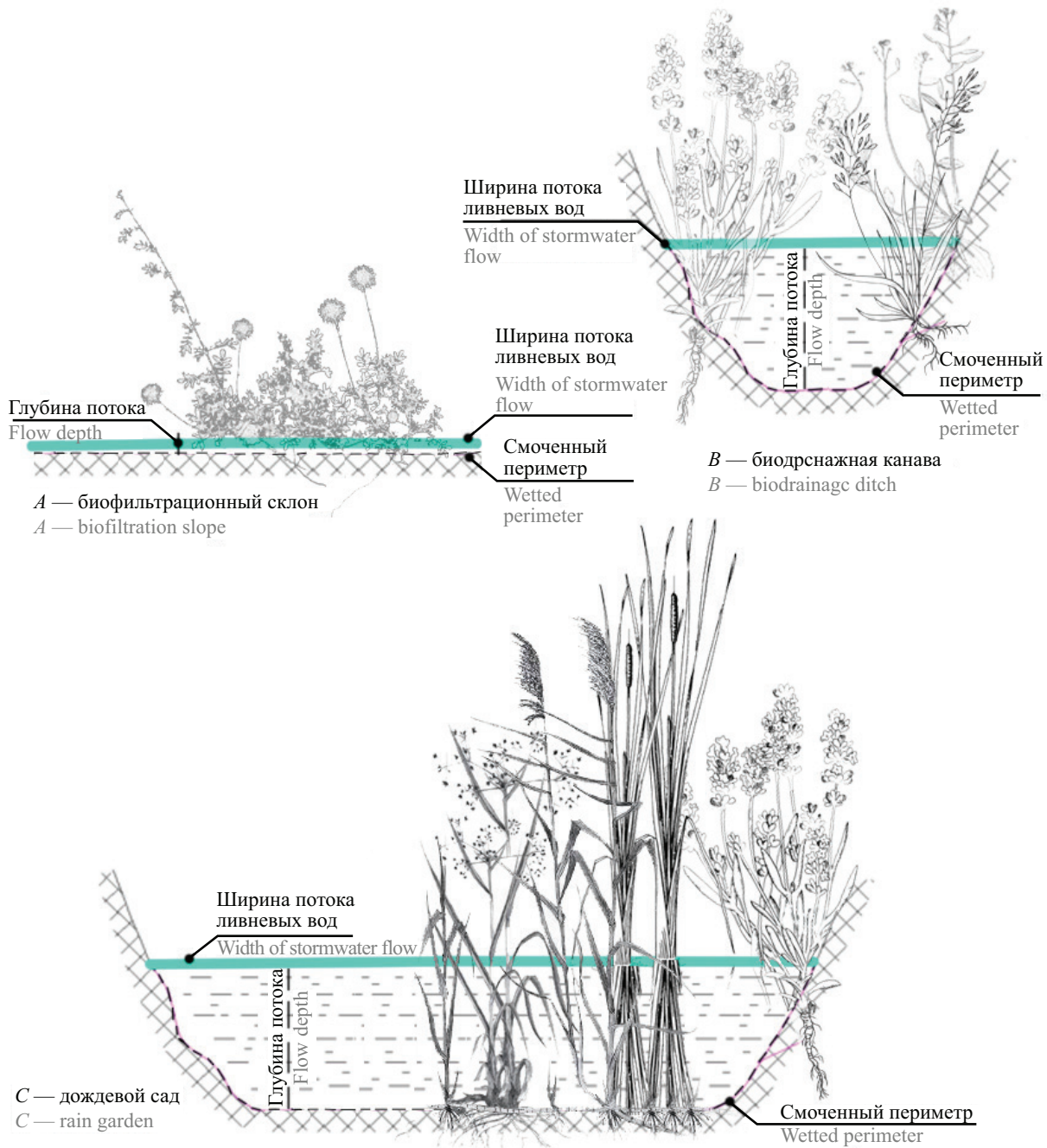


Рис. 4. Схематичные разрезы биоинженерных сооружений с потоком ливневой воды (схема авторов)

Fig. 4. Schematic sections of bioengineered structures with stormwater flow (authors' scheme)

Табл. 2. Описание переменных и вычисление средней скорости течения ливневой воды в биоинженерных сооружениях
Table 2. Schematic sections of bioengineered structures with stormwater flow (authors' scheme)

Тип биотопа посадки Type of biotope planting	Сухой 1 Dry biotope 1	Сухой 2 Dry biotope 2	Сухой 3 Dry biotope 3	Полувлажный Semi-wet biotope	Влажный Wet biotope	Непроницаемое покрытие Impermeable covering
Тип биоинженерного сооружения Type of bioengineering structure	Биофильтрационный склон Biofiltration slope	Биодренажная канава Biodrenage ditch		Дождевой сад Rain garden		—
Доля глубины потока, занятой растительностью, % The proportion of the stream depth occupied by vegetation, %	95	70		50	60	0
Глубина потока, м Flow depth, m	0,01	0,05		0,1	0,2	0,01
Ширина потока ливневых вод, м Width of stormwater flow, m	1	0,2		2		1
Возможный уклон рельефа, % Possible terrain slope, %	0–3	3–9	9–15	0–15		0–15
Гидравлический уклон I Hydraulic slope I	0,001–0,03	0,03–0,09	0,09–0,15	0,001–0,15		0,001–0,15
Коэффициент шероховатости поверхности почвы n Soil surface roughness coefficient n	1–1,2	1,2–1,4		1,5	1,6	0,15–0,62
Площадь потока ливневых вод A (на 1 м ²) Stormwater flow area A (per 1 m ²)	1	0,2		2	2	1
Смоченный периметр P , м Wetted perimeter P , m	1	0,4		2,2	2,4	1
Гидравлический радиус R , м Hydraulic radius R , m	1	0,05		0,95	0,9	1
Скорость течения ливневой воды V , м/с Stormwater flow rate V , m/s	0,17	0,019–0,03	0,03–0,24	0,02–0,25	0,017–0,22	0,21–0,62

духовного наполнения, вызывающего эмоции и чувства человека в конкретном месте городского пространства или разных городах.

Зеленые насаждения имеют важное эстетическое значение, являясь полноправным компонентом благоустройства архитектурно-градостроительной среды города [27]. С помощью озеленения авторы предлагают изменить облик города в сторону природной естественности и подражания природным экосистемам, придать черты индивидуальной вы-

разительности магистральным улицам. Формирование дизайн-кода конкретного места в городе предлагается осуществлять посредством структуры биотопов с подбором ассортимента растений для соответствующих почвенных, влажностных и декоративно-цветовых условий. В общественных местах биотопы будут иметь декоративный рукотворный вид, а на озелененных территориях вдоль магистралей биотоп должен иметь естественный образ, сменяя виды в своей структуре, выполняя принцип

«работать в союзе с природой, а не против нее»¹⁷. Этот прием «спонтанной природы» повысит биоразнообразие городской среды [28]. Такие подходы соответствуют принципу поддерживаемого благо-

¹⁷ Жиль Клеман и его «сады в движении». 2012. URL: <https://www.gardener.ru/events/miscellanea/cat1091.php>

устройства, усиливающему адаптационные возможности городской среды и регенерацию озелененных территорий современного города [29].

Немаловажная часть инженерно-технического дизайна — дизайн-идея пространства. Необходимость внедрения дизайн-кодов стала очевидной одновременно с ростом популярности эргономичных



Рис. 5. Перспективный вид инженерно-технического дизайна на территории исследования (рисунок авторов)
Fig. 5. A prospective view of engineering and technical design in the research area (authors' scheme)

и благоустроенных общественных пространств. Основные элементы дизайн-кода — это палитра цветов и подчинение определенной логике. Цвет возникает из истории каждого места и привносит социально-семиотические черты в обновленную городскую среду. Территорией для внедрения результатов исследования были выбраны юго-западные магистральные улицы 2-го класса регулируемого движения. Дизайн-идеи для Ленинского пр-та [30] и пр-та Вернадского [25] проиллюстрированы в предыдущих статьях авторов. В данной статье рассмотрим третий проспект из наиболее часто подтапливаемых в ЗАО Москвы — Мичуринский.

В инженерно-техническом дизайне используется прием подражания природе для наполнения городской среды растительными элементами. На пересечении общественной и транспортной функциональных зон происходит наполнение биоинженерных сооружений декоративными растениями, водными потоками, за счет чего обеспечивается всесезонность цветения. Авторы называют такой метод «урбанизированное подражание».

На рис. 5 представлен перспективный вид Мичуринского пр-та с дизайн-кодом в духе места. Территория исследования названа в честь И.В. Мичурина — известного русского биолога и выдающегося селекционера. Благодаря своим новаторским идеям в области селекции растений И.В. Мичурин сумел вывести множество сортов яблонь, вишен и других плодовых и ягодных культур, которые цветут в палитре от бело-розового до темной фуксии. Именно эту гамму авторы определили для цветового кода исследуемой территории.

В инженерной части авторы предлагают устройство биофильтрационный склон, который будет передавать ливневую воду вниз по рельефу к Большому Очаковскому пруду, а пешеходная коммуникация должна иметь проницаемую конструкцию дорожной одежды, способную своей типологией элементов отводить поверхностную воду в контур на зеленые участки, что создаст меньший поверхностный сток.

Рукотворный биотоп с имитацией природных процессов и цвето-размерным воплощением духа места позволит не только управлять ливневыми водами, но и повысить идентичность архитектурной среды города. Инженерно-технический дизайн — это инструмент для формирования взаимосвязанной стилистически единой комфортной и безопасной архитектурно-градостроительной и наполненной художественной среды города, которая включает внешние поверхности зданий, строений и сооружений, городской ландшафт, элементы благоустройства, навигации, информации и рекламы на территории города.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложения авторов рекомендуются для внесения дополнений в нормативные документы РФ, такие как СП 42.13330.2016 «Градостроительство»¹¹, СП 82.13330.2016 «Благоустройство территорий» и национальные «зеленые» стандарты РФ¹⁸. Отличительной особенностью предложенного авторского решения является расчетная проработка вопроса, позволяющая экстраполировать проведенное исследование на другие города нашей страны, с обязательным учетом ландшафтных и климатических характеристик территории.

Представлены вычисления средней скорости потока ливневой воды в биоинженерных сооружениях: биофильтрационный склон, биодренажная канава, дождевой сад, а также по непроницаемой поверхности. Приведенные данные являются среднестатистическими для таких элементов ЗИФ и меняются в зависимости от уклона территории, наличия и количества растительности, размеров и площади сооружения, т.е. зависят от типологических характеристик конкретного участка градостроительного анализа. Таким образом, полученный результат авторы признают валидным.

Авторы считают, что влияние природно-климатических условий местности на решение градостроительных задач велико. На любой стадии инженерно-технического дизайна территории необходима информация обо всех территориальных факторах, в результате анализа которых выделяются пригодные для внедрения ЗИФ территории, выполняются работы по устройству поверхностного дренажа, выясняются требования охраны природы и окружающей среды, определяются ведущие элементы ландшафта с целью создания наиболее благоприятной среды для жизни, труда и отдыха населения.

В дополнение к инженерной подготовке территории устройством открытых дренажей авторы принимают в расчет количество поверхностной воды для полива растительности. Принцип подражания природе предоставляет широкие возможности по использованию растений местной флоры для формирования структуры биотопов. Подбор растений по цвету в контексте «духа места» открывает идентичность территории и придает современность данному исследованию. Авторами представлен новый способ управления градостроительным развитием территорий, учитывая изменение климата и зависящее от этого увеличение количества осадков.

¹⁸ ГОСТ Р 70346–2022. «Зеленые» стандарты. Здания многоквартирные жилые «зеленые». Методика оценки и критерии проектирования, строительства и эксплуатации. 2022. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200193111>

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhao L., Li T., Przybysz A., Liu H., Zhang B., An W. et al. Effects of urban lakes and neighbouring green spaces on air temperature and humidity and seasonal variabilities // *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 91. P. 104438. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104438
2. Huang Y., Stein G., Kolle O., Kübler K., Schulze E.D., Dong H. et al. Enhanced stability of grassland soil temperature by plant diversity // *Nature Geoscience*. 2023. Vol. 17. Issue 1. Pp. 44–50. DOI: 10.1038/s41561-023-01338-5
3. Кузнецов О.Л., Кузнецов П.Г., Большаков Б.Е. Система природа – общество – человек: устойчивое развитие. Дубна, 2000. 272 с.
4. Tharp R. Ecological Stormwater Management: Analysis of design components to improve understanding and performance of stormwater retention ponds: Dissertation. Burlington, University of Vermont, 2018. 158 p.
5. Harrisberg K. What are ‘sponge cities’ and how can they prevent floods? // Thomson Reuters Foundation. 2022.
6. Тугова Т.А. Инженерное благоустройство городских территорий и транспорт : методическое пособие. Бишкек : КРСУ, 2007. 54 с.
7. Голубятников И.В., Кухта М.С. Промышленный дизайн : учебник. Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2013. 310 с.
8. Гарнизоненко Т.С. Справочник современного ландшафтного дизайнера. Ростов-на-Дону : Феникс, 2005. 313 с.
9. Ларионов Г.А., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Горобец А.В. и др. Влияние плотности почвы, сопротивления разрыву и инфильтрации воды на скорость разрушения межагрегатных связей // *Почвоведение*. 2017. № 3. С. 354–359. DOI: 10.7868/S0032180X17010099. EDN YIVCRR.
10. Тимофеев М.П., Кириллова Т.В. Метеорологический режим водоемов // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Л., 1967. № 206.
11. Zaykova E. Formation methods of hybrid urban spaces in the historic city center // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 01031. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701031
12. Янковская Ю.С., Лебедева Е.Н., Лобанов Ю.Н. Природно-климатические и экологические аспекты в архитектурно-градостроительном проектировании и исследовании жилой среды // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 5 (82). С. 49–58. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-49-58. EDN UAVNDR.
13. Лицкевич В.К., Конова Л.И. Учет природно-климатических условий местности в архитектурном проектировании : учебно-методические указания к курсовой расчетно-графической работе. М. : МАРХИ, 2011. 44 с.
14. Wang Y., Cadotte M.W., Chen Y., Fraser L.H., Zhang Y., Huang F. et al. Global evidence of positive biodiversity effects on spatial ecosystem stability in natural grasslands // *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1038/s41467-019-11191-z
15. Тимофеева В.А., Жидкова Е.И. Влияние природно-территориальных условий местности на решение градостроительных задач // *Инженерный вестник Дона*. 2020. № 10 (70). С. 1–9. EDN NHKQZF.
16. Feofanova S.S., Zaykova E.Y. Territorial physical and mathematical model of stormwater management // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 403. P. 04003. DOI: 10.1051/e3sconf/202340304003
17. Ampatzidis P., Cintolesi C., Petronio A., Sabatino S.D., Kershaw T. Evaporating waterbody effects in a simplified urban neighborhood: A RANS analysis // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2022. Vol. 227. P. 105078. DOI: 10.1016/j.jweia.2022.105078
18. Гуркина О.А. Санитарная гидробиология : краткий курс лекций. Саратов, 2016. 107 с.
19. Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С. Зеленая инфраструктура как инструмент управления ливневыми водами // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 11. С. 1429–1452. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1429-1452. EDN AIPUNV.
20. Ampatzidis P., Kershaw T. A review of the impact of blue space on the urban microclimate // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 730. P. 139068. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139068
21. Charpentier O.E. Manning formula demonstration. 2018.
22. Manning R. On the flow of water in open channels and pipes // *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*. 1891. Pp. 161–207.
23. Васильев Н.Н., Исаакян О.Н., Рогинский Н.О. и др. Технический железнодорожный словарь. М. : Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1941.
24. Глазунов Г.П., Кузнецов М.С. Эрозия и охрана почв : учебник. М. : Издательство Московского университета, 1996.
25. Feofanova S.S., Zaykova E.Y. Perspectives of green infrastructure in the city’s color design-code // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 458. P. 07008. DOI: 10.1051/e3sconf/202345807008
26. Филько А. Визуальное восприятие образа города и методы его исследования // *Урбанистика*. 2015. № 3. С. 1–15. DOI: 10.7256/2310-8673.2015.3.16497. EDN UIYGZL.
27. Zaykova E.Yu. Healing landscapes in the multi-functional hybrid objects // *Proceedings of*

the Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering. 2019. Pp. 347–355.

28. Зайкова Е.Ю. Методы интеграции местных растений в биотопы промышленных зон // Успехи современной науки. 2017. Т. 2. № 5. С. 7–11. EDN YTAYJD.

29. Zaykova E. Strategies ensuring the Stability of Natural and Urbanized Biotopes in hybrid multifunction-

al objects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Issue 1. P. 012065. DOI: 10.1088/1757-899x/1030/1/012065

30. Зайкова Е.Ю. Природно-инженерный каркас города и ландшафта (исторические предпосылки и принципы формирования) : монография. М. : КУРС, 2023. 128 с.

Поступила в редакцию 17 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 21 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 11 июня 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Юрьевна Зайкова — кандидат архитектуры, доцент, доцент кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3019-6269, ORCID: 0000-0002-0555-9941; lena_landscape21@mail.ru;

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

Вклад авторов:

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

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zhao L., Li T., Przybysz A., Liu H., Zhang B., An W. et al. Effects of urban lakes and neighbouring green spaces on air temperature and humidity and seasonal variabilities. *Sustainable Cities and Society*. 2023; 91:104438. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104438

2. Huang Y., Stein G., Kolle O., Kübler K., Schulze E.D., Dong H. et al. Enhanced stability of grassland soil temperature by plant diversity. *Nature Geoscience*. 2023; 17(1):44-50. DOI: 10.1038/s41561-023-01338-5

3. Kuznetsov O.L., Kuznetsov P.G., Bol'shakov B.E. *The nature – society – human system: sustainable development*. Dubna, 2000; 272. (rus.).

4. Tharp R. *Ecological Stormwater Management: Analysis of design components to improve understanding and performance of stormwater retention ponds: Dissertation*. Burlington, University of Vermont, 2018; 158.

5. Harrisberg K. What are 'sponge cities' and how can they prevent floods? *Thomson Reuters Foundation*. 2022.

6. Tugova T.A. *Engineering improvement of urban areas and transport: methodological guide*. Bishkek, KRSU, 2007; 54. (rus.).

7. Golubyatnikov I.V., Kukhta M.S. *Industrial design : textbook*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2013; 310. (rus.).

8. Garnizonenko T.S. *Handbook of a modern landscape designer*. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2005; 313. (rus.).

9. Larionov G.A., Dobrovol'skaya N. G., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F., Litvin L.F., Gorobets A.V. et al. Effect of soil density, tensile strength, and water infiltration on the rupture rate of interaggregate bonds. *Pochvovedenie*. 2017; 3:354-359. DOI: 10.7868/S0032180X-17010099. EDN YIVCRR. (rus.).

10. Timofeev M.P., Kirillova T.V. Meteorological regime of reservoirs. *Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov*. 1967; 206. (rus.).

11. Zaykova E. Formation methods of hybrid urban spaces in the historic city center. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:01031. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701031

12. Yankovskaya Y.S., Lebedeva E.N., Lobanov Yu.N. Natural-climatic and environmental aspects in architectural and urban design and research of the residential environment. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 5(82):49-58. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-49-58. EDN UAVNDR. (rus.).

13. Litskevich V.K., Konova L.I. *Taking into account the natural and climatic conditions of the area in architectural design : educational and methodological guidelines for course calculation and graphic work*. Moscow, MARKhI, 2011; 44. (rus.).

14. Wang Y., Cadotte M.W., Chen Y., Fraser L.H., Zhang Y., Huang F. et al. Global evidence of positive biodiversity effects on spatial ecosystem stability in nat-

ural grasslands. *Nature Communications*. 2019; 10(1). DOI: 10.1038/s41467-019-11191-z

15. Timofeeva V.A., Zhidkova E.I. The influence of the natural-territorial conditions of the area on the solution of urban planning problems. *Engineering journal of Don*. 2020; 10(70):1-9. EDN NHKQZF. (rus.).

16. Feofanova S.S., Zaykova E.Y. Territorial physical and mathematical model of stormwater management. *E3S Web of Conferences*. 2023; 403:04003. DOI: 10.1051/e3sconf/202340304003

17. Ampatzidis P., Cintolesi C., Petronio A., Sabatino S.D., Kershaw T. Evaporating waterbody effects in a simplified urban neighborhood: A RANS analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2022; 227:105078. DOI: 10.1016/j.jweia.2022.105078

18. Gurkina O.A. *Sanitary hydrobiology : short course of lectures*. Saratov, 2016; 107. (rus.).

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

20. Ampatzidis P., Kershaw T. A review of the impact of blue space on the urban microclimate. *Science of the Total Environment*. 2020; 730:139068. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139068

21. Charpentier O.E. *Manning formula demonstration*. 2018.

22. Manning R. On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*. 1891; 161-207.

23. Vasil'ev N.N., Isaakyan O.N., Roginskiy N.O. et al. *Technical Railway Dictionary*. Moscow, State Transport Railway Publishing House, 1941. (rus.).

24. Glazunov G.P., Kuznetsov M.S. *Erosion and soil protection : textbook*. Moscow, Moscow University Publishing House, 1996. (rus.).

25. Feofanova S.S., Zaykova E.Y. Perspectives of green infrastructure in the city's color design-code. *E3S Web of Conferences*. 2023; 458:07008. DOI: 10.1051/e3sconf/202345807008

26. Fil'ko A. Visual perception of the image of the city and methods of its research. *Urban Studies*. 2015; 3:1-15. DOI: 10.7256/2310-8673.2015.3.16497. EDN UIYGZL. (rus.).

27. Zaykova E.Yu. Healing landscapes in the multifunctional hybrid objects. *Proceedings of the Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering*. 2019; 347-355.

28. Zaykova E.Yu. Methods of integration of local plants into biotopes of industrial zones. *Advances in Modern Science*. 2017; 2(5):7-11. EDN YTAYJD. (rus.).

29. Zaykova E. Strategies ensuring the stability of natural and urbanized biotopes in hybrid multifunctional objects. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012065. DOI: 10.1088/1757-899x/1030/1/012065

30. Zaykova E.Yu. *Natural engineering framework of the city and landscape (historical background and principles of formation) : monograph*. Moscow, COURSE, 2023; 128. (rus.).

Received March 17, 2023.

Adopted in revised form on March 21, 2024.

Approved for publication on June 11, 2024.

B I O N O T E S : **Elena Yu. Zaykova** — Candidate of Architecture, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3019-6269, ORCID: 0000-0002-0555-9941; lena_landscape21@mail.ru;

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

Contribution of the authors:

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

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.046.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1274-1284

Анализ надежности конструкций стальных покрытий с использованием теории свидетельств

Сергей Александрович Соловьев¹, Александр Эдуардович Иньков¹,
Анастасия Андреевна Соловьева¹, Владимир Александрович Смирнов²

¹ Вологодский государственный университет (ВоГУ); г. Вологда, Россия

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Количественная оценка уровня надежности и безопасности конструктивных решений является актуальной научно-технической проблемой. Мерой надежности в таком случае может выступать вероятность отказа несущего элемента конструкции. В практических задачах оценки и анализа надежности строительных конструкций данные о случайных величинах могут быть получены в интервальной форме (качественная неопределенность), в то время как классические методы анализа надежности не позволяют произвести оценку надежности при наличии таких данных. Недостаток статистических данных (количественная неопределенность) также присутствует в практических задачах анализа надежности.

Материалы и методы. Рассмотрено использование теории свидетельств как эффективного инструмента для анализа надежности конструкций стальных покрытий в задачах с интервальной неопределенностью статистических данных.

Результаты. Приведена графическая интерпретация алгоритма анализа надежности, которая позволяет наглядно и оперативно получить оценку вероятности безотказной работы элемента покрытия, а также снизить допустимую нагрузку на элемент до требуемого уровня надежности. Исследованы двухмерные и трехмерные модели для анализа надежности стержня стальной фермы по критерию устойчивости.

Выводы. Теория свидетельств дает возможность эффективно моделировать различные источники неопределенностей в практических инженерных задачах. При ограниченной информации можно получить представление о количественном выражении уровня надежности по ее нижней оценке, которую можно увеличить за счет усиления элемента, более детального вероятностного анализа или ограничения эксплуатационной нагрузки на элемент. Учитывая большее количество недетерминированных величин в расчете, инженер получает более достоверное и осторожное решение. При учете площади поперечного сечения как случайной величины надежность стержня фермы по расчету на устойчивость оказалась на 23 % меньше (нижняя граница надежности), чем в аналогичном расчете с детерминированным значением.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теория свидетельств, надежность, ферма, интервальные данные, безопасность, вероятность отказа

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01035. URL: <https://rscf.ru/project/23-79-01035/>

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Соловьев С.А., Иньков А.Э., Соловьева А.А., Смирнов В.А. Анализ надежности конструкций стальных покрытий с использованием теории свидетельств // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1274–1284. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1274-1284

Автор, ответственный за переписку: Александр Эдуардович Иньков, inkovaie@vogu35.ru.

Structural reliability analysis of steel structural covering based on the theory of evidence

Sergey A. Solov'ev¹, Aleksandr E. In'kov¹, Anastasiya A. Solov'eva¹, Vladimir A. Smirnov²

¹ Vologda State University (VSU); Vologda, Russian Federation

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

ABSTRACT

Introduction. Quantitative assessment of the structural reliability and safety level for structural solutions is an actual scientific and technical problem. The measure of reliability in this case can be the failure probability of a structural element. In practice,

cal problems of assessment and analysis of structural reliability, data on random variables can be obtained in the interval form (qualitative uncertainty), while the classic methods of reliability analysis do not allow to estimate reliability in the presence of such data. Lack of statistical data (quantitative uncertainty) is also present in practical tasks of reliability analysis.

Materials and methods. The paper considers the use of the theory of evidence as an effective tool for reliability analysis of steel span structures in problems with interval uncertainty of statistical data.

Results. The graphical interpretation of the reliability analysis algorithm is given. It allows to obtain clearly and operatively an estimate of the failure probability of the structural element, as well as to reduce the permissible load on the element to the required reliability level. Two-dimensional and three-dimensional models are considered for analyzing the reliability of a steel truss bar according to the buckling criterion.

Conclusions. The theory of evidence allows effective modelling of various sources of uncertainties in practical engineering problems. Thus, with limited data, it is possible to get an idea of the quantitative expression of the reliability level by its lower bound, which can be increased by strengthening the element, more detailed probabilistic analysis or limiting the operational load on the structural element. By considering more non-deterministic quantities in the design, the engineer obtains a more cautious decision. When considering the cross-sectional area as a random variable, the reliability of the truss bar on the buckling was 23 % lower (lower reliability bound) than in a similar calculation with a deterministic value.

KEYWORDS: the theory of evidence, reliability, truss, interval data, safety, failure probability

Acknowledgements. The research was funded by Russian Science Foundation (RSF) No. 23-79-01035. URL: <https://rscf.ru/en/project/23-79-01035/>

FOR CITATION: Solov'ev S.A., In'kov A.E., Solov'eva A.A., Smirnov V.A. Structural reliability analysis of steel structural covering based on the theory of evidence. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1274-1284. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1274-1284 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr E. In'kov, inkovae@vogu35.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность строительного объекта — его свойство выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации. В соответствии с ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», надежность обеспечивается за счет выполнения требований (критериев) для всех учитываемых предельных состояний при действии наиболее неблагоприятных сочетаний расчетных нагрузок в течение расчетного срока службы. Метод оценки надежности строительного объекта при проектировании или эксплуатации называют полувероятностным: используются положения теории вероятностей на отдельных этапах (например, обоснование нормативной прочности) с последующим введением коэффициентов надежности. В результате такого анализа строительный объект будет находиться в категории «надежный» или «ненадежный», в то время как анализ более надежного объекта при прочих равных условиях, как правило, вызывает затруднение у проектировщика, особенно при анализе системы элементов.

Исследование надежности стальных ферм представляет особый интерес, так как с расчетной точки зрения отказ одного элемента фермы, как шарнирно-стержневой системы, приводит к незамедлительному отказу всей системы вследствие превращения ее в геометрически изменяемую систему. Преимуществом вероятностного подхода в анализе надежности элементов строительных конструкций является эффективное моделирование различных неопределенностей: нагрузок, размеров сечений элементов, физико-механических свойств материалов.

Неопределенности в задачах анализа надежности могут быть классифицированы на алеаторные и эпистемологические. Алеаторная (несокращаемая) неопределенность является свойством внутренней изменчивости объекта исследования

и не может быть уменьшена путем повышения точности измерительных приборов или увеличения числа контрольных образцов. Эпистемологическая неопределенность (сокращаемая) отражает наш уровень знаний о предмете исследования и может быть уменьшена путем испытаний дополнительных контрольных образцов, использованием более точных измерительных приборов или методик измерений, повышением уровня экспертных оценок и т.д.

При проектировании строительного объекта, как правило, приходится иметь дело лишь с алеаторной неопределенностью. Она может быть успешно смоделирована путем использования классических положений теории вероятностей и математической статистики, в том числе методами статистических испытаний Монте-Карло [1]. Проблемы исследования надежности в данном случае сводятся к выбору устойчивой математической модели (проблема инвариантности) [2], сокращению временных затрат путем введения метамоделей [3], выбору метода вероятностного анализа надежности [4].

При эксплуатации строительного объекта задача оценки и анализа надежности усложняется непрерывным присутствием двух типов неопределенности одновременно, где эпистемологическая неопределенность зачастую играет решающую роль. Например, данные испытаний контрольных образцов элементов строительных конструкций всегда ограничены по ряду причин: высокая стоимость отдельных испытаний, невозможность отбора неограниченного количества контрольных образцов из элемента и другие. Использование известных вероятностно-статистических методов в случае ограниченной статистической информации недопустимо в соответствии с ГОСТ 27751–2014. Принятие статистических гипотез без должного обоснования приводит к ошибкам в расчете надежности, нарастающим по мере сложности сооружения как технической системы.

Одно из современных направлений развития теории надежности строительных конструкций — использование новых теорий анализа данных для оценки надежности строительных конструкций в условиях неполной статистической информации. Широкое распространение получили методы расчета надежности строительных конструкций с помощью положений теории возможностей [5, 6], кригинга [7], теории выпуклых множеств [8]. Анализ надежности также может быть применим и к смежным инженерным проблемам, например вероятностной оценке энергоэффективности сооружений [9].

В данной работе предлагается рассмотреть использование положений теории свидетельств для анализа надежности эксплуатируемых стальных конструкций покрытий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теория свидетельств (также называемая теорией Демпстера – Шефера, теорией случайных множеств и теорией функций доверия [10]) была предложена в работе Артура Демпстера [11] в 1967 г., а затем развита в исследовании Гленна Шефера [12] в 1976 г. как инструмент моделирования и обработки неточных (интервальных) экспертных оценок, измерений или наблюдений.

Пусть Ω является множеством, которое в теории свидетельств носит название «универсальное множество» или «фрейм различий» (frame of discernment). Фрейм различий обычно состоит из набора взаимоисключающих элементарных суждений, который аналогичен пространству конечных выборок в теории вероятностей. Пусть элементы выборки из Ω — неточные, т.е. представляют некоторый интервал (подмножество) A значений Ω . Пусть c_i означает количество наблюдаемых подмножеств $A_i \subseteq \Omega$; $P(\Omega)$ — множество всех Ω . Тогда частотная функция m (basic probability assignment — ВРА), условно характеризующая величину «вероятности», которая может быть присвоена подмножеству A , определяется как:

$$\begin{cases} m(A) \geq 0 \text{ для } A \in \Omega; \\ m(\emptyset) = 0; \\ \sum_{A \in P(\Omega)} m(A) = 1, \end{cases}$$

где $\emptyset$ — пустое множество.

Если $m(A_i) \geq 0$, т.е. подмножество A_i в качестве результата измерения было получено хотя бы один раз, то A_i называется фокальным элементом.

Одним из ключевых инструментов в теории свидетельств являются функции доверия и правдоподобия, которые могут быть определены следующим образом:

$$\begin{cases} \text{Bel}(A) = \sum_{A_i: A_i \subseteq A} m(A_i); \\ \text{Pl}(A) = \sum_{A_i: A_i \cap A \neq \emptyset} m(A_i), \end{cases} \quad (1)$$

где $\text{Bel}(A)$ — функция доверия (belief function) для A ; $\text{Pl}(A)$ — функция правдоподобия (plausibility function) для A .

Согласно работе [11] базовая вероятность (ВРА) может быть определена как $m(A_i) = c_i/N$. Данное определение можно использовать лишь при большом числе измерений/наблюдений N .

В публикации [10] отмечается, что функции доверия и правдоподобия можно использовать в качестве нижней и верхней границ распределения вероятностей случайной величины, информация о которой дана в виде фокальных элементов A_i совместно с ненулевыми базовыми вероятностями $m(A_i) \geq 0$. Пусть Ω — подмножество действительных чисел, ограниченных значениями Ω_* и Ω^* . Тогда нижняя $\underline{F}(x)$ и верхняя $\overline{F}(x)$ граничные функции распределения вероятностей случайной величины X , о которой имеются данные в виде интервалов A_i , принимают вид:

$$\begin{cases} \underline{F}(x) = \underline{P}(\omega \leq x) = \begin{cases} \sum_{i: \sup A_i \leq x} \frac{c_i}{N}, & \text{при } x < \Omega^*, \\ 1, & \text{при } x < \Omega^*; \end{cases} \\ \overline{F}(x) = \overline{P}(\omega \leq x) = \begin{cases} \sum_{i: \inf A_i \leq x} \frac{c_i}{N}, & \text{при } x > \Omega_*, \\ 0, & \text{при } x = \Omega_*, \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

где ω — элементарный исход.

Эти функции распределения являются границами для всех возможных функций распределения, которые совместимы с исходными данными [10]. Данные функции могут рассматриваться в рамках аппарата p -блоков [13].

Информация для анализа надежности может быть получена из различных источников в соответствии с разными методиками, инструментами или экспертными оценками. Например, для оценки предела прочности стали могут быть отобраны контрольные образцы для лабораторных испытаний (количество которых ограничено, но оценка результата более весомая), а на самой конструкции проведена оценка прочности стали неразрушающими методами, например методом исследования твердости стали [14]. В результате будем иметь два источника информации с подмножеством интервальных значений.

Одно из самых известных правил комбинирования свидетельств — правило комбинирования Демпстера. Введем обозначения базовых вероятностей (ВРА) фокальных элементов, полученных из источников 1 и 2, в виде:

$$m_1(A_i^{(1)}) = c_i^{(1)}/N_1; \quad m_2(A_j^{(2)}) = c_j^{(2)}/N_2.$$

Тогда комбинированная базовая вероятность вычисляется по формуле:

$$m_{12}(A) = \frac{1}{1 - K} \sum_{A_i^{(1)} \cap A_j^{(2)} = A} m_1(A_i^{(1)}) m_2(A_j^{(2)}),$$

где $K = \sum_{A_i^{(1)} \cap A_j^{(2)} = \emptyset} m_1(A_i^{(1)})m_2(A_j^{(2)})$ — коэффициент конфликтности.

Пример 1. Комбинация свидетельств Демпстера. Пусть по результатам испытаний различными приборами и подходами поступили данные о прочности стали из двух лабораторий. В табл. 1 приведены данные в формате: $A_i^{(1)}$, МПа, m_i — информация из первого источника (горизонтальная строка) и аналогично $A_j^{(2)}$, МПа, m_j — информация из второго источника (вертикальная строка).

Коэффициент конфликтности (пустые клетки в таблице) равен:

$$K = \sum_{A_i^{(1)} \cap A_j^{(2)} = \emptyset} m_1(A_i^{(1)})m_2(A_j^{(2)}) = 0,3 \cdot 0,4 = 0,12.$$

Тем не менее к правилу комбинации свидетельств Демпстера следует относиться осторожно, поскольку его использование может давать некорректные результаты в случае большого количества противоречивых данных, так как вводится предположение о том, что источники абсолютно надежны, независимы и предоставляют верные сведения. Правило Демпстера «ищет» то общее, что имеется в обоих источниках, и «отбрасывает» все, что различается в них.

Для преодоления данного недостатка были разработаны альтернативные правила комбинирования свидетельств: правило дисконтирования Шефера, правило Ягера [15], параметрическое семейство правил комбинирования Инагаки [16] и другие [17].

Правило дисконтирования Шефера подразумевает оценку надежности источника умножени-

ем базовой вероятности на коэффициент $\alpha \in [0; 1]$. Также используются новые базовые вероятности $m^{\alpha}(A) = (1 - \alpha)m(A)$. Если $\alpha = 0$ — источник абсолютно надежен и $m^{\alpha}(A) = m(A)$, и напротив, если $\alpha = 1$ — источник является абсолютно ненадежным и $m^{\alpha}(A) = 0$. Чтобы сумма базовых вероятностей равнялась 1, при дисконтировании вводится базовая вероятность всего множества Ω , т.е. $m^{\alpha}(\Omega) = \alpha + (1 - \alpha)m(\Omega)$.

Пример 2. Правило дисконтирования Шефера. Поступила информация о прочности стали (табл. 2) аналогично прошлому примеру.

В данном случае

$$K = m_1(A_1^{(1)})m_2(A_1^{(2)}) + m_1(A_2^{(1)})m_2(A_1^{(2)}) = 0,7 \cdot 1 + 0,3 \cdot 1 = 1.$$

Получить оценку по правилу комбинирования Демпстера невозможно. Используем правило дисконтирования. Пусть первая лаборатория имеет больший экспертный вес и $\alpha_1 = 0,1$, вторая лаборатория меньший — $\alpha_2 = 0,9$, тогда:

$$m_1^{\alpha_1}(A_1^{(1)}) = (1 - \alpha_1) \cdot m_1(A_1^{(1)}) = 0,9 \cdot 0,7 = 0,63;$$

$$m_1^{\alpha_1}(A_2^{(1)}) = (1 - \alpha_1) \cdot m_1(A_1^{(1)}) = 0,9 \cdot 0,3 = 0,27;$$

$$m_1^{\alpha_1}(\Omega) = \alpha_1 = 0,1;$$

$$m_2^{\alpha_2}(A_1^{(2)}) = (1 - \alpha_2) \cdot m_2(A_1^{(2)}) = 0,1 \cdot 1 = 0,1;$$

$$m_2^{\alpha_2}(\Omega) = \alpha_2 = 0,9.$$

После этого правило комбинирования Демпстера работает и можно вычислить функции доверия и правдоподобия.

Табл. 1. Пример данных о прочности стали из двух лабораторий

Table 1. Example of steel strength data from two laboratories

Данные из двух лабораторий Steel strength data from two laboratories	$A_1^{(1)} = [240; 250]$ МПа / MPa, $m_1(A_1^{(1)}) = 0,3$	$A_2^{(1)} = [245; 255]$ МПа / MPa, $m_1(A_2^{(1)}) = 0,3$	$A_3^{(1)} = [240; 245]$ МПа / MPa, $m_1(A_3^{(1)}) = 0,4$
$A_1^{(2)} = [235; 246]$ МПа / MPa, $m_2(A_1^{(2)}) = 0,4$	[240; 246] МПа / MPa	[245, 246] МПа / MPa	[240; 245] МПа / MPa
$A_2^{(2)} = [230; 240]$ МПа / MPa, $m_2(A_2^{(2)}) = 0,4$	240 МПа / MPa	∅	240 МПа / MPa
$A_3^{(2)} = [240; 245]$ МПа / MPa, $m_2(A_3^{(2)}) = 0,4$	[240; 245] МПа / MPa	245 МПа / MPa	[240; 245] МПа / MPa

Табл. 2. Пример данных о прочности стали из двух лабораторий

Table 2. Example of steel strength data from two laboratories

Данные из двух лабораторий Steel strength data from two laboratories	$A_1^{(1)} = [240; 250]$ МПа / MPa, $m_1(A_1^{(1)}) = 0,7$	$A_2^{(1)} = [245; 255]$ МПа / MPa, $m_1(A_2^{(1)}) = 0,3$
$A_1^{(2)} = [235; 239]$ МПа / MPa, $m_2(A_1^{(2)}) = 1$	∅	∅

Правило комбинирования Ягера. Нововведением Ягера стала комбинированная «универсальная» вероятность q :

$$q(A) = \sum_{B \cap C = A} m_1(B)m_2(C),$$

где A — пересечение подмножеств $B \in Po(\Omega)$ и $C \in Po(\Omega)$.

Пусть $m_1, \dots, m_n$ — базовые вероятности n источников данных и F_i — множество фокальных элементов, соответствующих i -му источнику данных; $A_i^{(k)}$ — один из элементов F_i . Правило комбинирования определяется как:

$$q(A) = \sum_{A_i^{(1)} \cap A_j^{(2)} \cap \dots \cap A_k^{(n)} = A} m_1(A_i^{(1)})m_2(A_j^{(2)}) \dots m_n(A_k^{(n)}).$$

Коэффициент конфликтности отсутствует, но есть комбинированная вероятность пустого множества, которая рассчитывается точно так же:

$$q(\emptyset) = \sum_{A_i^{(1)} \cap A_j^{(2)} = \emptyset} m_1(A_i^{(1)})m_2(A_j^{(2)}).$$

Комбинированная базовая вероятность вычисляется как:

$$m_{Yag}(\Omega) = q(\Omega) + q(\emptyset).$$

Параметр $m_{Yag}(\Omega)$ может обозначать степень незнания, неопределенность. Базовые вероятности для других множеств определяются как:

$$m_{Yag}(\emptyset) = 0, m_{Yag}(A) = q(A), A \neq \emptyset, A \neq \Omega.$$

Пример 3. Правило комбинирования Ягера. Рассмотрим данные из первого примера. Так как $q(\emptyset)$ вычисляется абсолютно так же, как коэффициент конфликтности в правиле Демпстера, то $q(\emptyset) = 0,12$. Тогда функции доверия и правдоподобия для значе-

ния прочности 245 МПа будут такими:

$$\begin{aligned} Bel(245 \text{ МПа}) &= m_{Yag}(245 \text{ МПа}) = \\ &= q(245 \text{ МПа}) = m_1(A_2^{(1)})m_2(A_3^{(2)}) = \\ &= 0,3 \cdot 0,4 = 0,12; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pl(245 \text{ МПа}) &= m_{Yag}(245 \text{ МПа}) + m_{Yag}(\emptyset) = \\ &= 0,12 + 0,12 = 0,24. \end{aligned}$$

Рассмотрим вариант использования теории свидетельств для анализа надежности элементов строительных конструкций. Пусть имеется математическая модель предельного состояния в виде:

$$g(X,Y) = Y - X \geq 0, \tag{3}$$

где X — характеристика нагрузки; Y — характеристика несущей способности.

Если случайные величины и представлены фокальными элементами с базовыми вероятностями, то для двухмерного случая может быть получено графическое решение (рис. 1).

Пусть для несущей способности Y и для прочности X получено по 5 фокальных элементов с соответствующими базовыми вероятностями. В соответствии с правилом комбинирования свидетельств можно получить 25 фокальных элементов для функции предельного состояния $g(X,Y) = Y - X \geq 0$, где каждый фокальный элемент будет иметь соответствующую базовую вероятность. Например, по рис. 1:

$$m(A_1) = m(A_1^Y) \cdot m(A_1^X).$$

Вероятность реализации события $g(X,Y) < 0$ (вероятность отказа или вероятность превышения предельного состояния) можно интерпретировать через функции доверия и правдоподобия, как было отмечено выше. Если поверхность отказа (3) проходит через фокальный элемент или полностью его отсекает от области безопасности (оранжевые и красные элементы

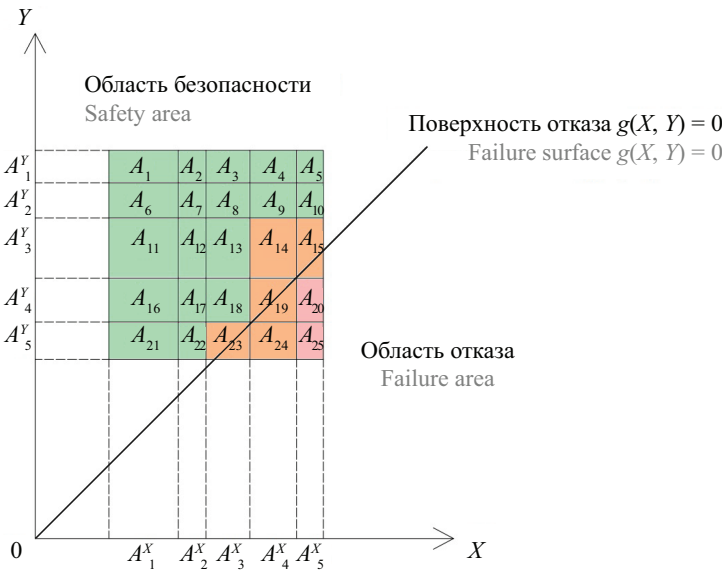


Рис. 1. Графический способ оценки надежности с использованием теории свидетельств

Fig. 1. Graphical method for assessing reliability using the theory of evidence

на рис. 1), то данный фокальный элемент принадлежит к функции доверия $Bel(g)$. Если поверхность отказа только отсекает элемент от области безопасности (красные элементы на рис. 1), то фокальный элемент принадлежит к функции правдоподобия $Pl(g)$.

Из рис. 1 видно, что вероятность отказа через функцию доверия (1) может быть вычислена как:

$$Bel(q) = m(A_{14}) + m(A_{15}) + m(A_{19}) + m(A_{20}) + m(A_{23}) + m(A_{24}) + m(A_{25}),$$

а через функцию правдоподобия (1) так:

$$Pl(g) = m(A_{20}) + m(A_{25}).$$

Тогда значение надежности (в показателе вероятности безотказной работы) может быть вычислено в интервальной форме следующим образом:

$$\begin{cases} \underline{P} = 1 - Bel(g); \\ \overline{P} = 1 - Pl(g). \end{cases} \tag{4}$$

Как было отмечено выше, зачастую данные испытаний могут быть неполными. Для более достоверной оценки надежности в работе [10] предлагается использовать расширенные функции доверия и правдоподобия на основе применения обобщенной модели Дирхле как одного из видов робастных моделей. В этом

случае верхнюю и нижнюю границы вероятности безотказной работы можно записать в виде:

$$\begin{aligned} P(A | c, s) &= \frac{N \cdot Bel(A)}{N + s} = \chi Bel(A) \text{ и} \\ \overline{P}(A | c, s) &= \frac{N \cdot Pl(A) + s}{N + s} = 1 - \chi [1 - Pl(A)], \end{aligned} \tag{5}$$

где N — число испытаний (наблюдений); s — параметр, характеризующий меру засорения, значением которого задаются, где введено обозначение $\chi = (1 + s/N)^{-1}$ и $\chi \in [0; 1]$.

Параметр меры засорения следует устанавливать из накопления эмпирических данных. В исследовании [18] рекомендуется назначать $s = 2$ для наиболее осторожного решения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пусть необходимо оценить надежность элемента 3–5 фермы с расчетной схемой по рис. 2.

Для сокращения объема статьи приведем математическую модель предельного состояния стержня 3–5 по критерию устойчивости в виде [19]:

$$g(\tilde{\sigma}_{s,ult}, \tilde{N}) = \tilde{\sigma}_{s,ult} \cdot A \cdot \left(1,003 - \lambda^2 \frac{\tilde{\sigma}_{s,ult}}{E}\right) - \tilde{N} \geq 0, \tag{6}$$

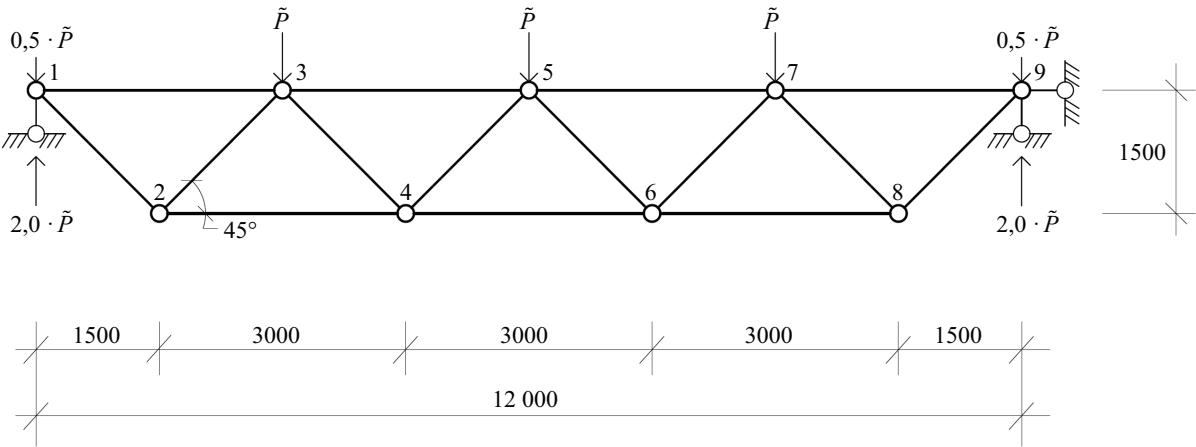


Рис. 2. Расчетная схема фермы
Fig. 2. Design diagram of the truss

Табл. 3. Исходные данные, плоский случай
Table 3. Input data, flat case

Данные о нагрузке элемента Element load data		Данные о прочности стали Steel strength data	
$A_{N,i}$, кН / kN	$m(A_{N,i})$	$A_{\sigma,i}$, МПа / MPa	$m(A_{\sigma,i})$
[207, 208]	0,05	[255, 260]	0,03
[208, 209]	0,05	[260, 265]	0,07
[209, 210]	0,20	[265, 270]	0,25
[210, 211]	0,35	[270, 275]	0,35
[211, 212]	0,30	[275, 280]	0,25
[212, 213]	0,05	[280, 285]	0,05

где $\tilde{\sigma}_{s,ult}$ — предел прочности стали (может быть принят как предел текучести); $\tilde{N}$ — усилие сжатия в элементе; A — площадь поперечного сечения стержня; λ — гибкость элемента; E — модуль упругости стали.

Пусть в результате испытаний и экспертной оценки были получены следующие фокальные элементы с базовыми вероятностями (табл. 3).

Также пусть известно, что сечение стержня $80 \times 80 \times 5$ по ГОСТ 30245–2012 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций» с параметрами: $A = 14,36 \text{ см}^2$, $i_x = 3,02 \text{ см}$.

По рис. 3 видно, что вероятность отказа через функцию доверия может быть вычислена как:

$$\begin{aligned} \text{Bel}(g) = & m(A_1) + m(A_2) + m(A_3) + m(A_7) + \\ & + m(A_8) + m(A_{13}) = 0,05 \cdot 0,03 + 0,05 \cdot 0,07 + \\ & + 0,05 \cdot 0,25 + 0,30 \cdot 0,03 + 0,30 \cdot 0,07 + \\ & + 0,35 \cdot 0,03 = 0,0580, \end{aligned}$$

а через функцию правдоподобия как:

$$\text{Pl}(g) = m(A_1) = 0,05 \cdot 0,03 = 0,0015.$$

Исходя из формулы (4), надежность стержня может быть представлена в виде интервала значений $P \in [1 - 0,0580; 1 - 0,0015] = [0,9420; 0,9985]$.

Данный расчет действителен и для статически неопределимых конструкций. Решив задачу методом сил в аналитической форме, можно выразить усилие в стержне через функцию от нагрузки, после чего решение сведется к указанному выше алгоритму.

Рассмотрим случай с тремя случайными величинами. В исходных данных площадь сечения также будет представлена фокальными элементами с базовыми вероятностями (табл. 4).

Решение может быть представлено в трехмерном виде (рис. 4).

Расчет надежности также можно выполнить графическим методом. Поверхность отказа — синяя криволинейная поверхность, оранжевые и красные

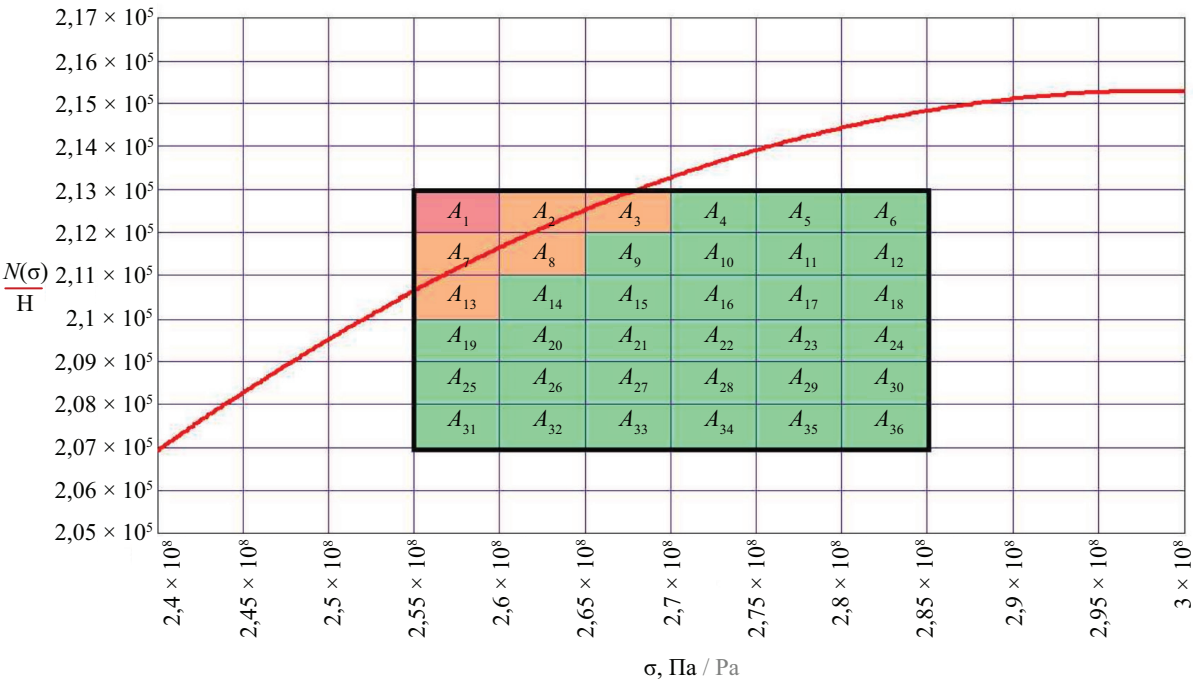


Рис. 3. Графический способ определения надежности для численного примера для двухмерного случая

Fig. 3. Graphical method for determining reliability for the numerical example for a two-dimensional case

Табл. 4. Исходные данные, трехмерный случай

Table 4. Input data, three-dimensional case

Данные о нагрузке элемента Element load data		Данные о прочности стали Steel strength data		Данные о площади сечения элемента Element cross-sectional area data	
$A_{N,i}$, кН / kN	$m(A_{N,i})$	$A_{\sigma,i}$, МПа / MPa	$m(A_{\sigma,i})$	$A_{A,i}$, см² / cm²	$m(A_{A,i})$
[207, 208]	0,05	[255, 260]	0,03	[12,69; 13,85]	0,01
[208, 209]	0,05	[260, 265]	0,07	[13,85; 14,11]	0,02
[209, 210]	0,20	[265, 270]	0,25	[14,11; 14,36]	0,20
[210, 211]	0,35	[270, 275]	0,35	[14,36; 14,54]	0,55
[211, 212]	0,30	[275, 280]	0,25	[14,54; 14,84]	0,20
[212, 213]	0,05	[280, 285]	0,05	[14,84; 15,52]	0,02

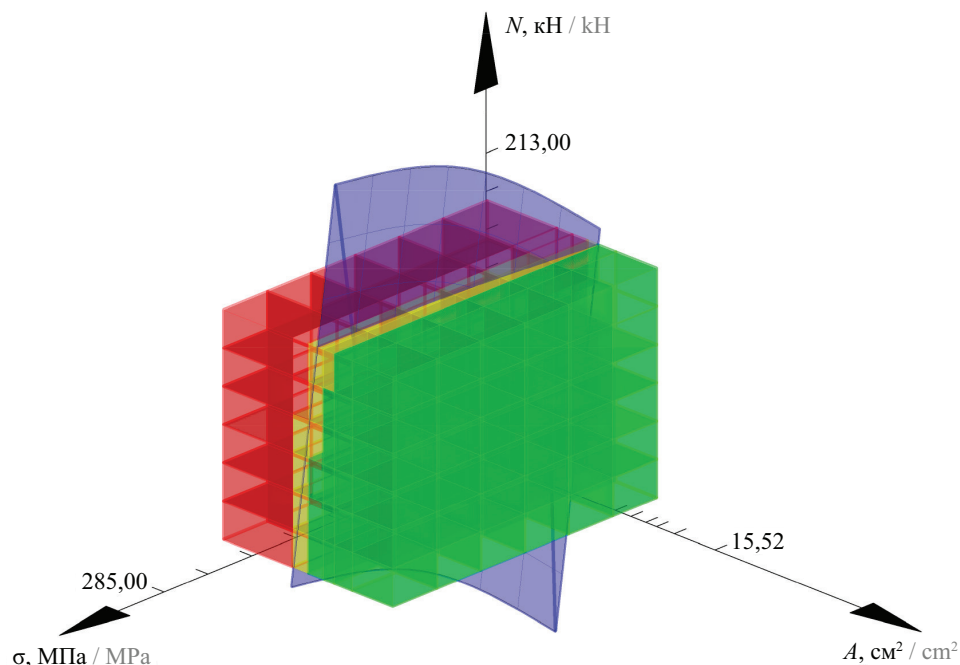


Рис. 4. Графический способ определения надежности для численного примера для трехмерного случая

Fig. 4. Graphical method for determining reliability for a numerical example for a three-dimensional case

фокальные элементы принадлежат функции доверия $Bel(g)$, красные элементы принадлежат функции правдоподобия $Pl(g)$.

Для данного расчетного случая получилось: $Bel(g) = 0,278$, $Pl(g) = 0,02$, надежность стержня $P \in [1 - 0,278; 1 - 0,020] = [0,722; 0,980]$.

При необходимости анализа надежности с четырьмя и более случайными величинами могут быть использованы более комплексные алгоритмы анализа надежности [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективным инструментом исследования надежности в практических инженерных задачах является теория свидетельств (теория Демпстера – Шефера), так как она позволяет математически обоснованно оценивать границы вероятности безотказной работы при интервальной оценке малой выборки случайных величин и с различными источниками неопределенности данных, в то время как анализ классическими вероятностно-статистическими методами становится невозможен.

При использовании теории свидетельств необходимо подбирать корректное для расчетного случая

правило комбинирования свидетельств, что позволит получить более достоверную оценку надежности. Дополнительным преимуществом теории свидетельств является возможность комбинации оценок случайной величины, полученных по различным методикам, различными инструментами и экспертами.

Результат расчета надежности представлен в интервальной форме вследствие необходимости моделирования эпистемологической неопределенности данных. Повышение количества и качества статистической информации позволит получить более узкий (информативный) интервал оценки надежности. Тем не менее даже при ограниченной информации можно получить представление о границе надежности по ее нижней оценке, которую можно увеличить за счет усиления элемента, более детального вероятностного обследования или ограничения эксплуатационной нагрузки на элемент.

Учитывая большее количество недетерминированных величин в расчете, инженер получает более достоверное и осторожное решение. При учете площади сечения как случайной величины надежность стержня по расчету на устойчивость оказалась на 23 % меньше (нижняя граница надежности), чем в аналогичном расчете с детерминированным значением.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Keshtegar B., Kisi O. M5 model tree and Monte Carlo simulation for efficient structural reliability analysis // *Applied Mathematical Modelling*. 2017. Vol. 48. Pp. 899–910. DOI: 10.1016/j.apm.2017.02.047

2. De Angelis M., Patelli E., Beer M. Advanced line sampling for efficient robust reliability analysis // *Structural Safety*. 2015. Vol. 52. Pp. 170–182. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.10.002

3. *Teixeira R., Nogal M., O'Connor A.* Adaptive approaches in metamodel-based reliability analysis : a review // *Structural Safety*. 2021. Vol. 89. P. 102019. DOI: 10.1016/j.strusafe.2020.102019
4. *Qiu Z., Huang R., Wang X., Qi W.* Structural reliability analysis and reliability-based design optimization: Recent advances // *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*. 2013. Vol. 56. Issue 9. Pp. 1611–1618. DOI: 10.1007/s11433-013-5179-1
5. *Huang H.Z., He L., Liu Y., Xiao N.C., Li Y.F., Wang Z.* Possibility and evidence-based reliability analysis and design optimization // *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2013. Vol. 6. Issue 1. Pp. 95–136. DOI: 10.3844/ajeassp.2013.95.136
6. *Соловьев С.А., Инькова Ю.А., Соловьева А.А.* Вероятностная оценка надежности деревянных стропильных конструкций при неполной статистической информации // *Региональная архитектура и строительство*. 2023. № 2 (55). С. 77–84. DOI: 10.54734/20722958_2023_2_77. EDN CTLCMJ.
7. *Jian W., Zhili S., Qiang Y., Rui L.* Two accuracy measures of the Kriging model for structural reliability analysis // *Reliability Engineering & System Safety*. 2017. Vol. 167. Pp. 494–505. DOI: 10.1016/j.res.2017.06.028
8. *Jiang C., Bi R.G., Lu G.Y., Han X.* Structural reliability analysis using non-probabilistic convex model // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2013. Vol. 254. Pp. 83–98. DOI: 10.1016/j.cma.2012.10.020
9. *Pavlov M.V., Karpov D.F., Sinitsyn A.A., Gudkov A.G.* Winter greenhouse combined heating system // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. № 3 (95). Pp. 131–139. DOI: 10.18720/MCE.95.12. EDN LVTHOB.
10. *Уткин Л.В.* Анализ риска и принятие решений при неполной информации : монография. СПб. : Наука, 2007. EDN QJTBEZ.
11. *Dempster A.P.* Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping // *Classic works of the Dempster-Shafer theory of belief functions*. 2008. Pp. 57–72. DOI: 10.1007/978-3-540-44792-4_3
12. *Shafer G.* A mathematical theory of evidence. Princeton University Press, 1976. DOI: 10.1515/9780-691214696
13. *Соловьев С.А., Соловьева А.А.* Методы оценки надежности стальных ферм с использованием Р-блоков. Вологда : Вологодский государственный университет, 2022. 143 с. EDN YRCEMR.
14. *Улыбин А.В., Султеев Т.М., Давыдов О.И., Богачев А.С.* Оценка класса прочности болтов по измерению твердости стали // *Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения : мат. VI Междунар. науч.-практ. конференции*. 2015. С. 172–178. EDN UYTGMX.
15. *Yager R.R.* On the Dempster-Shafer framework and new combination rules // *Information Sciences*. 1987. Vol. 41. Issue 2. Pp. 93–137. DOI: 10.1016/0020-0255(87)90007-7
16. *Inagaki T.* Interdependence between safety-control policy and multiple-sensor schemes via Dempster-Shafer theory // *IEEE Transactions on Reliability*. 1991. Vol. 40. Issue 2. Pp. 182–188. DOI: 10.1109/24.87125
17. *Sentz K., Ferson S.* Combination of evidence in Dempster-Shafer theory. 2002. DOI: 10.2172/800792
18. *Bernard J.M.* Analysis of Local or Asymmetric Dependencies in Contingency Tables using the Imprecise Dirichlet Model // *Proceedings of the Third International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications*. 2003.
19. *Соловьев С.А., Иньков А.Э., Соловьева А.А.* Метод расчета надежности шарнирно-стержневых систем при интервальной оценке случайных величин // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2022. № 3 (302). С. 28–34. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.3.28.34. EDN IYURCQ.
20. *Jiang C., Zhang Z., Han X., Liu J.* A novel evidence-theory-based reliability analysis method for structures with epistemic uncertainty // *Computers & Structures*. 2013. Vol. 129. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.compstruc.2013.08.007

Поступила в редакцию 22 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 17 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 6 мая 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Александрович Соловьев** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Инженерно-строительный институт; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000 г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 821778, Scopus: 57215081781, ResearcherID: AAJ-1708-2020, ORCID: 0000-0001-7083-7963; solovevsa@vogu35.ru;

Александр Эдуардович Иньков — аспирант, преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Инженерно-строительный институт; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000 г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 1148205, Scopus: 58286195500, ResearcherID: AGO-6637-2022, ORCID: 0000-0002-7034-8606; inkovae@vogu35.ru;

Анастасия Андреевна Соловьева — аспирант, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Инженерно-строительный институт; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 1090512, Scopus: 57223210877, ResearcherID: ABG-1982-2021, ORCID: 0000-0002-5285-5882; soloveva@vogu35.ru;

Владимир Александрович Смирнов — кандидат технических наук, доцент кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 635890, Scopus: 57200044361, ResearcherID: N-6846-2016, ORCID: 0000-0001-5679-9542; belohvost@list.ru.

Вклад авторов:

Соловьев С.А. — научное руководство, концепция исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Иньков А.Э. — доработка текста, составление схем и рисунков, расчеты, итоговые выводы.

Соловьева А.А. — доработка текста, подбор литературы, итоговые выводы.

Смирнов В.А. — доработка текста, подбор литературы, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Keshtegar B., Kisi O. M5 model tree and Monte Carlo simulation for efficient structural reliability analysis. *Applied Mathematical Modelling*. 2017; 48:899-910. DOI: 10.1016/j.apm.2017.02.047
2. De Angelis M., Patelli E., Beer M. Advanced line sampling for efficient robust reliability analysis. *Structural Safety*. 2015; 52:170-182. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.10.002
3. Teixeira R., Nogal M., O'Connor A. Adaptive approaches in metamodel-based reliability analysis : a review. *Structural Safety*. 2021; 89:102019. DOI: 10.1016/j.strusafe.2020.102019
4. Qiu Z., Huang R., Wang X., Qi W. Structural reliability analysis and reliability-based design optimization: Recent advances. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*. 2013; 56(9):1611-1618. DOI: 10.1007/s11433-013-5179-1
5. Huang H.Z., He L., Liu Y., Xiao N.C., Li Y.F., Wang Z. Possibility and evidence-based reliability analysis and design optimization. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2013; 6(1):95-136. DOI: 10.3844/ajeassp.2013.95.136
6. Solovev S.A., Inkova Yu.A., Soloveva A.A. Probabilistic assessment of wooden rafters structural reliability with incomplete statistical data. *Regional Architecture and Engineering*. 2023; 2(55):77-84. DOI: 10.54734/20722958_2023_2_77. EDN CTLCMJ. (rus.).
7. Jian W., Zhili S., Qiang Y., Rui L. Two accuracy measures of the Kriging model for structural reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2017; 167:494-505. DOI: 10.1016/j.ress.2017.06.028
8. Jiang C., Bi R.G., Lu G.Y., Han X. Structural reliability analysis using non-probabilistic convex model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2013; 254:83-98. DOI: 10.1016/j.cma.2012.10.020
9. Pavlov M.V., Karpov D.F., Sinitsyn A.A., Gudkov A.G. Winter greenhouse combined heating system. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 3(95):131-139. DOI: 10.18720/MCE.95.12. EDN LVTHOB.
10. Utkin L.V. *Risk analysis and decision making with incomplete information*. St. Petersburg, Nauka, 2007. EDN QJTBEZ. (rus.).
11. Dempster A.P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *Classic works of the Dempster-Shafer theory of belief functions*. 2008; 57-72. DOI: 10.1007/978-3-540-44792-4_3
12. Shafer G. *A mathematical theory of evidence*. Princeton University Press, 1976. DOI: 10.1515/9780-691214696
13. Solov'yev S. A., Solov'yeva A.A. *Methods for assessing the reliability of steel trusses using P-boxes*. Vologda, Vologda State University, 2022; 143. EDN YRCEMR. (rus.).
14. Ulybin A.V., Sulteev T.M., Davydov O.I., Bogachev A.S. The evaluation of bolts strength using hardness measurement. *Inspection of buildings and structures: problems and ways to solve them : materials of the VI International Scientific and Practical Conference*. 2015; 172-178. EDN UYTGMX. (rus.).
15. Yager R.R. On the Dempster-Shafer framework and new combination rules. *Information Sciences*. 1987; 41(2):93-137. DOI: 10.1016/0020-0255(87)90007-7
16. Inagaki T. Interdependence between safety-control policy and multiple-sensor schemes via Dempster-Shafer theory. *IEEE Transactions on Reliability*. 1991; 40(2):182-188. DOI: 10.1109/24.87125
17. Sentz K., Ferson S. *Combination of evidence in Dempster-Shafer theory*. 2002. DOI: 10.2172/800792
18. Bernard J.M. Analysis of local or asymmetric dependencies in contingency tables using the imprecise dirichlet model. *Proceedings of the Third International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications*. 2003.
19. Solovev S.A., Inkov A.E., Soloveva A.A. A method for structural reliability analysis of trusses with interval uncertainty of random variables. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2022; 3(302):28-34. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.3.28.34. EDN IYURCQ. (rus.).
20. Jiang C., Zhang Z., Han X., Liu J. A novel evidence-theory-based reliability analysis method for structures with epistemic uncertainty. *Computers & Structures*. 2013; 129:1-12. DOI: 10.1016/j.compstruc.2013.08.007

Received February 22, 2024.

Adopted in revised form on April 17, 2024.

Approved for publication on May 6, 2024.

B I O N O T E S : **Sergey A. Solov'ev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor in the Department of Industrial and Civil Construction, Institute of Civil Engineering; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenina st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RSCI: 821778, Scopus: 57215081781, ResearcherID: AAJ-1708-2020, ORCID: 0000-0001-7083-7963; solovevsa@vogu35.ru;

Aleksandr E. In'kov — postgraduate student, lecturer in the Department of Industrial and Civil Construction, Institute of Civil Engineering; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenina st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RSCI: 1148205, Scopus: 58286195500, ResearcherID: AGO-6637-2022, ORCID: 0000-0002-7034-8606; inkovae@vogu35.ru;

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

Vladimir A. Smirnov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural and Technical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 635890; Scopus: 57200044361, ResearcherID: N-6846-2016, ORCID: 0000-0001-5679-9542; belohvost@list.ru.

Contribution of the authors:

Sergey A. Solov'ev — scientific guidance, research concept, writing the original text, final conclusions.

Aleksandr E. In'kov — revision of the text, drawing up diagrams and drawings, calculations, final conclusions.

Anastasiya A. Solov'eva — revision of the text, selection of literature, final conclusions.

Vladimir A. Smirnov — revision of the text, selection of literature, final conclusions.

The authors declare that they have no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.048

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1285-1300

Оценка целесообразности учета податливости узлов металлических конструкций аутригера при расчете конструкций высотного здания

Иван Витальевич Астахов, Денис Вадимович Калюжный

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

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании металлических конструкций учитывают множество факторов, включая податливость узлов, что влияет на результаты расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции. При проектировании высотных зданий предусматривают аутригеры, распределяющие ветровую нагрузку между ядром жесткости и периметральными колоннами каркаса, снижая горизонтальные перемещения. Учет податливости в узлах аутригера оказывает влияние на распределение усилий в элементах конструкций здания, а также на деформации здания. Представлен анализ влияния учета податливости узлов аутригера на НДС элементов стальных конструкций высотного здания.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования принята расчетная схема 60-этажного здания с аутригером, смоделированная в расчетном комплексе ETABS. Податливость узлов конструкций аутригера определялась с использованием программного комплекса IDEA StatiCa.

Результаты. По результатам статического расчета с учетом податливости узлов аутригера при постановке одного аутригера на 54 этаже максимальное горизонтальное перемещение верха здания увеличилось на 2,9 % по сравнению с результатами расчета без учета податливости. При постановке двух аутригеров увеличилось на 4,7 %. Максимальное значение продольной силы в раскосе аутригера снизилось на 23 % по сравнению с результатами без учета податливости, а максимальное значение изгибающего момента увеличилось на 10 %.

Выводы. При расчете высотного здания с учетом податливости значения горизонтального перемещения верха здания увеличиваются в пределах 5 %. Если при проектировании необходимо ограничить горизонтальные перемещения здания, то следует выполнять расчет с учетом податливости узлов металлических конструкций аутригера. Кроме того, учет податливости при расчете позволяет снизить металлоемкость проектируемых раскосов аутригера, так как определяющим усилием является продольная сила, которая при расчете с учетом податливости уменьшается в пределах 25 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: податливость, узлы конструкций аутригера, высотные здания, НДС узлов, полужесткие соединения, уточнение расчетной схемы, деформации, напряжения, численное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Астахов И.В., Калюжный Д.В. Оценка целесообразности учета податливости узлов металлических конструкций аутригера при расчете конструкций высотного здания // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1285–1300. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1285-1300

Автор, ответственный за переписку: Денис Вадимович Калюжный, kaliuzhnydv@gmail.com.

Estimation of expediency of taking into account the suppleness of outrigger metallic structures nodes in calculation of high-rise building structures

Ivan V. Astakhov, Denis V. Kalyuzhny

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

ABSTRACT

Introduction. When designing metal structures, many factors are taken into account, including the suppleness of joints, which affects the results of stress-strain calculations of structural elements. In the design of high-rise buildings, outriggers are provided to distribute wind loads between the core and perimeter columns, reducing horizontal displacements. Considering the suppleness in the joints of the outrigger affects the distribution of forces in the building structure elements, as well as on the building deformations. This paper presents an analysis of the influence of considering the suppleness of outrigger joints on the stress-strain state of structural elements of a steel high-rise building.

Materials and methods. The research focuses on a structural model of a 60-story building with an outrigger, modelled using the ETABS software. The suppleness of the joints of the outrigger structures was determined using the IDEA StatiCa software.

Results. According to the results of static calculations considering the suppleness of the outrigger joints, when placing one outrigger on the 54th floor, the maximum horizontal displacement at the top of the building increased by 2.9 % compared to calculations without considering suppleness. Placing two outriggers increased it by 4.7 %. The maximum axial force value in the outrigger brace decreased by 23 % compared to calculations without considering suppleness, while the maximum bending moment increased by 10 %.

Conclusions. When calculating a high-rise building taking into account suppleness, the values of horizontal displacement at the building's top increase within 5 %. If it is necessary to limit horizontal displacements, calculations should consider the suppleness of the joints in steel outrigger structures. Additionally, considering suppleness in calculations allows reducing the material intensity of the designed outrigger braces, as the determining force is the axial force, which decreases by about 25 % when calculated considering suppleness.

KEYWORDS: suppleness, outrigger structure joints, high-rise buildings, joint behaviour factors, semi-rigid connections, refined analysis model, deformations, stress, numerical modelling

FOR CITATION: Astakhov I.V., Kalyuzhny D.V. Estimation of expediency of taking into account the suppleness of outrigger metallic structures nodes in calculation of high-rise building structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1285-1300. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1285-1300 (rus.).

Corresponding author: Denis V. Kalyuzhny, kaliuzhnydv@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

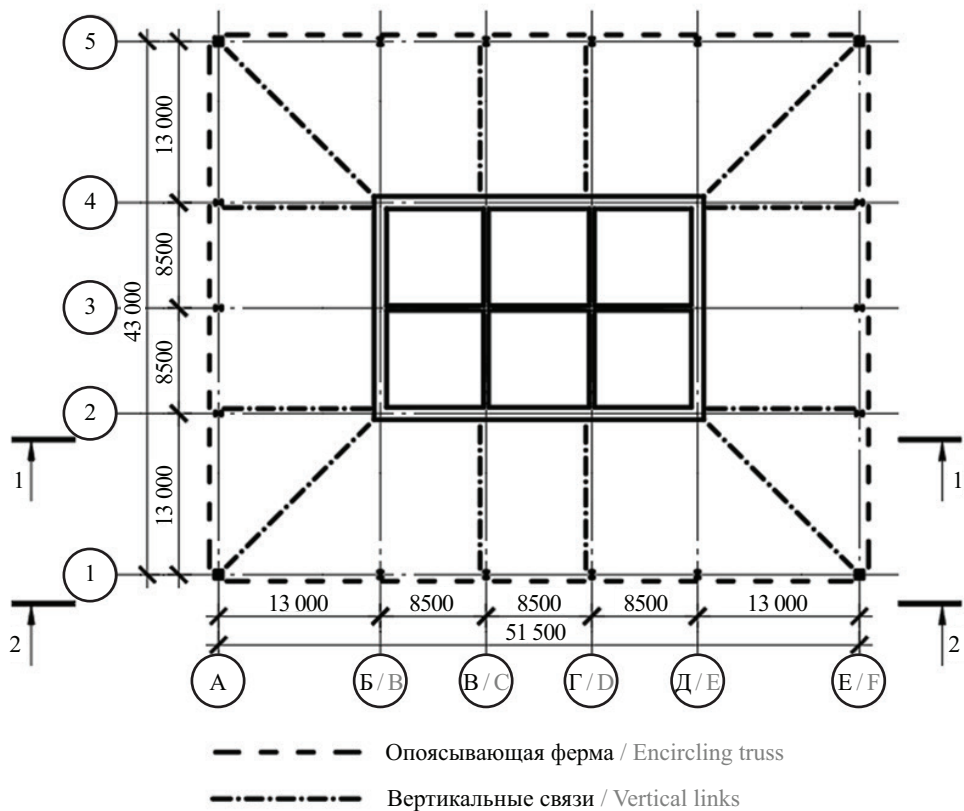
На работу металлических конструкций влияет множество факторов. Один из них — податливость узлов, в результате учета которой происходит перераспределение усилий в элементах расчетной схемы.

Еще в 1938–1940 гг. Е.И. Беленья при проведении экспериментально-теоретического исследования поперечной рамы получил различия экспериментальных изгибающих моментов в месте сопряжения ригеля с колонной на 20–22 % по сравнению с результатами теоретического расчета [1]. Деформации основания были незначительны, поэтому основной причиной перераспределения усилий является податливость узлов сопряжения риге-

ля с колоннами, которые при расчете принимались жесткими.

В 1990 г. был разработан экспериментально-теоретический метод определения податливости узлов для уточнения расчетных схем рам эксплуатируемых промышленных зданий [2]. Метод основан на специальных тестовых испытаниях и программе для определения податливости узлов рамных конструкций. При сопоставлении значений изгибающих моментов, полученных при расчете без учета податливости и с учетом выявленной из тестовых испытаний податливости узлов, обнаружена существенная разница расчетных усилий.

На сегодняшний день проведено множество исследований, посвященных уточнению расчетной



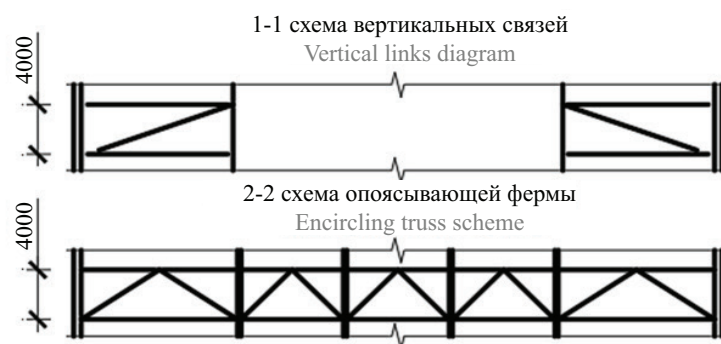


Рис. 1. Схема расположения элементов аутригера

Fig. 1. Outrigger element layout scheme

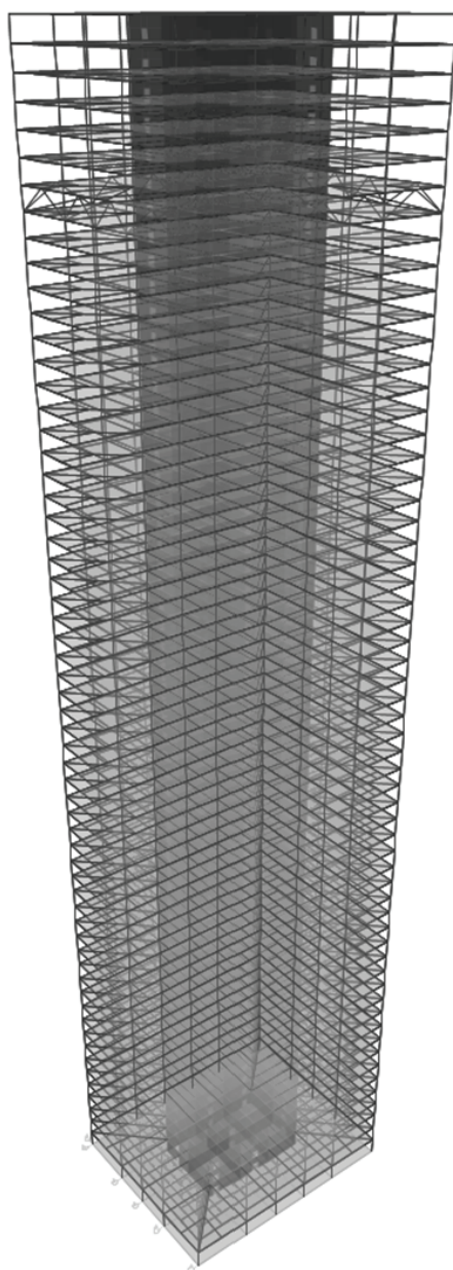


Рис. 2. Расчетная схема объекта исследования, заданная в расчетном комплексе ETABS

Fig. 2. Analytical scheme of the research object defined in the analysis software ETABS

схемы реальной работы узлов различных конструкций [3–23]. Однако для конструкций высотных зданий учет податливости узлов еще недостаточно исследован.

При проектировании высотных зданий большой этажности предусматриваются горизонтальные пояса жесткости — аутригеры [24], которые распределяют ветровую нагрузку между ядром жесткости здания и периметральными колоннами, снижая горизонтальные перемещения. Конструкция аутригера может включать более 40 узлов, жесткость которых влияет на распределение ветровой нагрузки и, как следствие, на горизонтальные перемещения здания.

В исследовании [24] определялось рациональное расположение аутригера по высоте в конструкциях высотных зданий различной этажности. Получены зависимости горизонтальных перемещений верха от положения одного и двух аутригеров для зданий различной этажности. Установлено, что значительное снижение горизонтальных перемещений в зданиях этажностью более 50 (выше 200 м) достигается расположением аутригера на расстоянии 5/6–13/14 высоты здания.

В данной статье представлен анализ влияния учета податливости узлов аутригера на напряженно-деформированное состояние элементов стальных конструкций высотного здания, расчетная схема которого использовалась в исследовании [24]. Выполнена оценка целесообразности учета податливости при проектировании высотных зданий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Конструктивная схема здания принята каркасно-ствольной в соответствии со схемой, использованной в исследовании [24]. В качестве объекта исследования принята расчетная схема высотного 60-этажного здания с аутригером (рис. 1). Форма здания в плане — прямоугольная, $51,5 \times 43$ м. Высота этажа — 4 м. Высота здания — 240 м. Ядро жесткости — железобетонное, толщина наружных стен ядра изменяется от 0,4 до 1,0 м, класс бетона — В25, В35. Толщина внутренних стен ядра — 0,4 м. Периметральные колонны каркаса стальные,

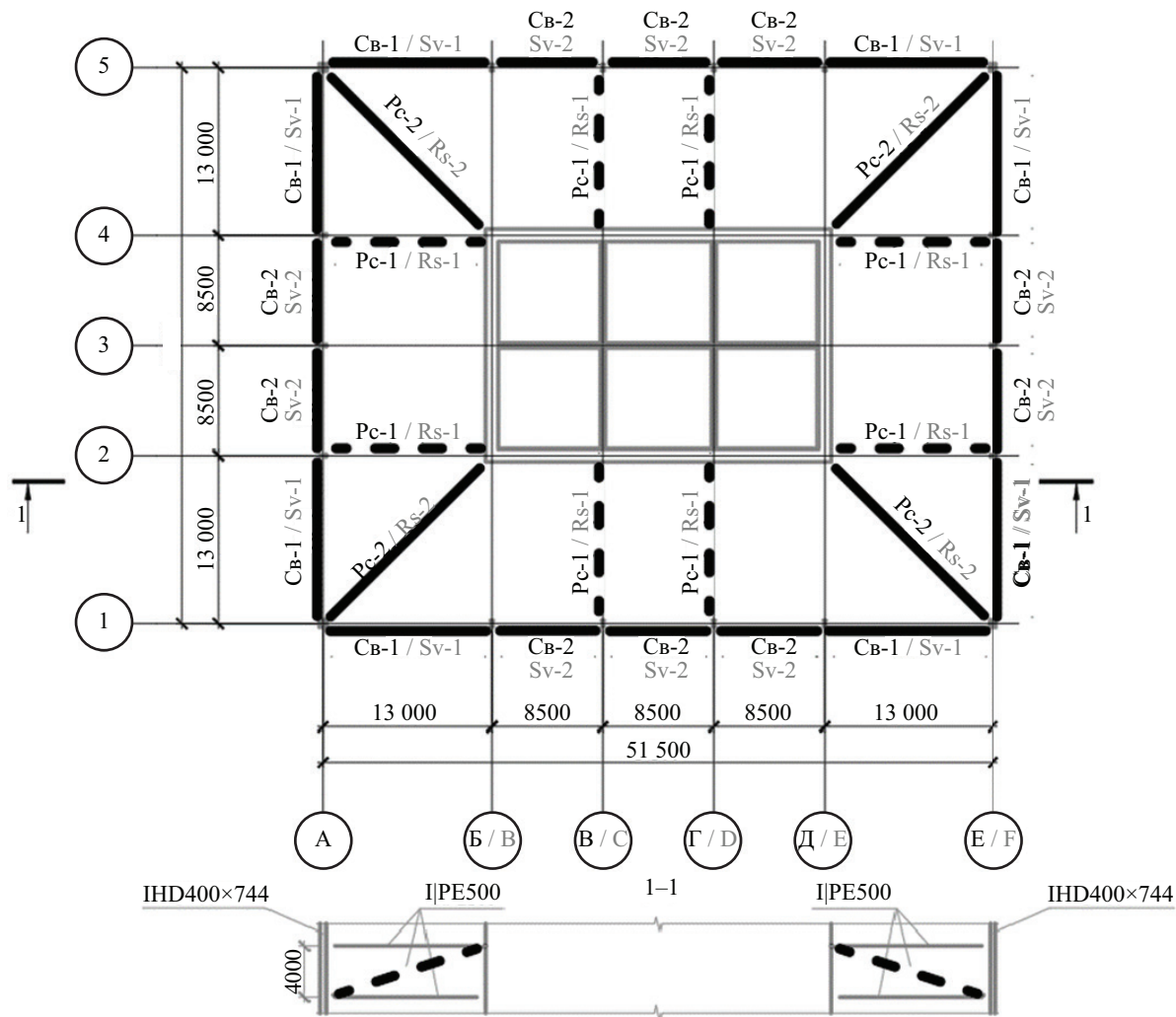
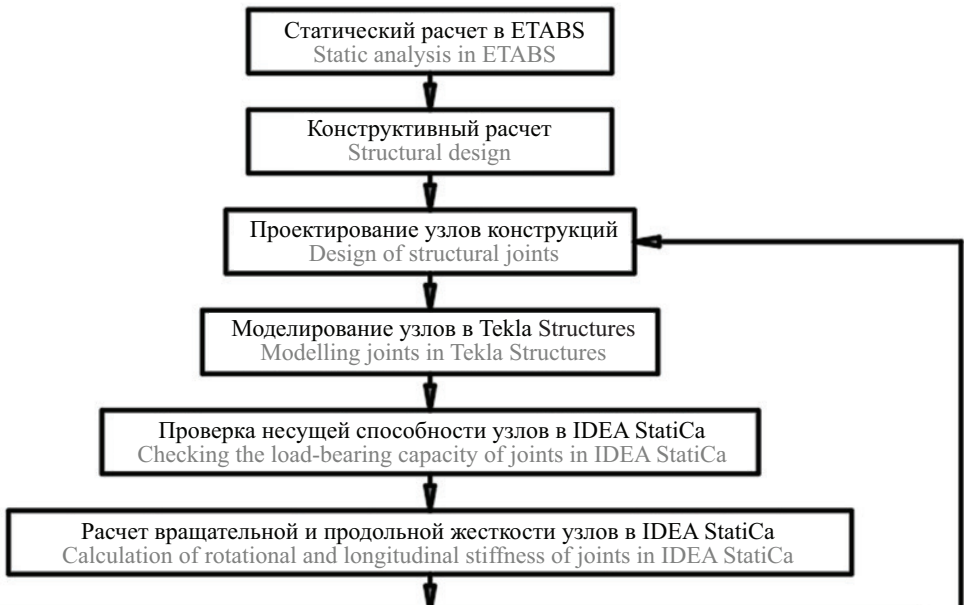


Рис. 3. Схема расположения элементов аутригера (пунктирной линией отмечены раскосы, в которых определялись максимальные значения усилий)

Fig. 3. The arrangement diagram of outrigger elements (diagonal lines mark the braces where the maximum values of forces were determined)



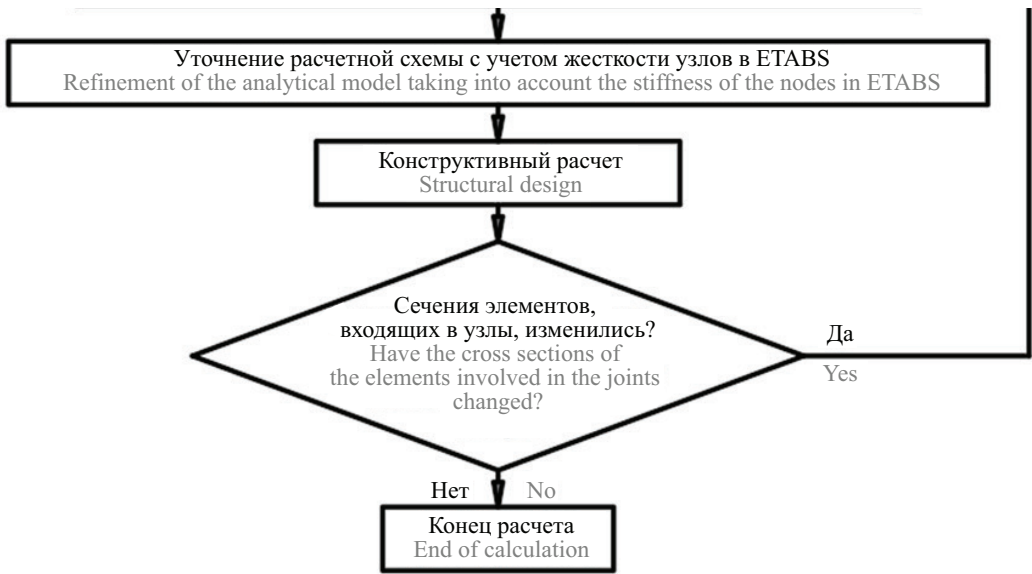
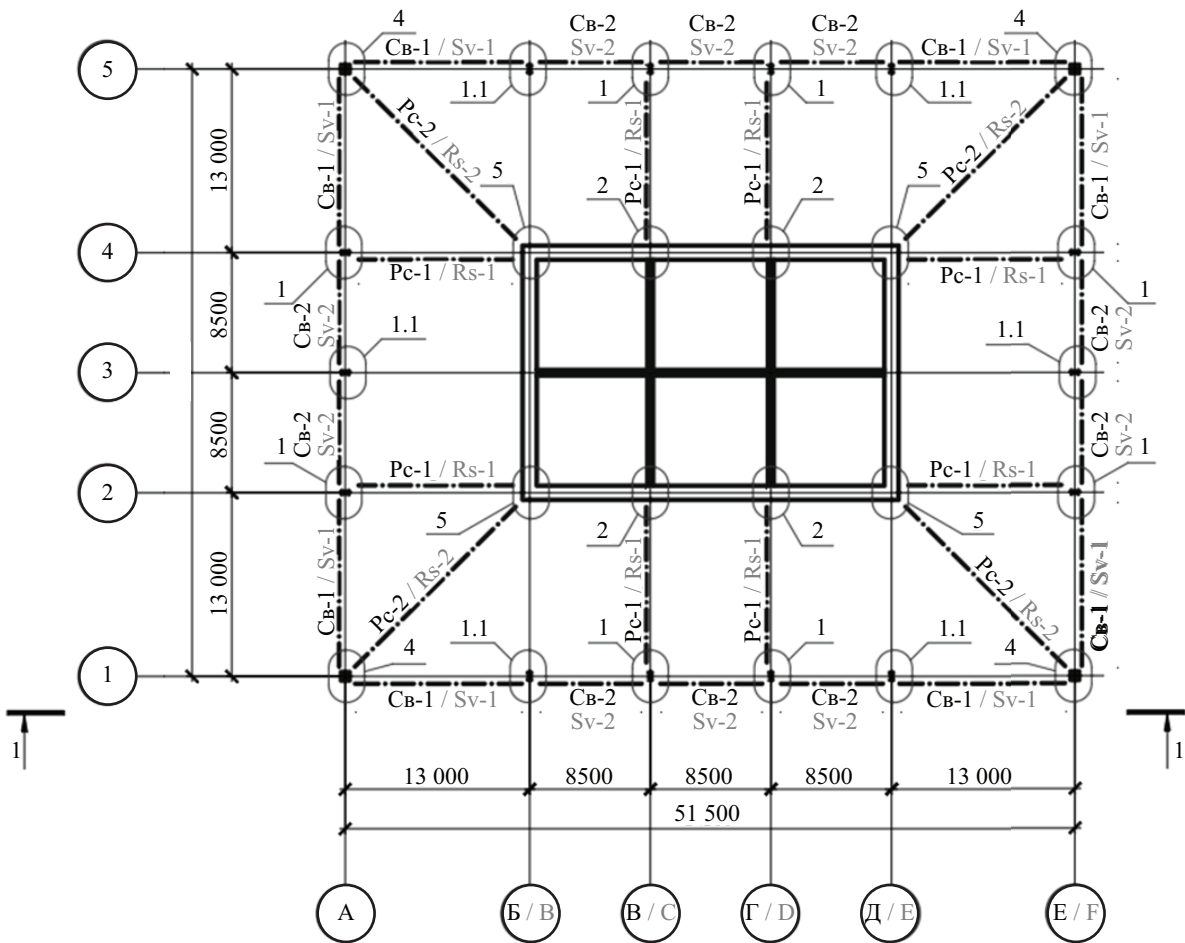


Рис. 4. Алгоритм расчета высотных зданий с учетом податливости
Fig. 4. Algorithm for calculating high-rise buildings taking into account suppleness

сечением из двутавров HD 400 × 744 по сортаменту ARBED, а также в виде квадратных профилей 600 × 600 мм с толщиной стенки 120 мм в углах здания. Перекрытие из профилированного настила по стальным шарнирно опертым балкам. Сечение балок —

двутавр IPE500 по сортаменту Euronorm 19-37. Сталь — С245, С355. Фундаменты для расчетной модели не проектировались. Стеновое ограждение — витражное остекление. Податливость грунтов в расчетах не учитывалась. Опорные узлы периме-



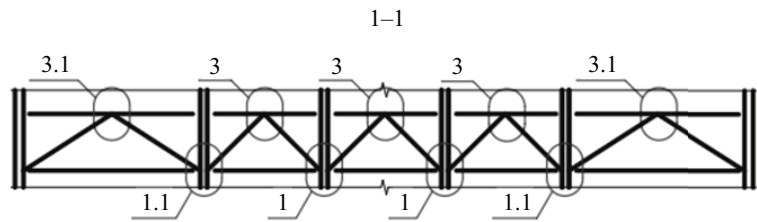


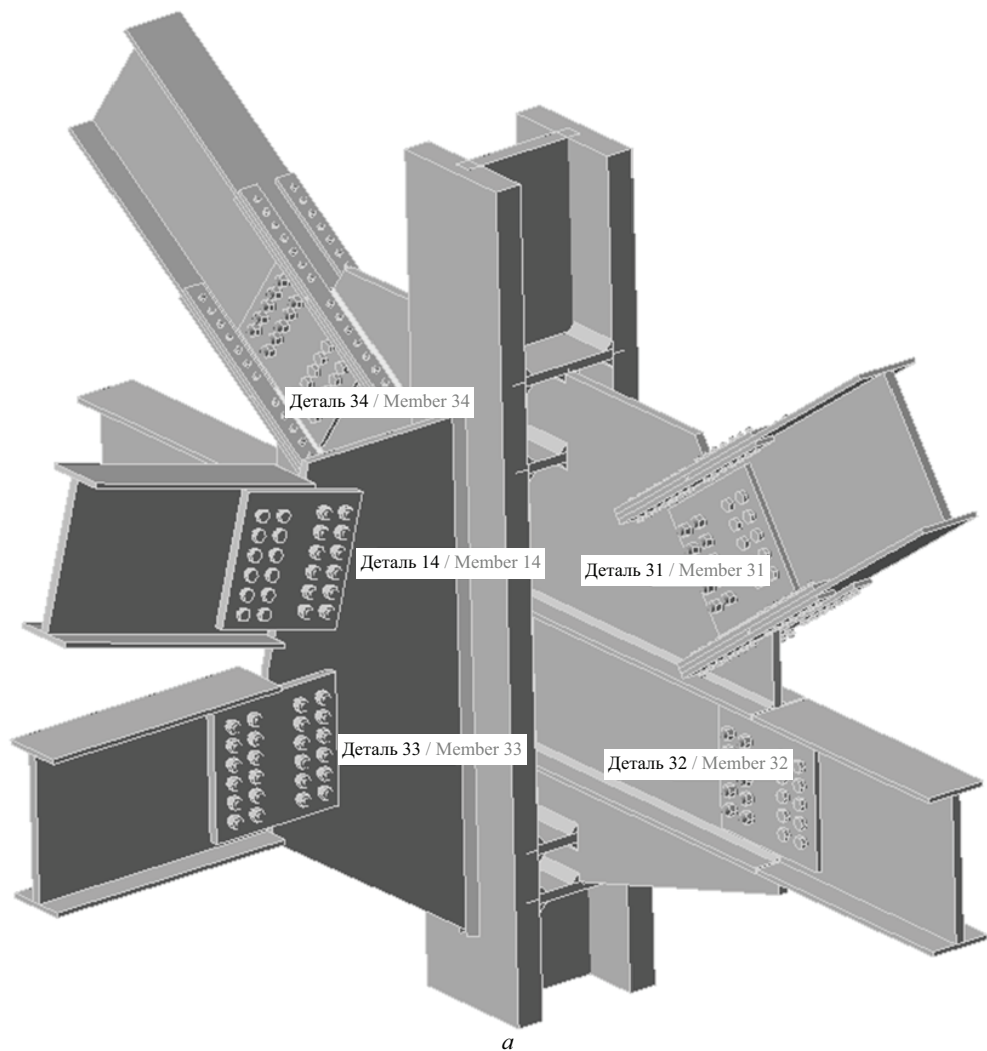
Рис. 5. Схема расположения узлов аутригера, для которых определялись значения продольной и вращательной жесткости
Fig. 5. Diagram of outrigger node locations, for which longitudinal and rotational stiffness values were determined

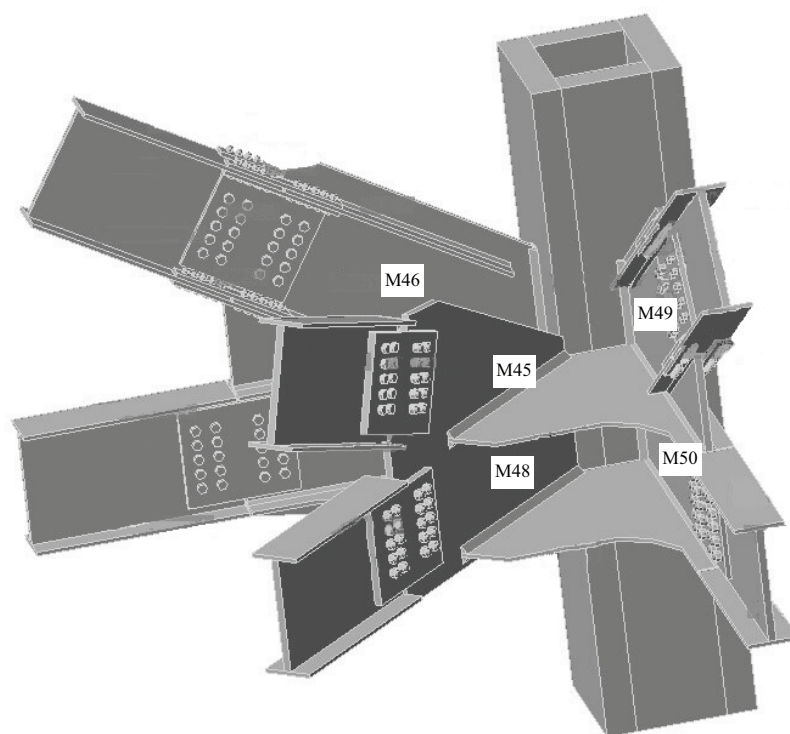
тральных колонн и железобетонного ядра жесткости приняты жестко защемленными.

Элементы опоясывающей фермы и вертикальных связей аутригера стальные, сечением в виде двутавра IPE500 по сортаменту Euro norm 19-37. Вертикальные связи приняты в виде нисходящего раскоса от ядра жесткости к периметральным колоннам, закрепленного к периметральным колоннам шарнирным узлом, а к ядру жесткости — жестким. Узлы опоясывающей фермы приняты жесткими. Схема расположения элементов аутригера представлена на рис. 1.

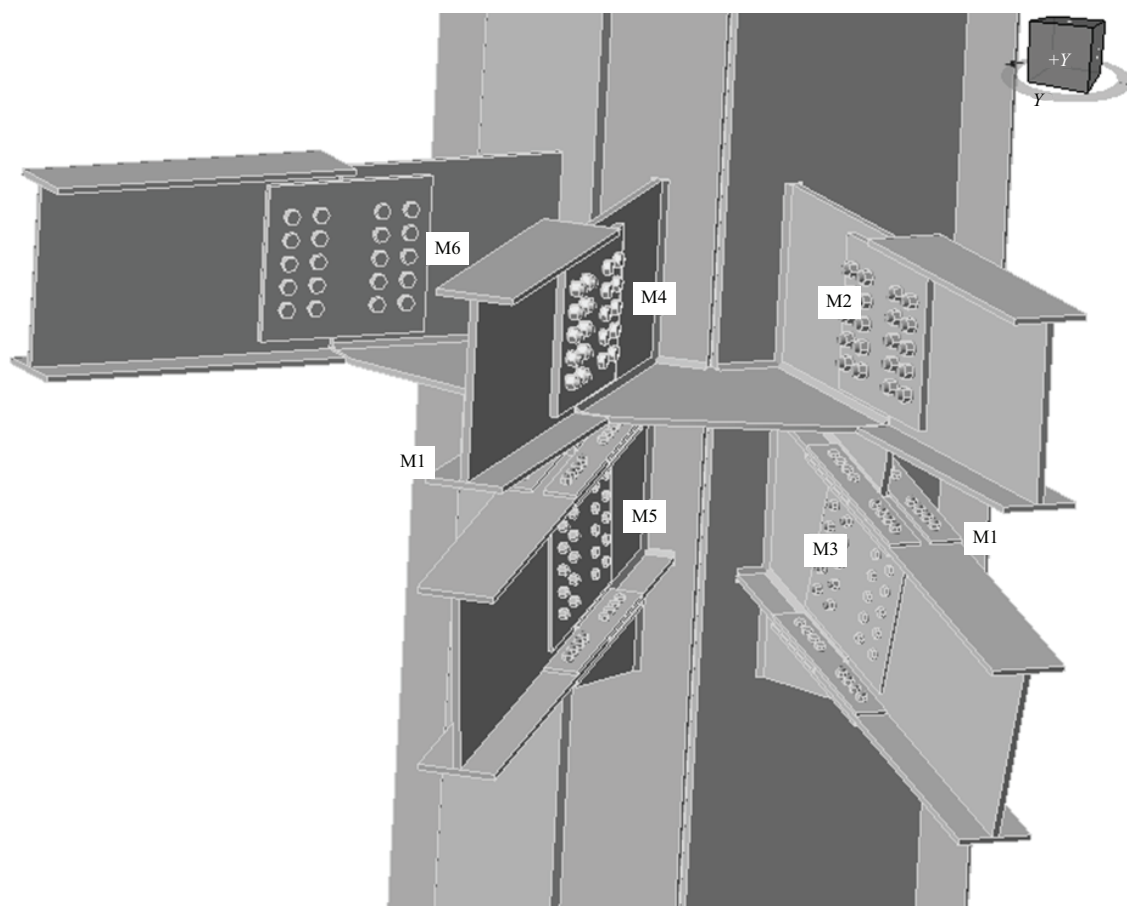
Место строительства — Санкт-Петербург. К перекрытиям приложена полезная нагрузка, нормативное значение которой принято равным 2 кН/м^2 , а также нагрузка от временных перегородок 1 кН/м^2 . Значение снеговой нагрузки — $1,3 \text{ кН/м}^2$. Ветровая нагрузка прикладывалась к диафрагме жесткости перекрытия на каждом этаже, значение принималось в зависимости от высотной отметки этажа. Пульсационная составляющая ветровой нагрузки не учитывалась.

Статический расчет конструкций высотного здания выполнен с использованием расчетного комплекса (ПК) ETABS. Программа предназначена для проектирования высотных зданий, расчеты вы-





b



c

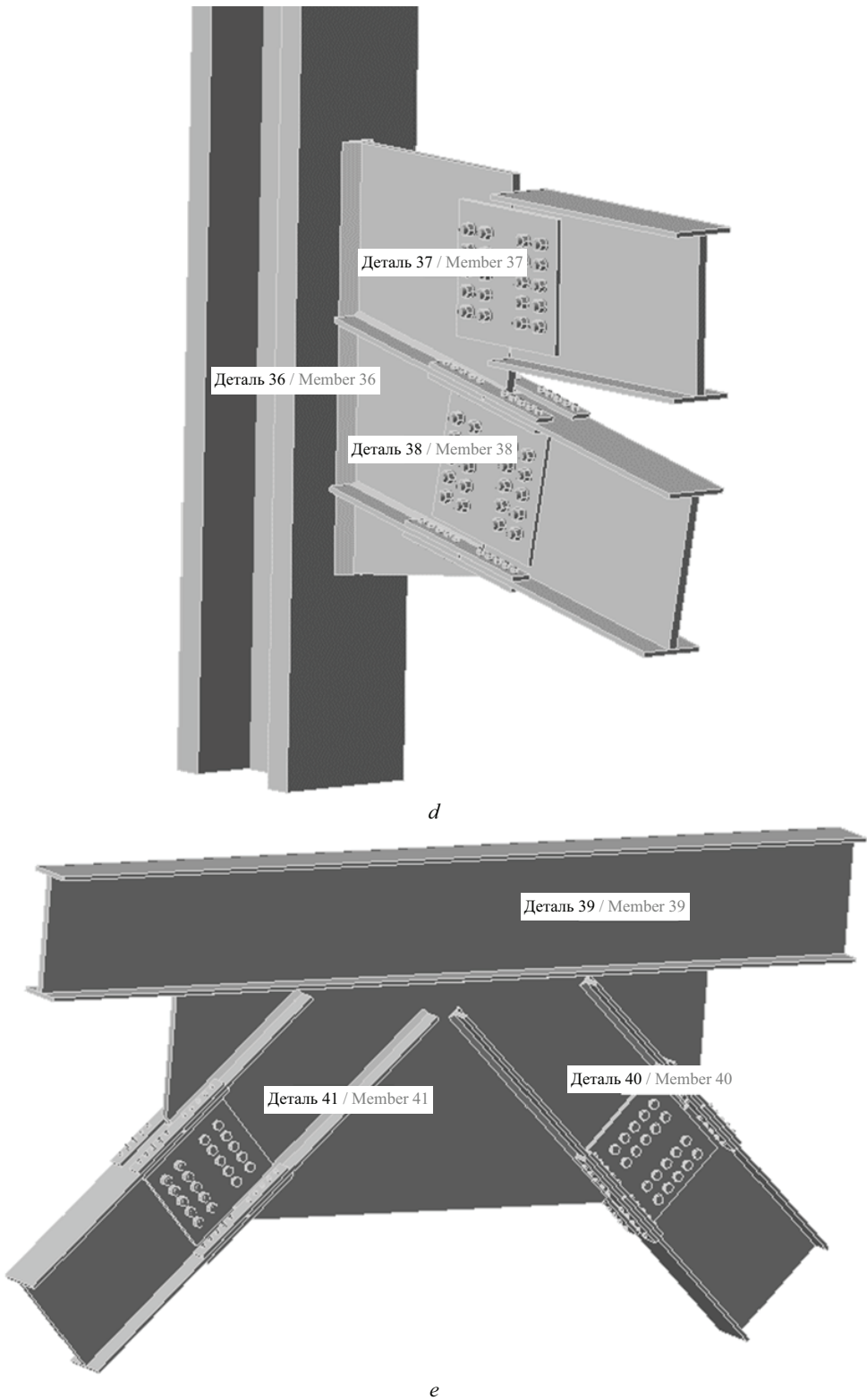


Рис. 6. Модели узлов, разработанные для определения значений продольной и вращательной жесткости: *a* — узел сопряжения периметральной колонны с элементами аутригера; *b* — узел сопряжения элементов аутригера с угловой периметральной колонной; *c* — узел сопряжения элементов аутригера с ядром жесткости (в данном случае железобетон не моделировался, а закладная деталь заменялась колонной высокой жесткости); *d* — узел сопряжения элементов аутригера с ядром жесткости; *e* — узел опоясывающей фермы аутригера

Fig. 6. Node models developed to determine the values of longitudinal and rotational stiffness: *a* — node connecting the perimeter column with outrigger elements; *b* — node connecting outrigger elements with a corner perimeter column; *c* — node connecting outrigger elements with the core stiffness (in this case, reinforced concrete was not modeled, and the embedded detail was replaced by a high-strength column); *d* — node of the outrigger belt truss; *e* — node connecting outrigger elements with the core stiffness

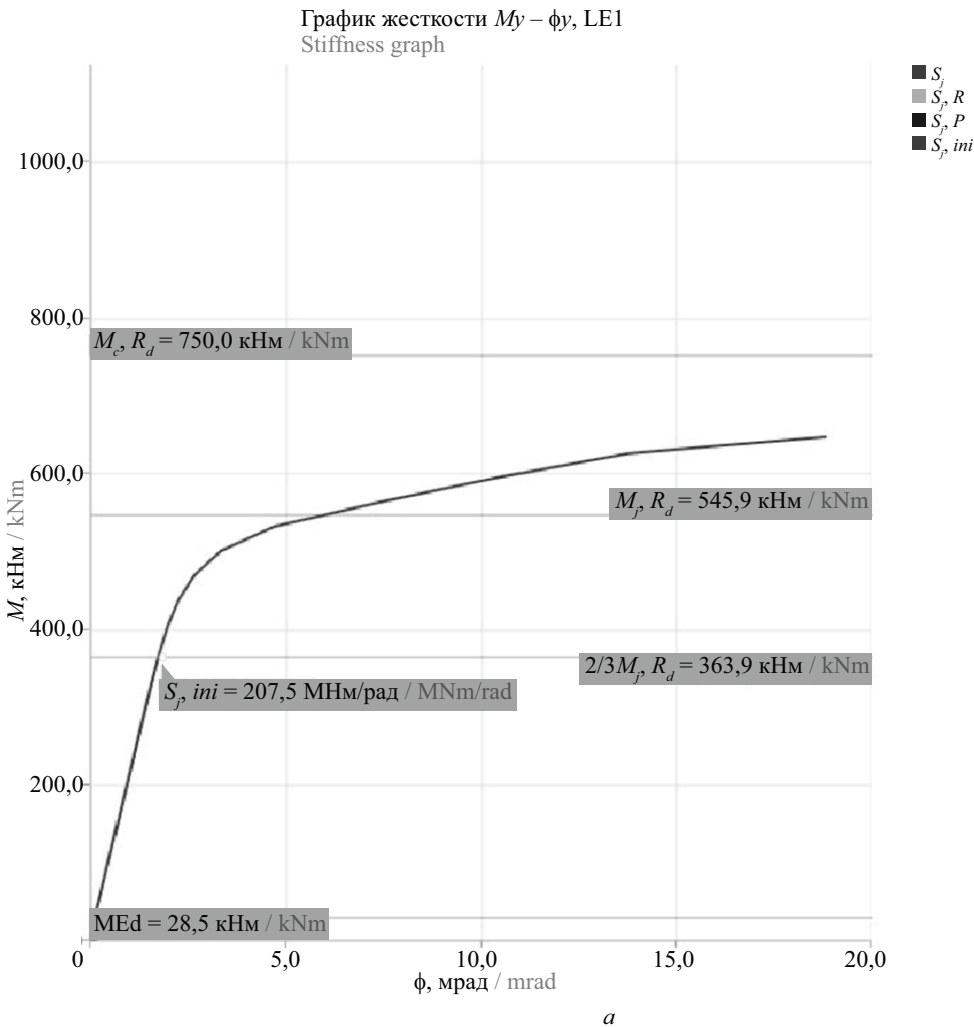
Результаты расчета продольной и вращательной жесткости соединений элементов аутригера

Calculation results of longitudinal and rotational stiffness of connections of outrigger elements

Номер узла Joint number	Номер элемента, входящего в узел (наименование) Element number entering the joint (designation)	Вращательная жесткость $S_{j,ini}$, МНм/рад Initial rotational stiffness $S_{j,ini}$, MNm/rad	Продольная жесткость S_p , МН/м Longitudinal stiffness S_p , MN/m
1	14 (раскос / brace)	20	813
	31 (стержень опоясывающей фермы / bar of the perimeter truss)	207,5	756 (782)
2	38 (раскос / brace)	81	699
3	41 (стержень опоясывающей фермы / bar of the perimeter truss)	136,4 (136,3)	649(658)
4	M45	9,9	432
	M46	394,8	2498
5	M5	133,6	619
	M3	104,2	1052

Вращательная жесткость элемента узла / Rotational stiffness of the node element

	Элемент Element	Комп. Comp.	Нагрузки Loads	ME_d кН / kN	M_p, R_d кН / kN	$S_{j,ini}$ МНм/рад MNmrad	$S_{j,R}$ МНм/рад MNmrad	ϕ , мрад mrad	ϕ_c , мрад mrad	L м / m	$S_{j,R}$ МНм/рад MNmrad	$S_{j,P}$ МНм/рад MNmrad	Класс Class
>	Member 31	My	LE1	-28,5	-545,9	207,5	211,6	0,1	5,7	5,84	567,4	11,3	Полужесткие Semi-rigid



Продольная жесткость компонента узла / Longitudinal stiffness of the node component

	Элемент Element	Комп. Comp.	Нагрузки Loads	N , кН / kN	N_p, R_d , кН / kN	δ , мм / mm	S_p , мм / mm
>	Member 31	N	LE1	-1936,0	-3156,1	3	756

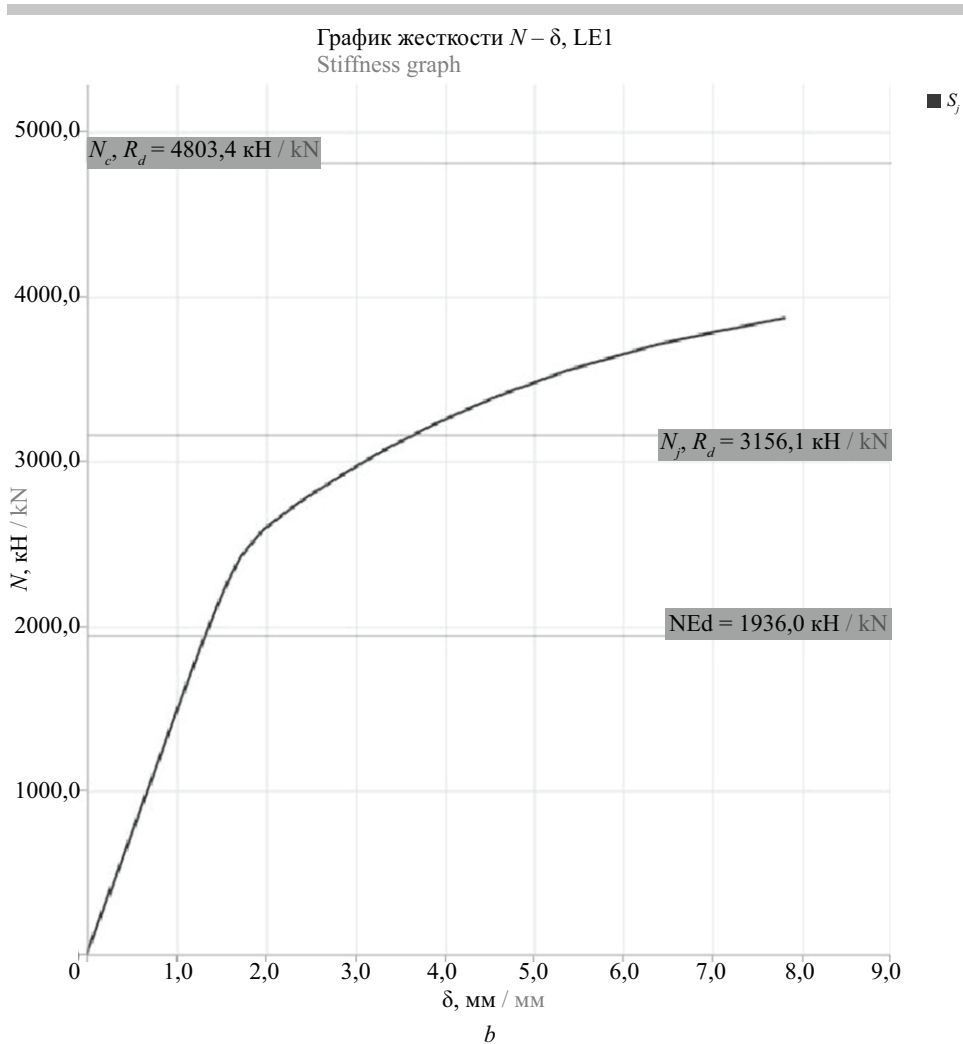


Рис. 7. Примеры графиков вращательной (а) и продольной (b) жесткости

Fig. 7. Examples of rotational (a) and longitudinal (b) stiffness graphs

полняются с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

На рис. 2 представлена расчетная схема объекта исследования, смоделированная в ПК ETABS.

Исследование проводилось путем поочередной постановки аутигера на разных этажах здания с последующим выполнением расчетов и анализом результатов. После каждой постановки фиксировалось значение максимального горизонтального перемещения верха здания, а также максимальных усилий в раскосах вертикальных связей (продольной силы и изгибающего момента). На рис. 3 показана схема расположения раскосов, в которых определялись максимальные значения усилий.

Для учета податливости узлов при расчете высотных зданий разработан алгоритм, представленный на рис. 4.

В настоящем исследовании сечения элементов после учета жесткости узлов в расчетной схеме не уточнялись, так как целью исследования является анализ влияния учета податливости на результаты статического расчета. При проектировании высотного здания рекомендуется повторять итерации данного алгоритма до достижения такой точности расчета, при которой дальнейшее уточнение расчетной схемы не будет оказывать влияние на результаты конструктивного расчета. На рис. 5 приведена схема расположения узлов, для которых определялись значения продольной и вращательной жесткости.

Модели узлов, разработанные в программном комплексе (ПК) Tekla Structures, представлены на рис. 6.

Для определения податливости узлов рассчитаны жесткости элементов конструкции, входящих

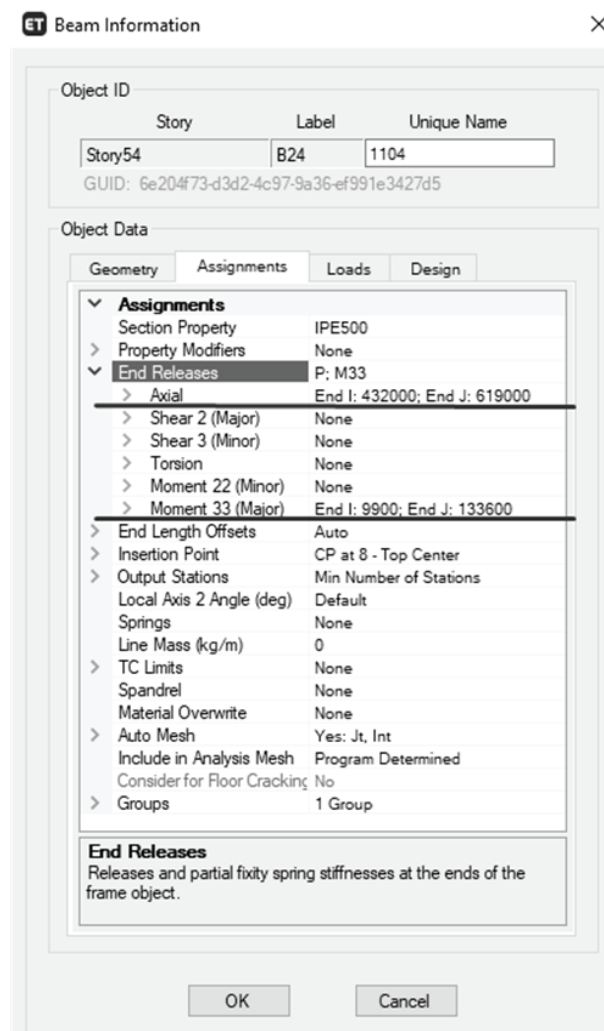


Рис. 8. Присваивание продольной и вращательной жесткости элементу в расчетном комплексе ETABS

Fig. 8. Assignment of longitudinal and rotational stiffness to an element in the analysis model in ETABS

в узлы. Расчет выполнялся с помощью ПК IDEA StatiCa. В данной программе для расчета соединений используется компонентный МКЭ, при котором элементы узла классифицируются на компоненты, каждый из которых рассчитывается по отдельным формулам. При этом напряжения в отдельных компонентах (пластины, стержни и т.д.) рассчитываются при помощи МКЭ. Этот метод позволяет программе определять вращательную и продольную жесткость соединения отдельных стержней узла. При определении вращательной жесткости строится график жесткости, а также приводятся значения начальной вращательной жесткости $S_{j,ini}$, соответствующей упругой работе соединения, значение предела несущей способности, а также граничные значения жесткости $S_{j,R}$ и $S_{j,P}$, по которым в соответствии с европейскими нормами¹ узел классифицируется по жесткости. При определении поступательной продольной жесткости строится график жесткости, а также приводится значение продольной жесткости S_l . На рис. 7

¹ EN 1993-1-8 (2005). Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-8: Design of joints.

представлены примеры графиков продольной и вращательной жесткости.

Результаты расчета жесткостей соединений элементов аутригера приведены в таблице.

Полученные значения жесткостей были присвоены соответствующим элементам аутригера в РК ETABS. На рис. 8 линией подчеркнуты присваиваемые параметры жесткости закреплений по обоим концам (end I и end J) для раскоса PC-2.

Далее выполнялся повторный статический расчет в РК ETABS уже с присвоенными элементам аутригера значениями продольной и вращательной жесткости соединений.

Завершающим этапом исследования была оценка влияния и уточнение зависимостей перемещений и усилий от расположения аутригера с учетом продольной и вращательной жесткостей соединений его элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первым этапом исследования стало определение зависимости максимального значения го-

горизонтального перемещения верха здания от расположения аутригеров по этажам, полученной в исследовании [24], и ее уточнение учетом податливости узлов аутригера.

Построены зависимости горизонтального перемещения верха здания при постановке одного аутригера. Значение горизонтального перемещения на графике выражено в процентах от перемещения

без аутригера. Перемещение без аутригера составило 121,8 мм. Оптимальным расположением аутригера для данной конструктивной схемы является его расположение на 54 этаже (0,9 высоты здания). В таком случае максимальные горизонтальные перемещения верха здания снижаются на 8,3 %.

По результатам статического расчета в ПК ETABS с учетом податливости узлов аутригера при по-

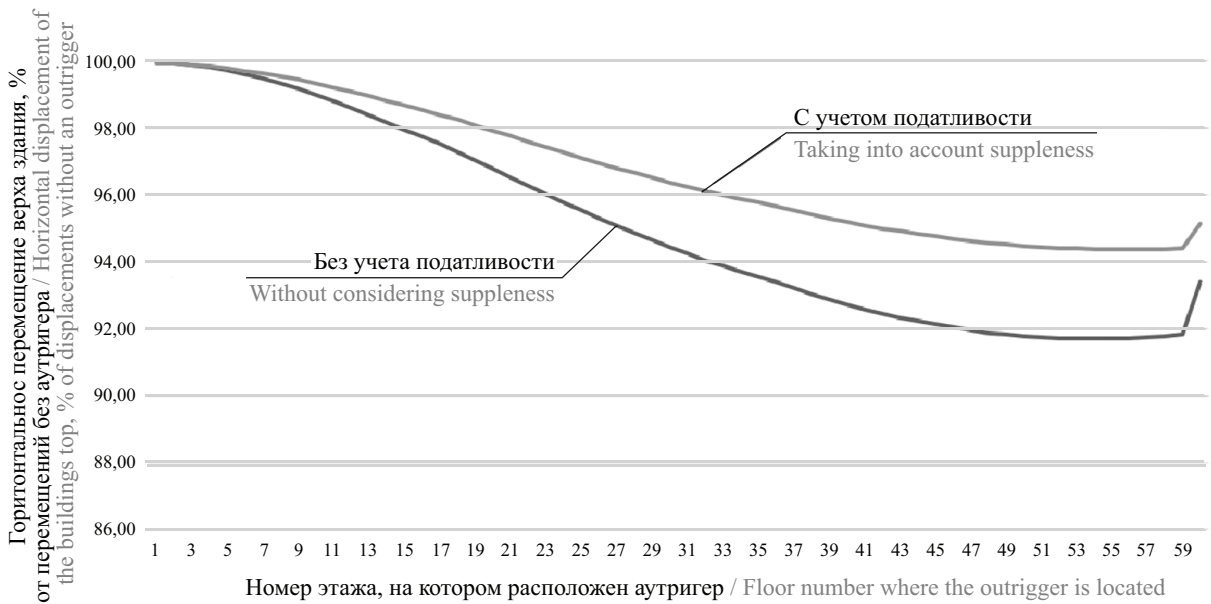


Рис. 9. Зависимости горизонтального перемещения верха здания от расположения аутригера, полученные при расчете с учетом податливости и без учета податливости

Fig. 9. Dependences of horizontal displacement of the building’s top depending on the outrigger location, obtained in calculations with and without considering suppleness

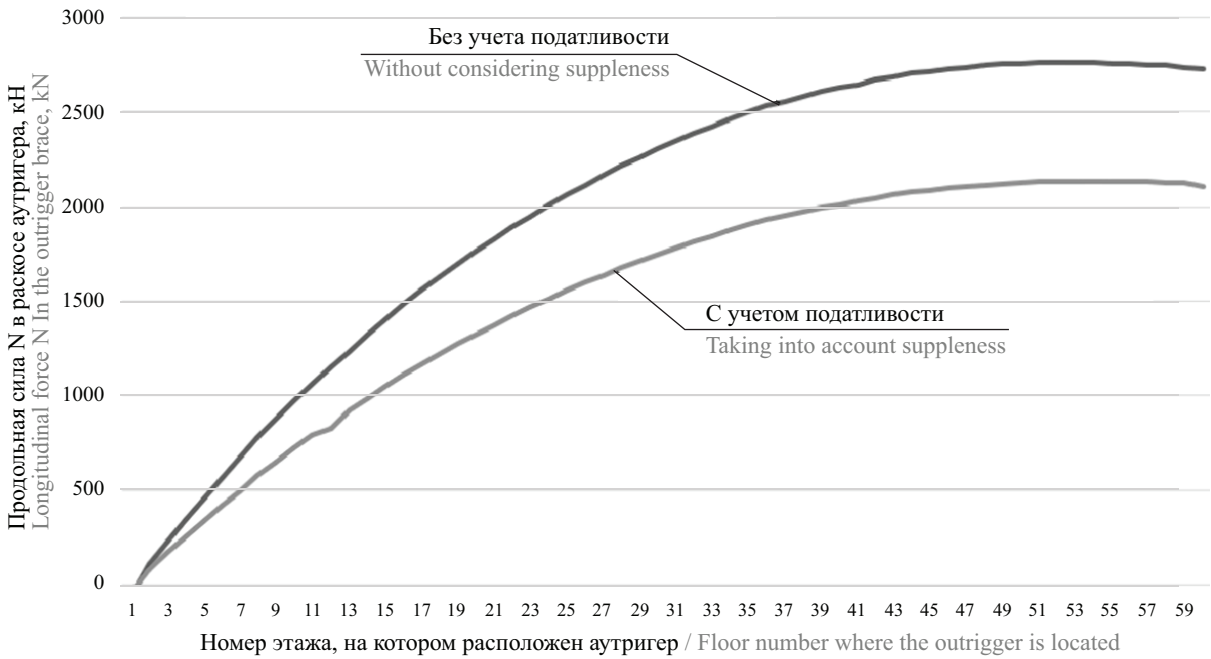


Рис. 10. Зависимости значения продольной силы в раскосе от расположения аутригера, полученные при расчете с учетом податливости и без учета податливости

Fig. 10. Dependences of the longitudinal force value in the brace on the outrigger location, obtained in calculations with and without considering suppleness

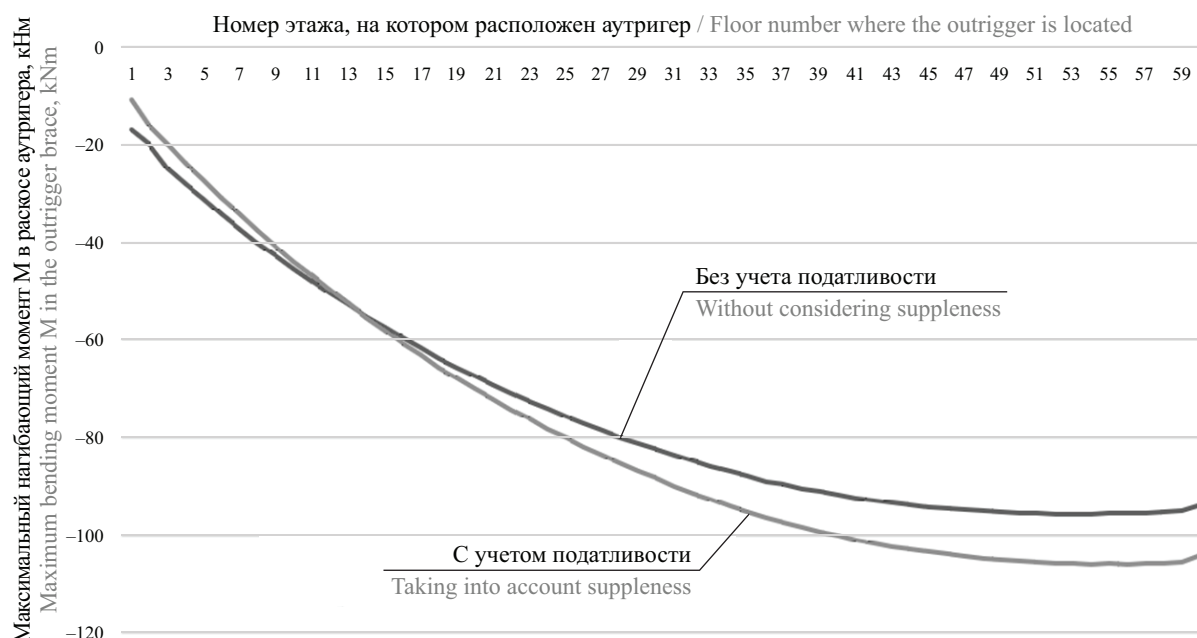


Рис. 11. Зависимости значения изгибающего момента в раскосе от расположения аутригера, полученные при расчете с учетом податливости и без учета податливости

Fig. 11. Dependences of the bending moment value in the brace on the outrigger location, obtained in calculations with and without considering suppleness

становке аутригера на 54 этаже максимальное горизонтальное перемещение верха здания увеличилось на 2,9 % по сравнению с результатами расчета без учета податливости. На рис. 9 показаны зависимости горизонтальных перемещений верха здания от расположения аутригера, полученные при расчете с учетом податливости и без учета податливости. Зависимость горизонтального перемещения верха здания от расположения аутригера при расчете без учета податливости совпала с результатами исследования [24].

Для уточнения зависимости максимального горизонтального перемещения от расположения аутригера были спроектированы узлы аутригера при его расположении на 10 этаже. В таком случае максимальное горизонтальное перемещение при постановке аутригера на 10 этаже увеличилось на 0,2 % по сравнению с результатом расчета с учетом жесткостей узлов, спроектированных для аутригера на 54 этаже. То есть для уточнения данной зависимости необходимо прикладывать к расчетной схеме жесткости узлов, спроектированных для соответствующего расположения аутригера.

На втором этапе исследования получены зависимости значений продольной силы и изгибающего момента в раскосе от расположения аутригера. Максимальное значение продольной силы получено при постановке аутригера на 54 этаже (0,9 высоты здания) — 2762 кН, изгибающего момента на 52-м этаже (0,9 высоты здания) — 95,49 кНм.

Также получены зависимости продольной силы и изгибающего момента в раскосе аутригера от положения аутригера при учете податливости. Мак-

симальное значение продольной силы снизилось на 23 % по сравнению с результатами без учета податливости, а максимальное значение изгибающего момента увеличилось на 10 %.

Зависимости значений продольной силы и изгибающего момента от расположения аутригера при расчете с учетом податливости и без учета податливости представлены на рис. 10, 11.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При расчете высотного здания с учетом податливости узлов аутригера значения горизонтального перемещения верха здания увеличиваются в пределах 5 %.

Если при проектировании необходимо ограничить горизонтальные перемещения здания, то следует выполнять расчет с учетом податливости узлов металлических конструкций аутригера.

Для уменьшения горизонтальных перемещений рекомендуется проектировать конструкции аутригера сталежелезобетонными либо, в случае невозможности использования сталежелезобетонных конструкций, проектировать узлы аутригера более жесткими.

Учет податливости при расчете позволяет снизить металлоемкость проектируемых раскосов аутригера, так как определяющим усилием является продольная сила, которая при расчете с учетом податливости уменьшается в пределах 25 %.

Одним из возможных направлений будущих исследований по данной теме может быть определение связи между высотой здания и необходимостью учитывать податливость узлов металлических конструкций аутригера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беленя Е.И. Действительная работа и расчет поперечных рам стальных каркасов одноэтажных производственных зданий: экспериментально-техническое исследование в 2 т. : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1959. 561 с.
2. Колмогоров Ю.И. Экспериментально-теоретический метод определения податливости узлов для уточнения расчетных схем рам эксплуатационных промзданий : дис. ... канд. техн. наук. Л. : ЛИСИ, 1990. 185 с.
3. Лапшин А.А., Морозов Д.В., Колесов А.И. Методика проектирования стальных конструкций из гнутых тонколистовых незамкнутых профилей с учетом податливости узловых соединений на самонарезающих винтах // Приволжский научный журнал. 2014. № 3 (31). С. 16–25. EDN SNZKRV.
4. Новоселов А.А., Карелин Д.А. Оценка влияния податливости опорного узла стальной колонны // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 4 (43). С. 26–31. EDN ZWDQCB.
5. McGuire J. Notes on semi-rigid connections. 1995. URL: <https://femci.gsfc.nasa.gov/semirigid/>
6. Kartal M.E., Başağa H.B., Bayraktar A., Muvafik M. Effects of semi-rigid connection on structural responses // Electronic Journal of Structural Engineering. 2010. Vol. 10. Pp. 22–35. DOI: 10.56748/ejse.10122
7. Ананьин М.Ю., Фомин Н.И. Метод учета податливости в узлах металлических конструкций зданий // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2010. № 2. С. 72–74. EDN MTEXND.
8. Марутян А.С. Учет влияния податливости узловых соединений перекрестных систем на работу конструкций покрытий // Строительная механика и расчет сооружений. 2008. № 6. С. 2–6.
9. Ackroyd M.H., Gerstle K.H. Strength of flexibly connected steel frames // Engineering Structures. 1983. Vol. 1. Issue 1. Pp. 31–37. DOI: 10.1016/0141-0296(83)-90038-X
10. Frye M.J., Morris G.A. Analysis of flexibly connected steel frames // Canadian Journal of Civil Engineering. 1975. Vol. 2. Issue 3. Pp. 280–291. DOI: 10.1139/l75-026
11. Lindsey S.D., Loannides S.A., Goverdhan A. LRFD Analysis and design of beams with partially restrained connections // Engineering Journal. 1985. Vol. 22. Issue 4. Pp. 157–162. DOI: 10.62913/engj.v22i4.452
12. Должиков В.Н., Удотова О.А. Влияние податливости узловых соединений на напряженно-деформированное состояние металлических стержневых систем // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 11 (779). С. 15–25. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-779-11-15-25. EDN RVOXQH.
13. Каландарбеков И.И., Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К. Об учете податливости стыковых соединений в расчетах элементов многоэтажных зданий // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2021. № 2 (54). EDN UUZLUD.
14. Люблинский В.А. Податливость вертикальных связей сдвига панельных зданий // Строительство и реконструкция. 2022. № 3 (101). С. 32–39. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-101-3-32-39. EDN LCGTMJ.
15. Широков В.С. Влияние податливости внутримодульных узлов на частоту собственных колебаний модульного здания // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 10. С. 1556–1562. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1556-1562. EDN FMLQDX.
16. Козлов А.В., Козлов В.А. Напряженно-деформированное состояние составной конструкции с учетом податливости на сдвиг между железобетонной плитой и стальной балкой // Строительная механика и конструкции. 2021. № 2 (29). С. 48–61. EDN DDVSCI.
17. Каюмов Р.А., Хайдаров Л.И., Гимазетдинов А.Р. Податливость сжатых стержней с упругой опорой с учетом их закритического поведения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 3 (57). С. 5–11. DOI: 10.52409/20731523_2021_3_5. EDN JHXCQC.
18. Истомин А.Д., Кудрявцев М.В. Влияние податливости опор на температурные усилия в статически неопределимой железобетонной балке // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 2 (746). С. 52–60. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-52-60. EDN VXWNIR.
19. Кудряшова А.Н. Важность анализа податливости узлов при расчете балочных конструкций на стесненное кручение // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 96–10. С. 58–60. DOI: 10.18411/trnio-04-2023-523. EDN MOGXMN.
20. Люблинский В.А., Стручков В.С. Прочность и податливость вертикальных стыков панельных зданий при сдвиге и кручении // Строительство и реконструкция. 2023. № 6 (110). С. 41–49. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-110-6-41-49. EDN GYQEYG.
21. Киселёв Д.В., Бержинская Л.П., Горбач П.С. Учет податливости сборных железобетонных конструкций при расчетах зданий с помощью ПК SCAD office // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2021. № 15. С. 134–138. EDN SUTJRW.
22. Рубанова Э.А., Багаутдинов Р.И., Школяр Ф.С. Влияние податливости платформенного соединения типа КЭ-55 на НДС конструкции // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвящ. 300-летию Российской

академии наук : сб. докл. нац. конф. с междунар. участием. 2022. С. 301–307. EDN MYPNUR.

23. Ведяков И.И., Конин Д.В., Одесский П.Д. Стальные конструкции высотных зданий. М. : Издательство АСВ, 2014. 272 с.

24. Травуш В.И., Конин Д.В. Работа высотных зданий с применением этажей жесткости (аутригеров) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 2 (23). С. 77–91. EDN KXDSLJ.

Поступила в редакцию 1 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 14 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 17 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Иван Витальевич Астахов** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; SPIN-код: 8747-6048; 3557710@mail.ru;

Денис Вадимович Калюжный — аспирант кафедры строительной механики; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; SPIN-код: 4788-9567; kaliuzhnydv@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Belenia E.I. *Actual work and calculation of cross frames of steel frames of single-story industrial buildings: experimental-technical research in 2 vols : thesis of doctor of technical sciences*. Moscow, 1959; 561. (rus.).
2. Kolmogorov Yu.I. *Experimental-theoretical method for determining the flexibility of nodes to refine the design schemes of frames of operational industrial buildings : thesis of candidate of technical sciences*. Leningrad, LISI, 1990; 185. (rus.).
3. Lapshin A.A., Morozov D.A., Kolesov A.I. Methods of designing steel structures of cold-formed profiles with pliability of nodal connections on tapping screws. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2014; 3(31):16-25. EDN SNZKRV. (rus.).
4. Novoselov A.A., Karelin D.A. Impact assessment of the steel column datum node deformation capacity. *Proceedings of the Siberian State University of Railway Engineering*. 2017; 4(43):26-31. EDN ZWDQCB. (rus.).
5. McGuire J. *Notes on Semi-Rigid Connections*. 1995. URL: <https://femci.gsfc.nasa.gov/semirigid/>
6. Kartal M.E., Başağa H.B., Bayraktar A., Muvafik M. Effects of semi-rigid connection on structural responses. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2010; 10:22-35. DOI: 10.56748/ejs.10122
7. Ananin M.Yu., Fomin N.I. Method of accounting for flexibility in nodes of metal structures of buildings. *Akademicheskij Vestnik UralNIiproekt RAASN*. 2010; 2:72-74. EDN MTEXND. (rus.).
8. Marutyan A.S. Accounting for the influence of flexibility of nodal connections of intersecting systems on the performance of covering structures. *Building Mechanics and Structure Calculation*. 2008; 6:2-6. (rus.).
9. Ackroyd M.H., Gerstle K.H. Strength of flexibly connected steel frames. *Engineering Structures*. 1983; 1(1):31-37. DOI: 10.1016/0141-0296(83)90038-X
10. Frye M.J., Morris G.A. Analysis of flexibly connected steel frames. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1975; 2(3):280-291. DOI: 10.1139/l75-026
11. Lindsey S.D., Loannides S.A., Goverdhan A. LRFD analysis and design of beams with partially restrained connections. *Engineering Journal*. 1985; 22(4):157-162. DOI: 10.62913/engj.v22i4.452
12. Dolzhikov V.N., Udotoва O.A. Influence of the malleability of nodal joints on the stress-strain state of metal rod systems. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023; 11(779):15-25. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-779-11-15-25. EDN RVOXQH. (rus.).
13. Kalandarbekov I.I., Nizomov G.N., Kalandarbekov I.K. About accounting the supply of butt connections in calculations of elements of multi-storey buildings. *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Studies*. 2021; 2(54). EDN UUZLUD. (rus.).
14. Lyublinskiy V.A. Pliability of vertical shear bonds of panel buildings. *Construction and Reconstruction*. 2022; 3(101):32-39. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-101-3-32-39. EDN LCGTMI. (rus.).
15. Shirokov V.S. Influence of compliance of intra-modular joints on the natural vibrations frequency of a modular building. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(10):1556-1562. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1556-1562. EDN FM-LQDX. (rus.).

16. Kozlov A.V., Kozlov V.A. Deflected mode of composite structure taking into account supply on shift between reinforced concrete plate and steel beam. *Building Mechanics and Structures*. 2021; 2(29):48-61. EDN DDVSCI. (rus.).

17. Kayumov R.A., Khaidarov L.I., Gimazetdinov A.R. Compliance of compressed rods with elastic supports, taking into account their post-buckling behavior. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2021; 3(57):5-11. DOI: 10.52409/20731523_2021_3_5. EDN JHXCQC. (rus.).

18. Istomin A.D., Kudryavtsev M.V. Influence of the supports pliability on the temperature forces in a statically undetectable reinforced concrete beam. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; 2(746):52-60. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-52-60. EDN VXWNIR. (rus.).

19. Kudryashova A.N. The importance of analyzing the flexibility of connections in calculating beam structures for restrained torsion. *Trends in Science and Education Development*. 2023; 96-10:58-60. DOI: 10.18411/trnio-04-2023-523. EDN MOGXMN. (rus.).

20. Lyublinskiy V.A., Struchkov V.S. Strength and flexibility of vertical joints of panel buildings in shear

and torsion. *Building and Reconstruction*. 2023; 6(110): 41-49. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-110-6-41-49. EDN GYQEYG. (rus.).

21. Kiselev D.V., Berzhinskaya L.P., Gorbach P.S. Accounting for the malleability of precast reinforced concrete structures when calculating buildings using PC SCAD office. *Bulletin of the Angarsk State Technical University*. 2021; 15:134-138. EDN SUTJRW. (rus.).

22. Rubanova E.A., Bagautdinov R.I., Shkolyar F.S. Influence of flexibility of platform connection type KE-55 on the behavior of structure under dynamic loads. *International scientific and technical conference of young scientists of BSTU. V.G. Shukhov, dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences : collection of reports from the National Conference with international participation*. 2022; 301-307. EDN MYPNUR. (rus.).

23. Vedyakov I.I., Konin D.V., Odesskiy P.D. *Steel Structures of High-rise Buildings*. Moscow, ASV, 2014; 272. EDN XVOYFH. (rus.).

24. Travush V.I., Konin D.V. High-rise buildings with outrigger effort. *Journal of Construction and Architecture*. 2009; 2(23):77-91. EDN KXDSLJ. (rus.).

Received March 1, 2024.

Adopted in revised form on April 14, 2024.

Approved for publication on April 17, 2024.

B I O N O T E S: **Ivan V. Astakhov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor in the Department of Metal and Wooden Structures; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 8747-6048; 3557710@mail.ru;

Denis V. Kaliuzhny — postgraduate student at the Department of Structural Mechanics; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 4788-9567; kaliuzhnydv@gmail.com.

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

The authors declare no conflict of interest.

Разработка вяжущего вещества на основе фосфогипса, твердеющего по смешанному типу

Тамара Алексеевна Бахтина, Николай Владимирович Любомирский,
Александр Сергеевич Бахтин, Герман Русланович Биленко,
Иван Анатольевич Тюнюков

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского);
г. Симферополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Создание безотходных технологий производства малоэнергоемких строительных материалов и изделий с вовлечением в повторную переработку вторичных сырьевых ресурсов является одним из приоритетных направлений развития экономики большинства стран. В связи с этим актуальной является задача разработки конкурентоспособных вяжущих веществ на основе фосфогипса (ФГ) с добавлением гидратной извести путем проектирования рациональных составов фосфогипсо-известковых композиций, твердеющих по смешанному типу.

Материалы и методы. В качестве вторичного сульфатсодержащего сырья использовали отвальный ФГ предприятия ООО «Титановые инвестиции», г. Армянск. Гидратную известь для исследований получали путем гашения комовой извести, производимой в шахтных печах известкового цеха АО «Крымский содовый завод», г. Красноперекоск. Анализ минералогического состава ФГ и искусственного камня на его основе проводили с помощью синхронного TG-DTA/DSC термического анализа на анализаторе STA 8000 (Perkin Elmer). Дисперсный состав ФГ и гидратной извести устанавливали методом лазерной дифракции на лазерном анализаторе размеров частиц Partica LA-960 (Horiba). Определение механических характеристик опытных образцов выполняли на базе консоли управления MCC8 (Controls).

Результаты. Результаты разработки составов на основе фосфогипсо-известковых композиций показали, что после принудительной карбонизации данных составов в течение 180 мин в воздушно-газовой среде с 50 %-ной концентрацией CO_2 можно получить водостойкий каменный материал (K_0 0,78–0,8) с прочностью при сжатии 28–32 МПа, средней плотностью 1750–1780 кг/м³ и водопоглощением по массе и объему 11–15 и 19–26 % соответственно.

Выводы. Вероятно, дополнительная оптимизация условий получения образцов (давление прессования, водосодержание смеси, введение заполнителя), режима принудительного карбонатного твердения (время твердения, концентрация CO_2) позволит еще повысить исследуемые свойства получаемого каменного материала. Полученные экспериментальные данные позволяют предположить, что на основе предлагаемого вяжущего возможно производство определенной номенклатуры мелкоштучных стеновых изделий с учетом проведения дополнительных научных исследований в этой области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фосфогипс, гидратная известь, принудительная карбонизация, смешанное твердение, прочность, водостойкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бахтина Т.А., Любомирский Н.В., Бахтин А.С., Биленко Г.Р., Тюнюков И.А. Разработка вяжущего вещества на основе фосфогипса, твердеющего по смешанному типу // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1301–1316. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1301-1316

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Бахтин, aleserba@mail.ru.

Development of binder based on phosphogypsum hardening by mixed type

Tamara A. Bakhtina, Nikolay V. Lyubomirskiy, Aleksandr S. Bakhtin,
Herman R. Bilenko, Ivan A. Tyunyukov
V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Creation of waste-free technologies for production of low-energy building materials and products involving recycling of secondary raw materials is one of the priority areas of economic development in most countries. In this regard, the urgent task is to develop competitive binders based on phosphogypsum with the addition of hydrated lime by designing rational compositions of phosphogypsum-lime compositions hardening by mixed type.

Materials and methods. Waste phosphogypsum from Titanium Investments LLC, Armyansk, was used as a secondary sulfate-containing raw material. Hydrated lime for research was obtained by slaking lump lime produced in shaft furnaces

of the lime workshop of Crimean Soda Plant JSC, Krasnoperekopsk. Analysis of the mineralogical composition of phosphogypsum and artificial stone based on it was carried out using synchronous TG-DTA/DSC thermal analysis on an STA 8000 analyzer (Perkin Elmer). The dispersed composition of phosphogypsum and hydrated lime was determined by laser diffraction using a Partica LA-960 laser particle size analyzer (Horiba). The determination of the mechanical characteristics of the prototypes was carried out on the basis of the MCC8 control console (Controls).

Results. The results of the development of compositions based on phosphogypsum-lime compositions showed that after forced carbonization of these compositions for 180 minutes in an air-gas environment with a 50 % CO₂ concentration, it is possible to obtain a water-resistant stone material (K_f 0.78–0.8) with strength at compression 28–32 MPa, average density 1,750–1,780 kg/m³ and water absorption by mass and volume of 11–15 and 19–26 %, respectively.

Conclusions. Probably, additional optimization of the conditions of obtaining samples (pressure, water content of the mixture, introduction of filler), the regime of forced carbonate hardening (hardening time, CO₂ concentration) will further improve the studied properties of the resulting stone material. The obtained experimental data suggest that, based on the proposed binder, it is possible to produce a certain range of small-piece wall products, taking into account additional scientific research in this area.

KEYWORDS: phosphogypsum, hydrated lime, forced carbonization, mixed hardening, strength, water resistance

FOR CITATION: Bakhtina T.A., Lyubomirskiy N.V., Bakhtin A.S., Bilenko H.R., Tyunyukov I.A. Development of binder based on phosphogypsum hardening by mixed type. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1301-1316. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1301-1316 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr S. Bakhtin, aleserba@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях резкого роста нестабильности в мировой экономике и усиления признаков истощения первичных природных ресурсов все более отчетливо звучит призыв международных профильных ведомств к новой экономической модели. В процессе эволюции и диверсификации промышленная экономика практически никогда не выходила за рамки одной основной характерной черты, приобретенной ею на заре индустриализации: линейной модели потребления природных ресурсов, которая следует принципу «take – make – waste» (создать – использовать – утилизировать). Однако такая линейная модель производства и потребления в итоге привела к экологическим и климатическим проблемам в региональном и мировом масштабах. Отказ от линейных принципов хозяйствования наряду с декарбонизацией промышленного и энергетического секторов экономики служит одним из главных факторов, определяющих направление трансформации нынешней экономики, которая должна стать экологически устойчивой и укладывающейся в материальные рамки, существующие на нашей планете. В данном контексте следует подчеркнуть особую роль промышленности строительных материалов и изделий как наиболее материалоемкой среди других отраслей по объему и разнообразию потребления ресурсов как собственной, так и целого ряда других отраслей, и определяющей текущее состояние экономики и потенциал ее развития. Соответственно, создание безотходных технологий производства малоэнергоёмких строительных материалов и изделий с вовлечением в повторную переработку вторичных сырьевых ресурсов, в том числе газообразных, является одним из приоритетных направлений развития экономики большинства развивающихся стран. Такой подход обуславливает реализацию сразу двух принципов рационального природопользования: 1) происходит вовлечение в производственный цикл

вторичных сырьевых ресурсов, находящихся в отходах предприятий; 2) переработка этого вторичного сырья в определенные целевые продукты не сопряжена с выбросами углекислого газа в атмосферу, а также предполагает использование техногенного CO₂ в качестве сырьевого компонента с переводом его в термодинамически стабильные соединения, обладающие вяжущими свойствами и способствующие повышению, например, механических и гидрофизических свойств полученных материалов.

На современном этапе развития промышленное производство большинства строительных материалов и изделий связано с высокотемпературными технологическими процессами, которые в свою очередь служат источниками выбросов CO₂ или при сжигании топлива, или при выделении CO₂ из сырьевых компонентов в процессе их обжига, а также наложении указанных процессов друг на друга. При этом в качестве исходного сырья в производственных технологиях, как правило, используют первичное природное минеральное сырье, а применение и переработка вторичного сырья, способного заменить природное сырье без ухудшения качества конечного продукта, развито слабо. Суммарное количественное выделение CO₂ в технологической цепи «сырье – материалы – изделия» используется в расчете так называемого «углеродного следа» различных материалов. Естественно, чем ниже эмиссия CO₂ при производстве определенного материала, тем более «углеродпозитивным» считается полученный конечный продукт. Таким образом, для получения материалов с низкой эмиссией CO₂ в основном необходимо либо исключать высокотемпературные технологические процессы, либо оптимизировать исходный сырьевой состав для их производства, в том числе через использование вторичного сырья, подходящего по химическому и минералогическому составу для производства конкретного продукта. Также возможно применять сырьевые составы, интенсивное твердение которых

происходит за счет взаимодействия с газообразным CO_2 и переводом его в стабильные, термодинамически устойчивые соединения, обладающие вяжущими свойствами, т.е. использовать техногенный CO_2 в качестве сырьевого компонента, обуславливающего процессы твердения определенных неорганических веществ.

Перспективными с такой комплексной точки зрения являются, например, вяжущие вещества на основе фосфогипса (ФГ) и гидратной извести. Фосфогипс в отвалах предприятий в большом количестве накоплен на территории Российской Федерации. В частности, на территории Республики Крым за период работы с 1971 г. по настоящее время на предприятии Крымского государственного производственного объединения «ТИТАН» (КГПО «ТИТАН»), а в последующем ООО «Титановые инвестиции», г. Армянск, в отвалах накоплено порядка 22 млн т ФГ. Переработка данного вида вторичного сырья не производится, и происходит его планомерное накопление в отвалах предприятия.

Фосфогипс — промышленный отход, образующийся при мокром процессе производства фосфорной кислоты [1]. Постоянный рост производства фосфорных удобрений за последние десятилетия привел к резкому росту выбросов ФГ во многих странах мира [2]. В среднем из каждой тонны произведенной фосфорной кислоты образуется 4,5–5 т ФГ [3, 4]. В РФ ежегодно образуется 15 млн т ФГ, и масса отходов в накопителях промышленных предприятий превышает 400 млн т [5]. Накопленный ФГ преимущественно хранится на открытом воздухе, занимая много земли. По химическому составу он аналогичен природному гипсу и на долю $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ приходится более 90 %, но вредные примеси в ФГ, такие как растворимый фосфор, растворимый фтор, эвтектический фосфор, а также следовые количества тяжелых металлов и радионуклиды, вызывают экологические проблемы — загрязнение воздуха, воды и почвы [6, 7]. При этом ежегодный комплексный коэффициент использования ФГ составляет всего около 10 %, а применяемые технологии и процессы не развиты полноценно [8, 9].

В настоящее время тремя основными направлениями использования ФГ являются сельское хозяйство, химическая промышленность и производство строительных материалов [10]. Применение ФГ в строительных материалах получило наибольшее распространение ввиду широкого использования гипсовых материалов. Основные направления разработок применения ФГ связаны с традиционными направлениями использования строительного гипса в качестве возможной замены последнего. Например, ведутся исследования по использованию ФГ в качестве замедлителя схватывания цемента [11–13], для производства гипсокартона [14], шпаклевок и краски [15], дорожного строительства и соз-

дания битумоминеральных композиций [16, 17]. Как показали исследования, прямое использование ФГ в качестве замедлителя схватывания затруднено из-за вредных примесей. Так, растворимый фосфор и растворимый фтор, присутствующие в ФГ, реагируют с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образующимся при гидратации цемента, и, в свою очередь, образуют осадки фосфата кальция и фторида кальция. Эти осадки покрывают поверхность частиц цемента, тем самым ограничивая гидратацию цемента и приводя к ухудшению характеристик цемента, таким как увеличение времени схватывания и низкая начальная прочность [11]. Поэтому для использования ФГ в качестве замедлителя схватывания цемента необходима его предварительная обработка, которая включает промывку водой, флотацию, шаровую мельницу и прокаливание [18]. На ОАО «Гомельский химический завод» для связывания примесей полугидрата ФГ предусмотрен ввод нейтрализующего реагента — порошкообразной гидратной извести [19]. Показано, что во время хранения нейтрализованного полугидрата ФГ происходит связывание водорастворимых фосфорных и фтористых соединений. К 14 суткам все водорастворимые фосфаты переходят в трехзамещенный фосфат кальция. Полного связывания водорастворимых фторидов не происходит, но в несколько раз снижается их содержание. При хранении в буртах происходит рост прочности нейтрализованного полугидрата ФГ и его свойства приближаются к свойствам природного гипса. Установлено, что динамика твердения цементов с использованием в качестве гипсового компонента искусственного камня на основе нейтрализованного полугидрата фосфогипса не отличается от таковой для цементов на основе природного гипсового камня как по скорости гидратации основных клинкерных минералов, так и по образованию гидрата оксида кальция и этtringита.

Помимо указанных направлений, в последние годы ведутся разработки по изготовлению стеновых материалов (кирпичей, блоков, плитки) с добавкой или на основе ФГ. Легкие плиты изготавливали из смеси ФГ и цемента, золы уноса и стекловолокна [20]. Было установлено, что оптимальное количество ФГ в сырьевой смеси составляет 5 %. При увеличении содержания ФГ прочность при сжатии снижается.

В работе [21] представлены исследования по применению ФГ для производства обожженных пустотелых керамических кирпичей. Фосфогипс вводили в различных массовых долях (от 5 до 40 %) в качестве замены песка в рецептуре кирпича. При содержании ФГ до 30 % мас. физико-механические свойства кирпичей удовлетворяли нормативным требованиям, дальнейшее увеличение количества ФГ приводит к снижению прочности кирпичей. Изучено изготовление необожженных кирпичей из ФГ методом гидратации-перекристаллизации [22, 23]. Определено, что оптимальным содержани-

ем компонентов смеси является 75,0 % ФГ, 19,5 % речного песка, 4,0 % портландцемента и 1,5 % гашеной извести, а соответствующие предел прочности при сжатии, водонасыщенном сжатии и изгибе кирпича в исходном состоянии составляют 21,8, 13,7 и 5,2 МПа.

На базе Воронежского государственного архитектурно-строительного университета разработана безобжиговая технология получения мелкоштучных стеновых материалов на линии производства силикатного кирпича [24]. Сырьевая смесь состояла из 10 % негашеной извести, 60 % ФГ и 30 % супеси песчаного карьера. Таким образом получали блоки со следующими характеристиками: прочность при сжатии — 3 МПа, плотность — 1700 кг/м³, водопоглощение — 23 %.

Проведенный литературный обзор показал, что крупнотоннажного производства вяжущих веществ или строительных изделий, основой которых являлся бы ФГ, не существует, а имеющиеся направления научных исследований в большинстве своем определяют роль ФГ как добавки в системах на основе портландцемента. Исключением могут быть труды [22–24], в которых основой композиционных вяжущих является ФГ, однако показатели прочности, водопоглощения и в особенности водостойкости материала полученных изделий требуют количественного улучшения. В качестве классических вариантов улучшение параметров указанных свойств, в особенности гидрофизических, возможно путем гидрофобизации изделий; введения в сырьевую смесь модифицирующих добавок, способствующих повышению плотности материала; снижения водопоглощения, а соответственно и снижения растворимости дигидрата сульфата кальция, за счет направленного формирования нерастворимых соединений на поверхности растворимых кристаллов $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Актуально с этой точки зрения использование техногенного газообразного CO_2 в качестве сырьевого компонента, обуславливающего процессы карбонатного твердения определенных неорганических веществ (например, гидратной извести) в композиционном вяжущем на основе ФГ, что в конечном итоге будет способствовать получению прочного и водостойкого каменного материала и строительных изделий на его основе.

Таким образом, ФГ является одним из оптимальных вторичных материальных ресурсов, применение которого совместно с гидратной известью и техногенным CO_2 в комплексе будет способствовать снижению экологической нагрузки и получению малоэнергоемкого вяжущего вещества и строительных изделий на его основе с низким углеродным следом.

Цель исследования — разработка фосфогипсо-известкового вяжущего, твердеющего по смешанному типу, и изучение эффективности одновременного протекания в системе двух типов твердения — ги-

дратационного и карбонатного для сульфатсодержащего и известкового компонентов сырьевой смеси соответственно. Основная задача на данном этапе исследований — установление принципиальной возможности протекания в исследуемой системе двух типов твердения, в особенности карбонатного для гидратной извести, посредством установления эффективности улучшения механических и в особенности гидрофизических свойств материала в зависимости от качественного протекания химической реакции карбонизации известкового компонента разрабатываемого вяжущего.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве вторичного сульфатсодержащего сырья использовали отвальный ФГ предприятия ООО «Титановые инвестиции», г. Армянск, который получают в процессе переработки апатитового сырья Кольского п-ова при производстве фосфорной кислоты. Гипсовое вяжущее из ФГ получали путем его термической обработки в разработанном авторами лабораторном вращающемся сушильном барабане при температуре 120–140 °С и атмосферном давлении в течение 60 мин. После завершения термической обработки ФГ выгружался в герметичную емкость, в которой выдерживался в течение 24 ч. Далее полученный полуводный ФГ использовался совместно с высушенной гидратной известью в пропорциях, соответствующих принятому плану эксперимента. Общий вид мест отбора отвального ФГ и лабораторного вращающегося сушильного барабана представлен на рис. 1. Глубина отбора пробы ФГ составила не более 2,1 м.

Гидратную известь для исследований получали путем гашения комовой извести, производимой в шахтных печах известкового цеха АО «Крымский содовый завод», г. Краснопереконск. Продукт гашения с целью удаления примесей в виде «недожога» и непогасившихся зерен просеивали через сито с размером отверстий 1,25 мм. Полученную после просеивания гидратную известь сушили до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 105 °С. Комовая известь характеризовалась следующими показателями: активность — 83 %; время гашения — 120 с; температура гашения — 97 °С.

Анализ минералогического состава ФГ проведен с помощью синхронного TG-DTA/DSC термического анализа на анализаторе STA 8000 (Perkin Elmer) в интервале температур 30–1000 °С при скорости нагрева 10 °С/мин, в динамической среде азота. Расчет изменения массы на TG кривой выполнили в программном комплексе Pyris 11 (Perkin Elmer) с помощью DTG кривой (для удобства визуального анализа на термограмме не представлена). Расчеты количественного содержания соответствующих минеральных фаз осуществили по стехиометрическим уравнениям. Для определения дисперсного состава ФГ и гидратной извести использовали ме-

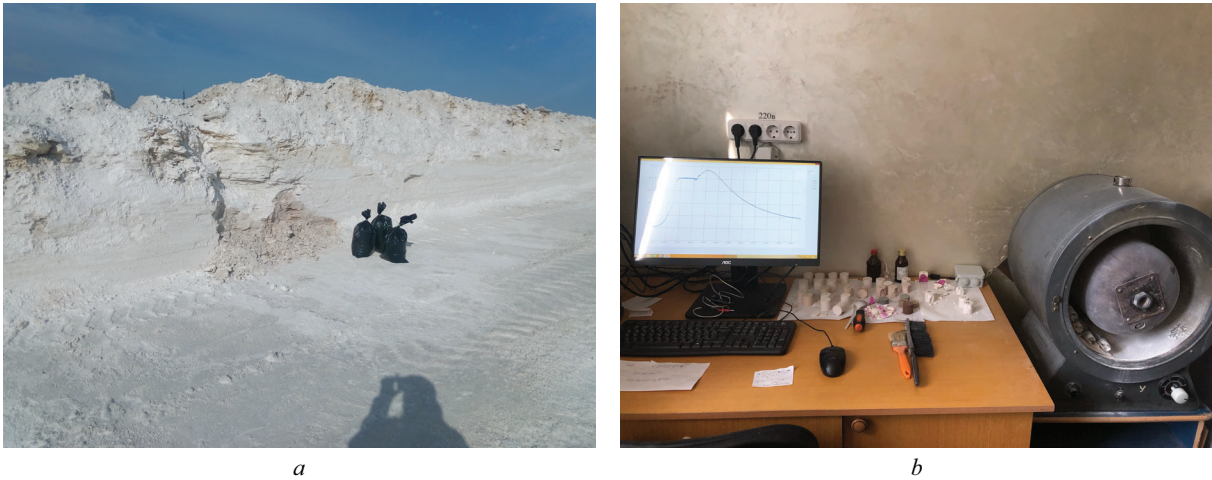


Рис. 1. Общий вид мест отбора отвального фосфогипса (а) и лабораторного вращающегося сушильного барабана (b)
Fig. 1. General view of the sites for collecting waste phosphogypsum (a) and the laboratory rotating drying drum (b)

тод лазерной дифракции на лазерном анализаторе размеров частиц Partica LA-960 (Horiba). Наличие вредных примесей в отвальном ФГ установили с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на ЭД-спектрометре Epsilon 3XLE (PANalytical). Определение удельной эффективной активности ЕРН ($A_{эфф}$) проводили методом гамма-спектрометрического анализа по ГОСТ 30108–94 в ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Крым и городе федерального значения Севастополе», г. Симферополь. Выявление механических характеристик опытных образцов осуществили с применением автоматической системы испытаний на базе консоли управления MCC8 (Controls). Гидрофизические свойства опытных образцов определяли по стандартным ме-

тодикам для строительных материалов. Качественное протекание реакции карбонизации устанавливали распылением 1 %-ного раствора фенолфталеина на скол образца.

Результаты термического анализа отвального ФГ представлены на рис. 2.

Согласно данным термического анализа (см. рис. 2), отвальный ФГ имеет несколько термических эффектов различной направленности. Эндотермический эффект в диапазоне температур 30–100 °С соответствует удалению свободной воды, характеризующей естественную влажность отвального ФГ на момент отбора пробы. Характерный эндотермический эффект в диапазоне температур 100–220 °С, характеризующийся раздвоением в диапазоне тем-

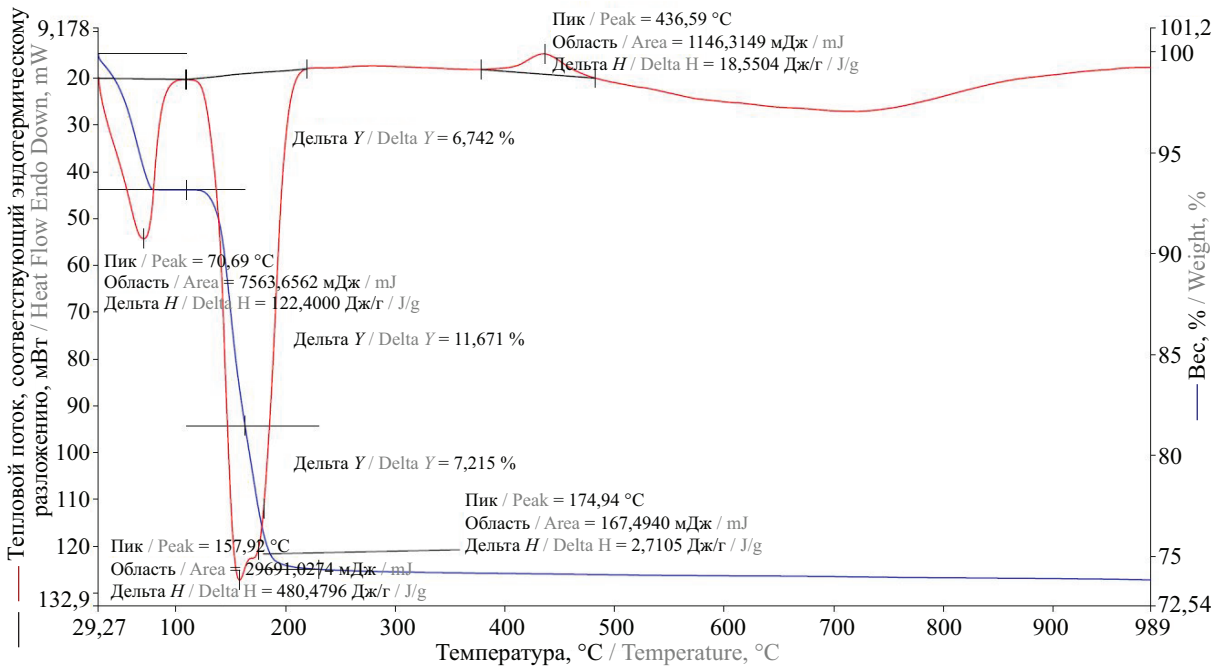


Рис. 2. Термограмма отвального фосфогипса
Fig. 2. Thermogram of the dump phosphogypsum

Табл. 1. Качественные показатели отвального фосфогипса

Table 1. Qualitative indicators of dump phosphogypsum

Наименование показателей, единицы измерения / Name of indicators, units of measurement	Результат / Result
Содержание кристаллизационной воды, % мас. / Crystallisation water content, % wt.	18,89
Содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, % мас. / $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ content, % wt.	90,27
Массовая доля общих фосфатов (P_2O_5) на сухое вещество, % / Mass fraction of total phosphates (P_2O_5) per dry substance, %	0,556
Массовая доля общих фторидов (в пересчете на F), % / Mass fraction of total fluorides (in terms of F), %	0,6
Массовая доля кадмия (Cd), мг/кг / Mass fraction of cadmium (Cd), mg/kg	0,00009
Массовая доля свинца (Pb), мг/кг / Mass fraction of lead (Pb), mg/kg	0,00021
Массовая доля мышьяка (As), мг/кг / Mass fraction of arsenic (As), mg/kg	0,0001
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов ($A_{\text{эфф}}$), Бк/кг / Specific effective activity of natural radionuclides (A_{eff}), Bq/kg	310,0

ператур 100–170 °С и 170–220 °С, соответствует дегидратации двухводного ФГ до полугидрата (100–170 °С) и полному обезвоживанию (170–220 °С). Экзотермический эффект в диапазоне температур 380–480 °С является характерным для гипсосодержащего сырья и соответствует перестройке кристаллической решетки в ангидритовую.

Таким образом, данные термического анализа стали основой для выбора температуры получения полуводного ФГ в лабораторном вращающемся сушильном барабане, которая составила 120–140 °С. Рассчитанное по результатам термического анализа количество кристаллизационной воды, а также дополнительные качественные характеристики отвального ФГ представлены в табл. 1.

Согласно данным, представленным в табл. 1¹, исследуемый отвальный ФГ можно отнести ко второму

¹ ГОСТ 4013–2019 «Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия».

сорт, удельная эффективная активность ЕРН $A_{\text{эфф}}$ соответствует I классу материалов. Согласно ГОСТ 125–2018 «Вяжущие гипсовые. Технические условия», данный отвальный ФГ пригоден для производства гипсовых вяжущих.

Кривые дифференциального и интегрального распределения размеров частиц ФГ и гидратной извести представлены на рис. 3. Согласно данным анализа, диапазон размеров частиц фосфогипса составил 5–450 мкм, средний размер частиц — 65 мкм. Для гидратной извести аналогичные показатели составили 1,7–345 мкм и 37 мкм соответственно.

Для определения зависимостей изменения свойств разрабатываемого вяжущего вещества на основе ФГ использовался ортогональный центральный композиционный план второго порядка. На основании предыдущих исследований [25] в качестве варьируемых факторов принимались — количество вводимой гидратной извести (X_1) и водосодержание сырьевой смеси (X_2). Количество вводимой гидратной извести варьировалось в пределах 10–50 %

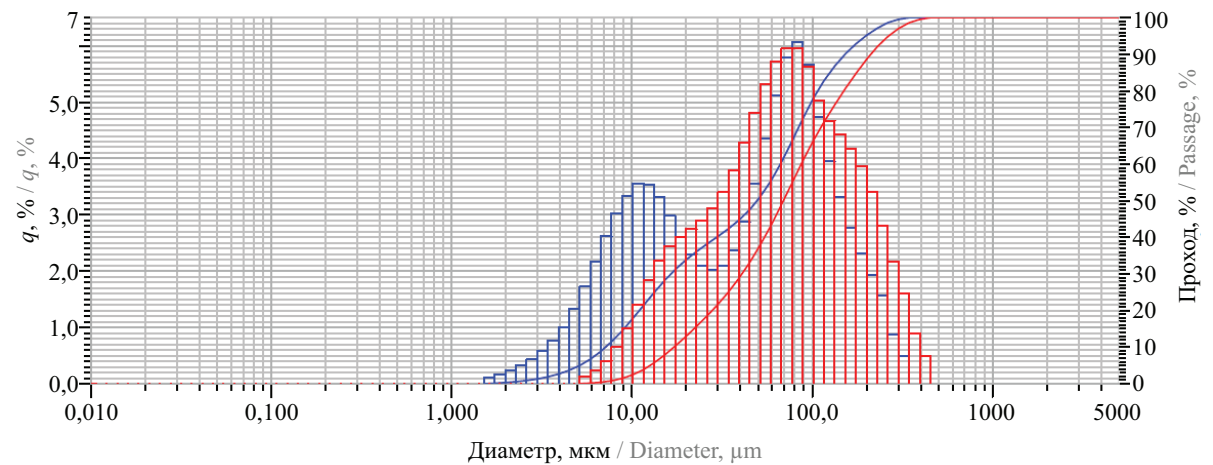


Рис. 3. Дисперсный состав отвального фосфогипса и гидратной извести: фосфогипс — красный цвет; гидратная известь — синий цвет

Fig. 3. Dispersed composition of waste phosphogypsum and hydrated lime: phosphogypsum — red colour; hydrated lime — blue colour

Табл. 2. Исходные данные и интервалы варьирования факторов

Table 2. Initial data and factor variation intervals

Факторы (наименование) Factors (designation)	Единица измерения Unit of measurement	Код Code	Уровни варьирования Variation levels			Интервал варьирования Variation interval
			–1	0	+1	
Количество вводимой извести Amount of lime input	%	X1	10	30	50	20
Водосодержание сырьевой смеси Water content of the raw material mixture	%	X2	18	23	28	5

от массы ФГ, водосодержание смеси — 18–28 % от массы сухой сырьевой смеси. Из увлажненной и перемешанной сырьевой смеси методом полусухого прессования (удельное давление прессования 30 МПа) изготавливали образцы-цилиндры диаметром и высотой 30 мм. Исходные данные и интервалы варьирования приведены в табл. 2.

В результате обработки опытных данных формируются экспериментально-статистические модели каждого исследуемого параметра, представляющие собой полиномы (уравнения) второго порядка, следующего вида:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 + \sum_{i,l=1}^n b_{il} X_i X_l,$$

(1)

где b_0, b_i, b_{ii}, b_{il} — коэффициенты корреляции, определяемые в результате математически-статистической обработки экспериментальных данных; X_i, X_l — значение варьируемых рецептурно-технологических факторов.

В каждой точке плана образцы делили на две группы — 1-я группа естественного твердения и 2-я группа — принудительно карбонизированные. Образцы 1-й группы сразу после формования помещались в эксикатор и выдерживались в нем в течение 24 ч, после чего их помещали в сушильный шкаф и высушивали при температуре 43 °С до по-

стоянной массы, далее эти образцы подвергались испытаниям в соответствии с планом. Образцы 2-й группы сразу после формования помещали в эксикатор на 90 мин для прохождения реакции гидратации полуводного ФГ. По истечении этого времени данные образцы помещались в камеру принудительной карбонизации, где их выдерживали в течение 180 мин при 50 %-ной концентрации CO₂. Затем образцы высушивали до постоянной массы по методике, аналогичной для 1-й группы. Образцы из 2-й группы испытывали в возрасте 1 сут и дополнительно в 28 сут твердения. Испытания в 28 суток были запланированы для исследования стабильности свойств, полученных в возрасте 1 сут с течением времени. Образцы из 1-й группы испытывали только в возрасте 1 сут для получения сравнительных характеристик с целью подтверждения эффективности влияния карбонатного твердения на свойства полученного материала. Схема и общий вид разработанной авторами камеры принудительной карбонизации представлены на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для установления эффективности одновременного протекания в системе двух типов твердения — гидратационного и карбонатного для сульфатсодержащего и известкового компонентов сырьевой смеси



Рис. 4. Схема (а) и общий вид (б) камеры принудительной карбонизации

Fig. 4. Scheme (a) and general view (b) of the forced carbonization chamber

соответственно определяли физико-механические показатели опытных образцов цилиндров до и после карбонизации. В табл. 3, 4 представлены данные по экспериментальному определению физико-механических и гидрофизических свойств фосфогипсо-известковых образцов в зависимости от изменения варьируемых факторов — водосодержания сырьевой смеси и количества вводимой гидратной извести. Сравнивая полученные результаты, можно сделать вывод, что прочность при сжатии и водо-

Табл. 3. Матрица планирования и экспериментальные данные не карбонизированных фосфогипсо-известковых образцов-цилиндров

Table 3. Planning matrix and experimental data of non-carbonized phosphogypsum-calcareous cylinder samples

Кодированные значения факторов / Coded values of factors		Натуральные величины факторов Natural values of factors		Анализируемые параметры в зависимости от исследуемых факторов Analyzed parameters depending on the investigated factors				
		Количество вводимой извести, %, X1 Amount of lime input, %, X1	Водосодержание сырьевой смеси, %, X2 Water content of raw material mixture, %, X2	$R_{сж}, \text{МПа}$ $R_{comp}, \text{МПа}$	$\rho_o, \text{г/см}^3$ $\rho_o, \text{g/cm}^3$	K_p	$W_m, \%$	$W_o, \%$
X1	X2			1 сут day				
–1	–1	10	18	21,4	1683	0,61	14,1	22,8
+1	–1	50	18	13,8	1458	0,56	20,7	32,7
–1	+1	10	28	21,1	1703	0,55	12,1	18,1
+1	+1	50	28	20,2	1509	0,41	17,9	25,4
–1	0	10	23	29	1713	0,59	13,2	19,9
+1	0	50	23	20,3	1496	0,49	17,7	25,2
0	–1	30	18	17,3	1582	0,61	16,5	27,1
0	+1	30	28	24,5	1686	0,52	13,2	20,2
0	0	30	23	23,7	1619	0,55	14,3	23,3

Табл. 4. Матрица планирования и экспериментальные данные принудительно карбонизированных фосфогипсо-известковых образцов-цилиндров

Table 4. Planning matrix and experimental data of carbonized phosphogypsum-calcareous cylinder samples

Кодированные значения факторов Coded values of factors		Натуральные величины факторов Natural values of factors		Анализируемые параметры в зависимости от исследуемых факторов Analyzed parameters depending on the investigated factors									
		Количество вводимой извести, %, X1 / Amount of lime input, %, X1	Водосодержание сырьевой смеси, %, X2 / Water content of raw material mixture, %, X2	$R_{сж}, \text{ МПа}$ $R_{comp}, \text{ МПа}$		$\rho_o, \text{ г/см}^3$ $\rho_o, \text{ g/cm}^3$		K_p		$W_m, \%$		$W_o, \%$	
				1 сут / day	28 сут / day	1 сут / day	28 сут / day	1 сут / day	28 сут / day	1 сут / day	28 сут / day	1 сут / day	28 сут / day
X1	X2												
−1	−1	10	18	26,4	28,5	1748	1755	0,8	0,74	11,7	13,9	20,5	24,5
+1	−1	50	18	22	23,1	1658	1664	0,72	0,71	18,2	19,3	30,1	31,3
−1	+1	10	28	28,2	36,5	1750	1747	0,78	0,74	9,2	11,2	15,9	19,1
+1	+1	50	28	16,6	18,4	1568	1572	0,75	0,72	15,1	16,9	23,8	25,7
−1	0	10	23	31,7	36,4	1782	1776	0,71	0,66	10,2	12,5	18,4	22,1
+1	0	50	23	17,9	18,5	1606	1607	0,59	0,55	14,8	17,3	23,1	26,3
0	−1	30	18	31,1	33,6	1759	1752	0,7	0,67	14,1	15,1	24,8	26,2
0	+1	30	28	19	27,8	1700	1688	0,81	0,77	10,8	12,6	18,3	21,4
0	0	30	23	23,5	27,7	1714	1712	0,62	0,61	12,2	13,2	20,9	21,9

стойкость у карбонизированных образцов выше, чем у образцов, не подвергавшихся карбонизации. Прочность при сжатии карбонизированных фосфогипсо-известковых образцов выше на 4–10 МПа в зависимости от условий получения. Средняя плотность карбонизированных образцов также повышается (до 11 %) за счет связывания гидроксидом кальция углекислого газа и образования в системе карбоната кальция. Благодаря увеличению средней плотности снижаются водопоглощение по массе и объему карбонизированных образцов по сравнению с не карбонизированными. Исключение составляют только те точки, в составе сырьевой смеси которых присутствует максимальное количество гидратной извести — 50 % и минимальное количество воды — 18 %. Связано это, скорее всего, с недостаточной степенью прохождения реакции карбонизации для таких составов смеси, поскольку увеличение количества гидратной извести с более мелкими частицами способствует получению после прессования плотной структуры образца. В результате доступ CO_2 к внутреннему объему системы ограничивается и эффективность карбонатного твердения также снижается.

На основе экспериментальных данных о физико-механических и гидрофизических свойствах карбонизированных образцов-цилиндров (табл. 4) получены коэффициенты экспериментально-статистических моделей. Далее представлены уравнения регрессии изменения указанных свойств образцов после 1 сут твердения:

- прочность при сжатии:

$$R_{\text{сж}} = 24,3 - 9,9X_1 - 5,2X_2 - 0,8X_1^2 - 0,3X_2^2 - 3,6X_1X_2;$$
- средняя плотность: $\rho_0 = 1722,1 - 149,3X_1 - 49X_2 - 72,5X_1^2 - 1,5X_2^2 - 46X_1X_2;$
- коэффициент размягчения:

$$\rho_0 = 1722,1 - 149,3X_1 - 49X_2 - 72,5X_1^2 - 1,5X_2^2 - 46X_1X_2;$$
- водопоглощение по массе:

$$W_m = 11,9 + 5,6X_1 - 2,9X_2 + 1,5X_1^2 + 1,4X_2^2 - 0,3X_1X_2;$$
- водопоглощение по объему:

$$W_o = 20,5 + 7,4X_1 - 5,8X_2 + 1X_1^2 + 2,6X_2^2 - 0,8X_1X_2.$$

Анализ экспериментально-статистической модели основных свойств опытных образцов показал, что наибольшее влияние на формирование свойств карбонизированных фосфогипсо-известковых композиций оказывает количество вводимой гидратной извести (X_1). Увеличение содержания извести в составах формовочных смесей (коэффициент $b_1 = -9,9$) приводит к снижению прочностных показателей и уменьшению средней плотности материала, повышению водопоглощения по массе и уменьшает толщину карбонизированного слоя образцов, снижая их водостойкость.

В значительной степени формирование карбонатной структуры материала опытных образцов зависит от фактора начального водосодержания формовочных смесей X_2 (коэффициент $b_2 = -5,2$). С увеличением водосодержания в системе у фосфогипсо-известковых образцов уменьшается карбонизированный слой и снижается прочность на сжатие.

Коэффициент совместного влияния ($b_{12} = -3,6$) также показывает, что одновременное увеличение содержания извести и водосодержания формовочной смеси приводит к снижению прочности и водостойкости опытных образцов.

О степени карбонизации известковой составляющей в опытных фосфогипсо-известковых образцах косвенно можно судить по изменению величины карбонизированного слоя (рис. 5).

Из приведенных на рис. 5 данных видно, что образование карбонатного камня при карбонизационном твердении фосфогипсо-известкового вяжущего начинается с поверхности образцов, постепенно продвигаясь вглубь образца. Степень карбонизации фосфогипсо-известковой композиции зависит от всех исследуемых рецептурно-технологических факторов. С увеличением содержания гидратной извести толщина карбонизированного слоя в опытных образцах уменьшается. Введение большего количества мелкодисперсной гидратной извести приводит к уплотнению структуры, что затрудняет движение углекислого газа по порам в объеме материала. При увеличении водосодержания с 18 до 28 % также наблюдается снижение степени карбонизации. Таким образом следует, что одновременное увеличение количества извести и содержания воды приводит к уменьшению размера пор либо заполнению их водой и, как следствие, препятствует проникновению углекислого газа внутрь образца.

Подробный анализ полученных экспериментальных данных (см. табл. 3) позволил установить, что эффективное улучшение свойств исследуемых образцов на основе ФГ и гидратной извести наблюдается при увеличении содержания извести в смеси до 30 %. Дальнейшее увеличение извести до 50 % приводит к ухудшению исследуемых показателей. В связи с этим в качестве сравнительного анализа был проведен термический анализ карбонизированного слоя образцов из точки плана 1 и 7 (рис. 6).

Результаты проведенного термического анализа представлены на рис. 7, 8.

Термограмма пробы из точки № 1 имеет характерный эндотермический эффект в диапазоне температур 100–220 °С. Данный эндотермический эффект, наблюдаемый при температуре 100–220 °С, соответствует дегидратации двухводного гипса до полностью обезвоженного β -полугидрата. Суммарная потеря массы в этом температурном диапазоне составила 13,098 %, что соответствует примерно 90–92 % содержания двухводного гипса. Экзотермический эффект в диапазоне температур

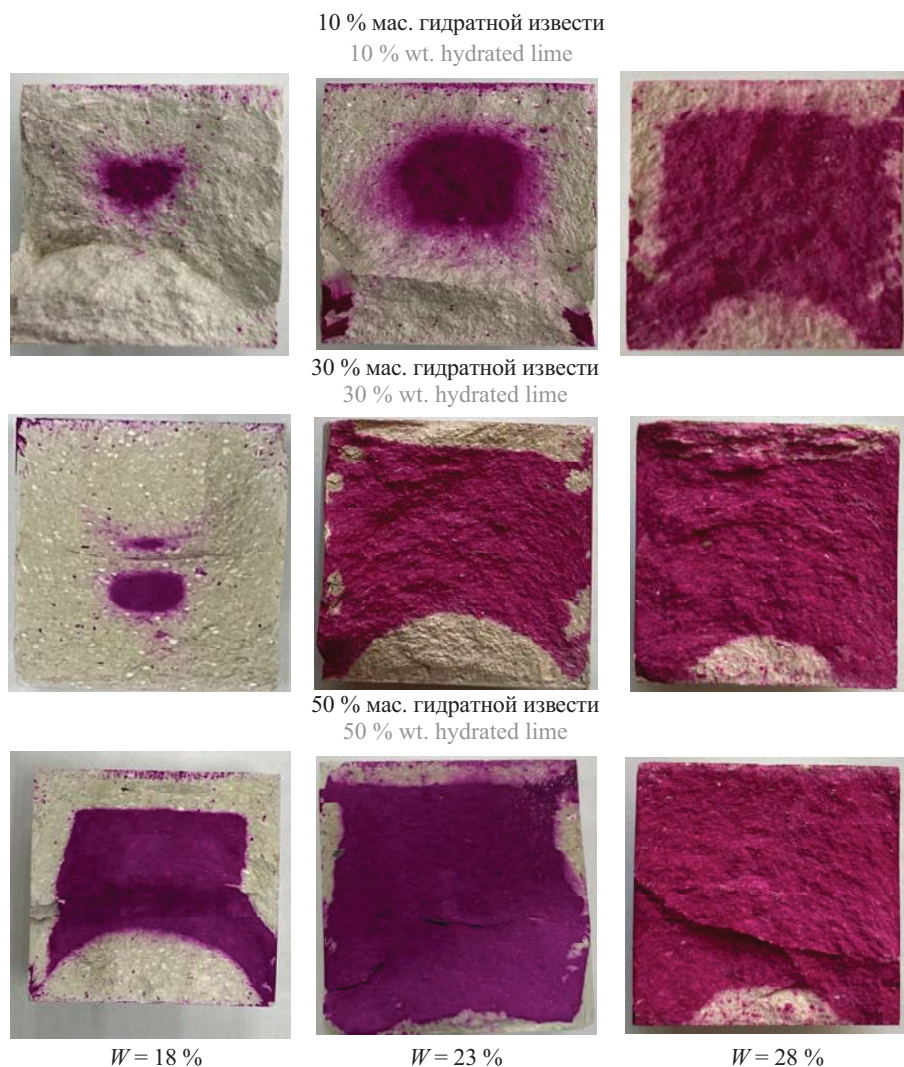


Рис. 5. Изменение толщины карбонизированного слоя опытных образцов на основе фосфогипсо-известковых композиций, полученных при давлении прессования 30 МПа, в зависимости от содержания гидратной извести и начального водосодержания формовочной смеси после 1 сут твердения W , % мас.

Fig. 5. The change in the thickness of the carbonized layer of prototypes based on phosphogypsum-lime compositions obtained at a pressing pressure of 30 MPa after 1 day of hardening, depending on the content of hydrated lime and the initial water content of the molding mixture W , % by weight

380–410 °C соответствует перестройке кристаллической решетки в ангидритовую. Эндоэффект в диапазоне температур 650–750 °C соответствует разложению CaCO_3 , образованного в результате химической реакции $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CO_2 . Суммарная потеря массы в этом температурном диапазоне составила 3,704 %, что соответствует примерно 8,5–9,0 % содержания CaCO_3 в системе. Таким образом, соотношение двухводного гипса к карбонату кальция соответствует 90:10 % и повторяет заданный состав из точки плана № 1, но уже в виде продуктов гидратации и карбонизации сульфатсодержащего и известкового компонентов сырьевой смеси соответственно, т.е. смешанного типа твердения.

Термограмма пробы из точки № 7 имеет характерный эндотермический эффект в диапазоне температур 100–220 °C. Данный эндотермический

эффект соответствует дегидратации двухводного гипса до полностью обезвоженного β -полугидрата. Суммарная потеря массы в этом температурном диапазоне составила 10,452 %, что соответствует примерно 70–73 % содержания двухводного гипса. Экзотермический эффект в диапазоне температур 380–410 °C соответствует перестройке кристаллической решетки в ангидритовую. Эндоэффект в диапазоне температур 680–820 °C соответствует разложению CaCO_3 , образованного в результате химической реакции $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CO_2 . Суммарная потеря массы в этом температурном диапазоне составила 12,223 %, что соответствует примерно 27–30 % содержания CaCO_3 в системе. Соотношение двухводного гипса к карбонату кальция соответствует 70:30 % и повторяет заданный состав из точки плана № 7, но уже в виде продуктов гидратации

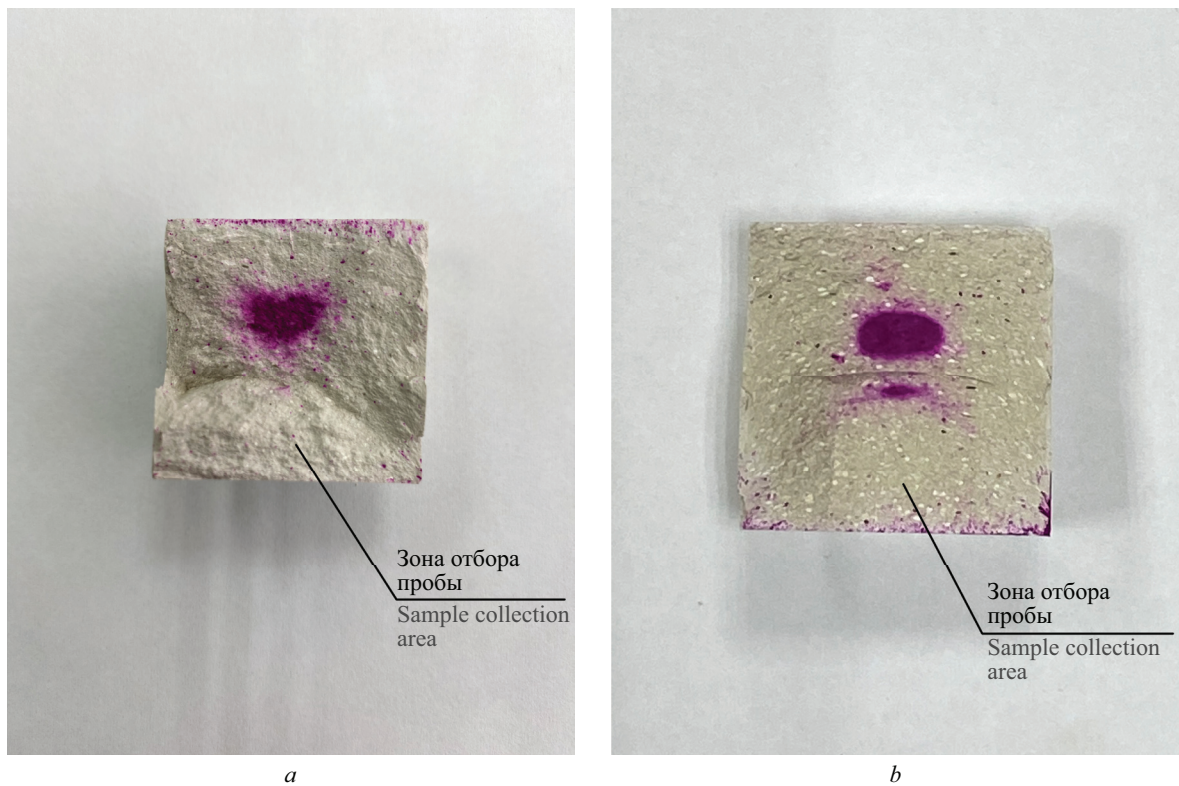


Рис. 6. Зоны отбора проб на сколах образцов для проведения термического анализа после 1 сут твердения: *a* — точка плана № 1 (см. табл. 4); *b* — точка плана № 7 (см. табл. 4)

Fig. 6. Sampling zones on chipped samples for thermal analysis after 1 day of hardening: *a* is the point of plan No. 1 (see Table 4); *b* is the point of plan No. 7 (see Table 4)

и карбонизации сульфатсодержащего и известкового компонентов сырьевой смеси соответственно, т.е. смешанного типа твердения. Следует отметить, что температурный интервал разложения CaCO_3 для точки № 7 сместился в зону более высоких значений, что также говорит о большем его количестве в системе.

Результаты термического анализа, а также физико-механических и гидрофизических испытаний подтверждают возможность последовательного про-

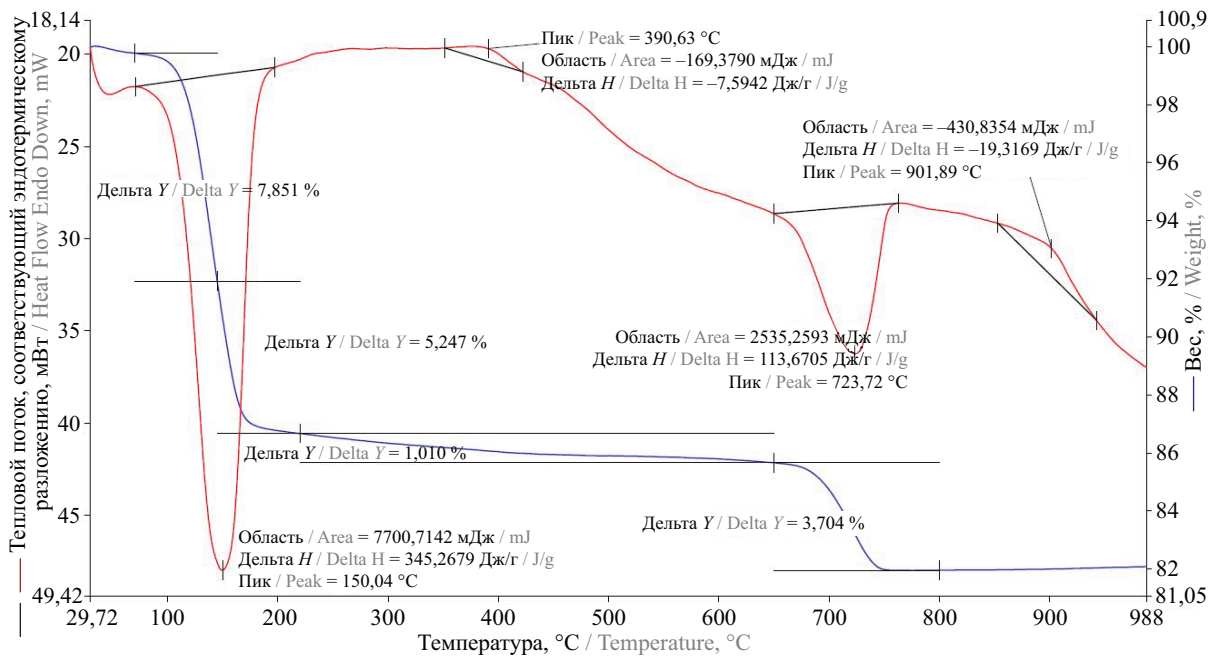


Рис. 7. Термограмма пробы из точки плана № 1 после 1 сут твердения

Fig. 7. Thermogram of the sample from plan point No. 1 after 1 day of hardening

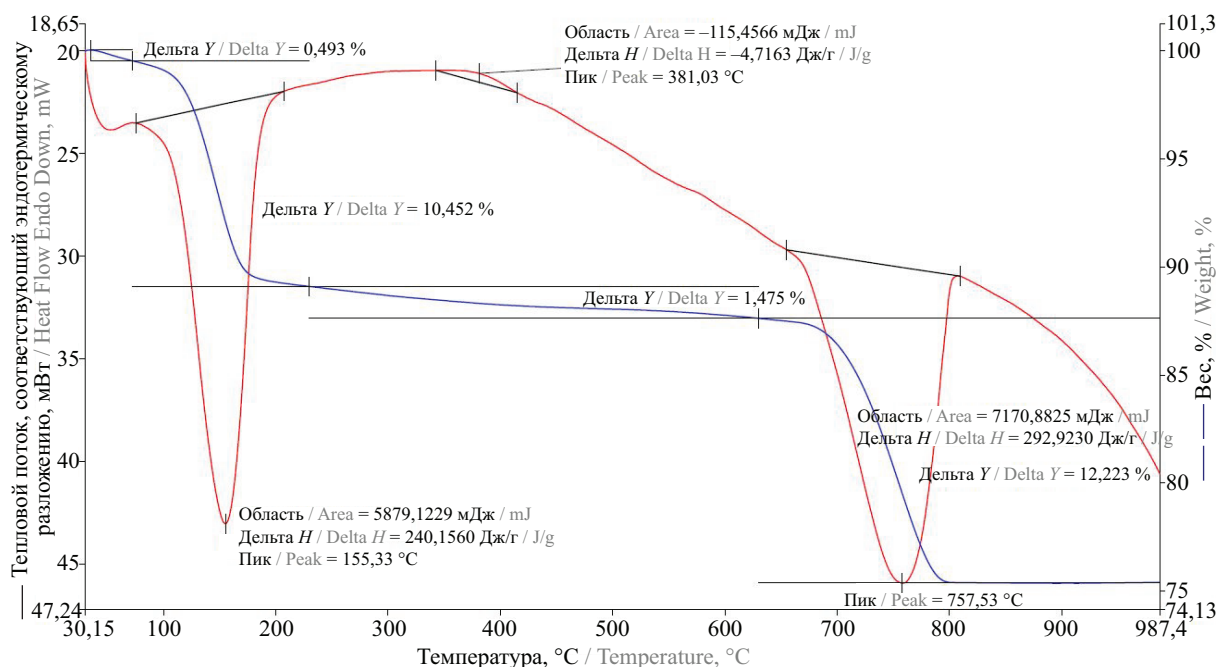


Рис. 8. Термограмма пробы из точки плана № 7 после 1 сут твердения

Fig. 8. Thermogram of the sample from plan point No. 7 after 1 day of hardening

текания гидратационного и карбонатного твердения для исследуемых сульфатсодержащего и известкового компонентов соответственно с получением искусственного прочного и водостойкого камня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании экспериментально-статистического моделирования разработаны оптимальные составы формовочных смесей на основе фосфогипсо-известковых композиций, обеспечивающие значительную прочность на сжатие, а также водостойкость полученного искусственного камня смешанного типа твердения. Результаты разработки составов на основе фосфогипсо-известковых композиций показали, что после принудительной карбонизации данных составов в течение 180 мин в воздушно-газовой среде с 50 %-ной концентрацией CO_2 можно получить водостойкий каменный ма-

териал ($K_p = 0,78\text{--}0,8$) с прочностью при сжатии 28–32 МПа. В соответствии с указанной величиной коэффициента размягчения данный материал можно классифицировать как повышено водостойкий ($0,6 < K_p < 0,8$). При этом для получения обозначенных физико-механических характеристик оптимальное содержание гидратной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в составах сырьевых смесей составляет 10–30 %.

Вероятно, дополнительная оптимизация условий получения образцов (давление прессования, водосодержание смеси, введение заполнителя), режима принудительного карбонатного твердения (время твердения, концентрация CO_2) позволит еще повысить исследуемые свойства получаемого каменного материала. Полученные экспериментальные данные позволяют предположить, что на основе предлагаемого вяжущего возможно производство определенной номенклатуры мелкоштучных стеновых изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Murali G., Azab M. Recent research in utilization of phosphogypsum as building materials : review // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 25. Pp. 960–987. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.05.272
2. Calderón-Morales B.R.S., García-Martínez A., Pineda P., García-Tenório R. Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: limits and potential in eco-efficient construction // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 44. P. 102506. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102506
3. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 166. Pp. 732–743. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.049
4. Wei Z.Q., Zhang Q., Li X.B. Crystallization kinetics of α -hemihydrate gypsum prepared by hydrothermal method in atmospheric salt solution medium // Crystals. 2021. Vol. 11. Issue 8. P. 843. DOI: 10.3390/cryst11080843
5. Мещеряков Ю.Г., Федоров С.В. Комплексная промышленная переработка хибинского апатитового концентрата // Повышение эффективности

производства и применения гипсовых материалов и изделий : мат. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 124–127.

6. Yang L., Zhang Y., Yan Y. Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 127. Pp. 204–213. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.054

7. Wei Z., Deng Z. Research hotspots and trends of comprehensive utilization of phosphogypsum: Bibliometric analysis // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022. Vol. 242. P. 106778. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106778

8. Macías F., Cánovas C.R., Cruz-Hernández P., Carrero S., Asta M.P., Nieto J.M. et al. An anomalous metal-rich phosphogypsum: Characterization and classification according to international regulations // *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 331. Pp. 99–108. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.02.015

9. Tian T., Yan Y., Hu Z., Xu Y., Chen Y., Shi J. Utilization of original phosphogypsum for the preparation of foam concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 115. Pp. 143–152. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.028

10. Li B., Li L., Chen X., Ma Y., Zhou M. Modification of phosphogypsum using circulating fluidized bed fly ash and carbide slag for use as cement retarder // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 338. P. 127630. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127630

11. Ильин А.П., Кочетков С.П., Брыль С.В., Рухлин Г.В. Проблемы и перспективы использования вторичных продуктов переработки природных фосфатов для получения строительных материалов // *Экология и строительство*. 2016. № 4. С. 21–29. EDN ZHLAPL.

12. Liu S., Fang P., Ren J., Li S. Application of lime neutralised phosphogypsum in supersulfated cement // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 272. P. 122660. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122660

13. Singh M. Treating waste phosphogypsum for cement and plaster manufacture // *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32. Issue 7. Pp. 1033–1038. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00723-8

14. Zhou J., Li X., Zhao Y., Shu Z., Wang Y., Zhang Y. et al. Preparation of paper-free and fiber-free plasterboard with high strength using phosphogypsum // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 243. P. 118091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118091

15. Valančius Z., Vaickelionienė R., Vaickelionis G., Makčinskas P. Use of an industrial by-product phosphogypsum in the production of white textured paints // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 380. P. 134888. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134888

16. Кочетков А.В., Янковский Л.В. Применение фосфогипса для строительства монолитных слоев дорожной одежды // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2017. № 4. С. 91–102. DOI: 10.15593/24111678/2017.04.07. EDN YLBFDU.

17. Яшин С.О., Борисенко Ю.Г. Свойства битумоминеральных композиций, модифицированных фосфогипсом // *Строительные материалы*. 2011. № 1. С. 14–15. EDN NQTZXN.

18. Zhang H., Wencui C., Yijun C. Flotation separation of quartz from gypsum using benzyl quaternary ammonium salt as collector // *Applied Surface Science*. 2022. Vol. 576. P. 151834. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.151834

19. Губская А.Г., Осипенко В.В. Влияние искусственного гипсового камня на основе фосфолугидрата ОАО «Гомельский химический завод» на свойства цемента // *Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий : мат. IX Междунар. науч.-практ. конф.* 2018. С. 64–68.

20. Muthukumar P., Shewale M., Asalkar S., Shinde N., Korke P., Anitha M. et al. Experimental study on light weight panel using phosphogypsum // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 49. Pp. 1852–1856. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.056

21. Ajam L., Ouedzou M.B., Felfoul H.S., Mensi R.E. Characterization of the Tunisian phosphogypsum and its valorization in clay bricks // *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23. Issue 10. Pp. 3240–3247. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.05.009

22. Zhou J., Gao H., Shu Zh., Wang Y., Yan Ch. Utilization of waste phosphogypsum to prepare non-fired bricks by a novel Hydration–Recrystallization process // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 34. Pp. 114–119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.045

23. Zhou J., Sheng Z., Li T., Shu Zh., Chen Y., Wang Y. Preparation of hardened tiles from waste phosphogypsum by a new intermittent pressing hydration // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. Issue 6. Pp. 7237–7245. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.01.117

24. Абраменко А.А. Разработка безобжиговой технологии переработки фосфогипса с учетом раннего прогнозирования свойств композита // *Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий : мат. IX Междунар. науч.-практ. конф.* 2018. С. 7–17.

25. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Fic S., Szafraniec M., Bakhtina T. Intensive ways of producing carbonate curing building materials based on lime secondary raw materials // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 10. P. 2304. DOI: 10.3390/ma13102304

Поступила в редакцию 9 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 29 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Тамара Алексеевна Бахтина** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, Институт «Академия строительства и архитектуры»; **Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского)**; 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 840822; Scopus: 57202813160; ResearcherID: N-8860-2016; ORCID: 0000-0002-5241-0074; t.bakhtina83@gmail.com;

Николай Владимирович Любомирский — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, Институт «Академия строительства и архитектуры»; **Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского)**; 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 779436; Scopus: 57202812296; ResearcherID: Y-4548-2019; ORCID: 0000-0001-6298-5077; niklub.ua@gmail.com;

Александр Сергеевич Бахтин — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, Институт «Академия строительства и архитектуры»; **Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского)**; 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 846523; Scopus: 57191596769; ResearcherID: N-9489-2016; ORCID: 0000-0001-6255-8948; aleserba@mail.ru;

Герман Русланович Биленко — аспирант кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, Институт «Академия строительства и архитектуры»; **Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского)**; 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 1099392; ger-bilenko@yandex.ru;

Иван Анатольевич Тюнюков — аспирант кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, Институт «Академия строительства и архитектуры»; **Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского)**; 295000, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; utyunyukovv@mail.ru.

Вклад авторов:

Бахтина Т.А. — научное руководство, написание исходного текста, итоговые выводы.

Любомирский Н.В. — научное руководство, концепция исследования.

Бахтин А.С. — развитие методологии, написание и редактирование исходного текста, итоговые выводы.

Биленко Г.Р. — проведение лабораторных испытаний, обработка результатов, оформление текста.

Тюнюков И.А. — проведение лабораторных испытаний, обработка результатов, оформление текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Murali G., Azab M. Recent research in utilization of phosphogypsum as building materials: Review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 25:960-987. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.05.272
2. Calderón-Morales B.R.S., García-Martínez A., Pineda P., García-Tenório R. Valorization of phosphogypsum in cement-based materials: limits and potential in eco-efficient construction. *Journal of Building Engineering*. 2021; 44:102506. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102506
3. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 166:732-743. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.049
4. Wei Z.Q., Zhang Q., Li X.B. Crystallization kinetics of α -hemihydrate gypsum prepared by hydrothermal method in atmospheric salt solution medium. *Crystals*. 2021; 11(8):843. DOI: 10.3390/cryst1108-0843
5. Meshcheryakov Yu.G., Fedorov S.V. Complex industrial processing of Khibiny apatite concentrate. *Increasing the efficiency of production and use of gypsum materials and products : materials of the IX international scientific and practical conference*. 2018; 124-127. (rus.).
6. Yang L., Zhang Y., Yan Y. Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 127:204-213. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.04.054
7. Wei Z., Deng Z. Research hotspots and trends of comprehensive utilization of phosphogypsum: Bibliometric analysis. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022; 242:106778. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106778
8. Macías F., Cánovas C.R., Cruz-Hernández P., Carrero S., Asta M.P., Nieto J.M. et al. An anomalous metal-rich phosphogypsum: Characterization and classification according to international regulations. *Journal of Hazardous Materials*. 2017; 331:99-108. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.02.015
9. Tian T., Yan Y., Hu Z., Xu Y., Chen Y., Shi J. Utilization of original phosphogypsum for the preparation of foam concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; 115:143-152. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.028
10. Li B., Li L., Chen X., Ma Y., Zhou M. Modification of phosphogypsum using circulating fluidized bed fly ash and carbide slag for use as cement retarder. *Construction and Building Materials*. 2022; 338:127630. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127630

11. Ilin A.P., Kochetkov S.P., Bryl S.V., Rukhlin G.V. Problems and prospects of usage of secondary products of processing of natural phosphates for construction materials. *Ecology and Construction*. 2016; 4:21-29. EDN ZHLAPL. (rus.).
12. Liu S., Fang P., Ren J., Li S. Application of lime neutralised phosphogypsum in supersulfated cement. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 272:122660. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122660
13. Singh M. Treating waste phosphogypsum for cement and plaster manufacture. *Cement and Concrete Research*. 2002; 32(7):1033-1038. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00723-8
14. Zhou J., Li X., Zhao Y., Shu Z., Wang Y., Zhang Y. et al. Preparation of paper-free and fiber-free plasterboard with high strength using phosphogypsum. *Construction and Building Materials*. 2020; 243:118091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118091
15. Valančius Z., Vaickelionienė R., Vaickelionis G., Makčinskas P. Use of an industrial by-product phosphogypsum in the production of white textured paints. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 380:134888. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134888
16. Kochetkov A.V., Yankovsky L.V. Application of phosphogypsum for the construction of indistinguishable layers of road pavement. *Transport facilities. Ecology*. 2017; 4:91-102. DOI: 10.15593/24111678/2017.04.07. EDN YLBFDU. (rus.).
17. Yashin S.O., Borisenko Yu.G. Properties of bitumen-mineral compositions modified with phosphogypsum. *Materials for Road Construction*. 2011; 1:14-15. EDN NQTZXN. (rus.).
18. Zhang H., Wencui C., Yijun C. Flotation separation of quartz from gypsum using benzyl quaternary ammonium salt as collector. *Applied Surface Science*. 2022; 576:151834. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.151834
19. Gubskaya A.G., Osipenko V.V. The influence of artificial gypsum stone based on phosphohemihydrate OJSC “Gomel Chemical Plant” on the properties of cement. *Increasing the efficiency of production and use of gypsum materials and products : materials of the IX international scientific and practical conference*. 2018; 64-68. (rus.).
20. Muthukumar P., Shewale M., Asalkar S., Shinde N., Korke P., Anitha M. et al. Experimental study on light weight panel using phosphogypsum. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 49:1852-1856. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.056
21. Ajam L., Ouezdou M.B., Felfoul H.S., Mensi R.E. Characterization of the Tunisian phosphogypsum and its valorization in clay bricks. *Construction and Building Materials*. 2009; 23(10):3240-3247. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.05.009
22. Zhou J., Gao H., Shu Zh., Wang Y., Yan Ch. Utilization of waste phosphogypsum to prepare non-fired bricks by a novel Hydration–Recrystallization process. *Construction and Building Materials*. 2012; 34:114-119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.045
23. Zhou J., Sheng Z., Li T., Shu Zh., Chen Y., Wang Y. Preparation of hardened tiles from waste phosphogypsum by a new intermittent pressing hydration. *Ceramics International*. 2016; 42(6):7237-7245. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.01.117
24. Abramenko A.A. Development of non-firing technology for processing phosphogypsum, taking into account early prediction of the properties of the composite. *Increasing the efficiency of production and use of gypsum materials and products : materials of the IX International scientific and practical conference*. 2018; 7-17. (rus.).
25. Lyubomirskiy N., Bakhtina A., Fic S., Szafraniec M., Bakhtina T. Intensive ways of producing carbonate curing building materials based on lime secondary raw materials. *Materials*. 2020; 13(10):2304. DOI: 10.3390/ma13102304

Received October 9, 2023.

Adopted in revised form on December 11, 2024.

Approved for publication on January 29, 2024.

B I O N O T E S : **Tamara A. Bakhtina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science, Academy of Construction and Architecture; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; ID RSCI: 840822; Scopus: 57202813160; ResearcherID: N-8860-2016; ORCID: 0000-0002-5241-0074; t.bakhtina83@gmail.com;

Nikolay V. Lyubomirskiy — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science, Academy of Construction and Architecture; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; ID RSCI: 779436; Scopus: 57202812296; ResearcherID: Y-4548-2019; ORCID: 0000-0001-6298-5077; niklub.ua@gmail.com;

Aleksandr S. Bakhtin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science, Academy of Construction and Architecture; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; ID RSCI: 846523; Scopus: 57191596769; ResearcherID: N-9489-2016; ORCID: 0000-0001-6255-8948; aleserba@mail.ru;

German R. Bilenko — postgraduate student of the Department of Construction Engineering and Materials Science, Academy of Construction and Architecture; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; ID RSCI: 1099392; ger-bilenko@yandex.ru;

Ivan A. Tyunyukov — postgraduate student of the Department of Construction Engineering and Materials Science, Academy of Construction and Architecture; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 181 Kiyevskaya st., Simferopol, 295000, Russian Federation; utyunyukovv@mail.ru.

Contribution of the authors:

Tamara A. Bakhtina — scientific supervision, writing the original text, final conclusions.

Nikolay V. Lyubomirskiy — scientific leadership, research concept.

Aleksandr S. Bakhtin — development of methodology, writing and editing of the original text, final conclusions.

German R. Bilenko — conducting laboratory tests, processing results, formatting text.

Ivan A. Tyunyukov — conducting laboratory tests, processing results, formatting text.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 666.913.35:691.54

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327

Гидратация цементных вяжущих с минеральными добавками на основе глинистых и карбонатных пород

Владимир Владимирович Володин¹, Олег Вячеславович Тараканов²,
Татьяна Анатольевна Низина¹, Владимир Михайлович Кяшкин¹,
Артеми́й Серге́евич Балыков¹

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва); г. Саранск, Россия;

² Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС); г. Пенза, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение минеральных добавок (МД) в составах цементных бетонов дает возможность снижать расход портландцемента (ПЦ), что при возрастающих темпах строительства уменьшает негативное воздействие на экологию при его производстве. Однако высокая стоимость и территориальная ограниченность производства наиболее эффективных модификаторов (микрокремнезем, метакраин) не позволяют в полном объеме удовлетворить возрастающий на них спрос. Разработка МД из широко распространенного сырья поможет решить проблему дефицита наиболее распространенных добавок, а также снизить объемы потребления ПЦ. Механизм твердения ПЦ с широко распространенными МД достаточно подробно изучен. При этом работы, описывающие процессы гидратации цементного вяжущего, модифицированного МД на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород, практически отсутствуют.

Материалы и методы. В качестве МД использованы: термоактивированная глина (Никитское месторождение, г. Саранск, Республика Мордовия), доломит (с. Ельники, Республика Мордовия), термоактивированная смесь глины и известняка (с. Атемар, Республика Мордовия). С применением метода рентгенофазового анализа исследованы механизмы действия указанных МД на процессы гидратации.

Результаты. Установлено, что применение рассматриваемых МД позволяет повысить степень гидратации ПЦ и направлено изменять фазовый состав цементного камня.

Выводы. Полученные данные свидетельствуют о перспективности и актуальности направления по разработке бетонов с модифицирующими добавками на основе термоактивированных полиминеральных глин и карбонатных пород, что позволяет расширить номенклатуру выпускаемых на сегодняшний день модифицированных цементных композитов за счет более полного использования местной минеральной сырьевой базы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементный камень, полиминеральная глина, доломит, известняк, пластифицирующая добавка, фазовый состав

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Володин В.В., Тараканов О.В., Низина Т.А., Кяшкин В.М., Балыков А.С. Гидратация цементных вяжущих с минеральными добавками на основе глинистых и карбонатных пород // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1317–1327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Анатольевна Низина, nizinata@yandex.ru.

Hydration of cement binders with mineral additives based on clay and carbonate rocks

Vladimir V. Volodin¹, Oleg V. Tarakanov², Tat'yana A. Nizina¹,
Vladimir M. Kyashkin¹, Artemiy S. Balykov¹

¹ Ogarev Mordovia State University; Saransk, Russian Federation;

² Penza State University of Architecture and Construction (PGUAS); Penza, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The use of mineral additives in cement concrete compositions makes it possible to reduce the consumption of Portland cement, which, with increasing construction rates, reduces the negative impact on the environment during its production. However, the high cost and territorial limitation of the production of the most effective modifiers (microsilica, metakaolin) do not allow to satisfy the growing demand for them. The development of mineral additives from widely used raw materials will help solve the problem of the deficit of the most common additives, as well as to reduce the consumption of Portland cement. The mechanism of hardening of Portland cement with widespread mineral additives was studied in sufficient detail. At the same time, there are practically no works describing the processes of hydration of cement binder modified with mineral additives based on thermally activated clay and carbonate rocks.

Materials and methods. The following mineral additives were used: thermally activated clay (Nikitskoye deposit, Saransk, Republic of Mordovia), dolomite (Elniki village, Republic of Mordovia), thermally activated mixture of clay and limestone (At-emar village, Republic of Mordovia). Using the method of X-ray phase analysis, the mechanisms of action of these mineral additives on hydration processes are considered.

Results. It was established that the use of these mineral additives makes it possible to increase the degree of hydration of Portland cement and change the phase composition of the cement stone in a targeted manner.

Conclusions. The data obtained indicate the prospects and relevance of the direction for the development of concretes with modifying additives based on clay and carbonate rocks, which makes it possible to expand the range of modified cement composites produced today due to more complete use of the local mineral resource base.

KEYWORDS: cement stone, polymineral clay, dolomite, limestone, plasticizing additive, phase composition

FOR CITATION: Volodin V.V., Tarakanov O.V., Nizina T.A., Kyashkin V.M., Balykov A.S. Hydration of cement binders with mineral additives based on clay and carbonate rocks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1317-1327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1317-1327 (rus.).

Corresponding author: Tat'yana A. Nizina, nizinata@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время объемы мирового производства цементного бетона превысили отметку 10 млрд м³ в год [1], что позволяет по праву называть его главным строительным материалом XXI в. Производство данного строительного материала продолжает неуклонно возрастать, что связано с процессами урбанизации, индустриализации и ростом населения на земле. Однако современные методы производства портландцемента (ПЦ) — энергоемкие и оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду. Традиционным способом снижения клинкероемкости ПЦ является совместный помол клинкера с замещающими добавками — гидравлическими, пуццолановыми или инертными [1]. Также снижению потребления ПЦ способствует применение минеральных добавок (МД) в качестве самостоятельных компонентов цементных бетонов, что позволяет получать повышенные физико-механические и эксплуатационные свойства бетонов при сниженном расходе ПЦ [2–7].

Наиболее широкое использование в цементной промышленности нашел природный гипс [8], введение которого на этапе помола клинкера (3–5 % от массы) дает возможность замедлить процесс гидратации цемента после его смешивания с водой. При этом гипс также применяется и в качестве МД к цементным бетонам [9, 10].

Портландцемент на 70–80 % состоит из силикатов кальция, продукты гидратации которых служат главными носителями механической прочности цементного камня (ЦК). Изменение условий протекания реакций приводит к образованию гидросиликатов кальция переменного состава [11]. Достаточно подробно изучен механизм твердения цементных вяжущих с широко распространенными минеральными добавками — микрокремнеземом и метакаолином. В работах [12–18] показано, что минеральные добавки на основе широко распространенных глинистых и карбонатных пород могут иметь пуццолановую активность, не уступающую микрокремнезему и метакаолину. Однако исследования, описывающие процессы гидратации ПЦ, модифи-

цированного минеральными добавками на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород, практически отсутствуют.

Цель данной работы — исследование процессов гидратации портландцемента, модифицированного минеральными добавками на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными компонентами для приготовления модифицирующих добавок послужили породы из следующих месторождений Республики Мордовия:

- глина Никитского месторождения (северо-западная окраина г. Саранска), минеральный состав которой представлен каолинитом (39,8 %), иллитом (23,1 %), полевыми шпатами (14,2 %) и кварцем (19,8 %);
- доломит Ельниковского месторождения (с. Будаево), состоящий из минералов доломита (52 %) и кальцита (48 %);
- известняк Атемарского месторождения (с. Атемар), минеральный состав которого представлен кальцитом (96 %) и кварцем (4 %).

Из отобранных пород были изготовлены следующие виды МД: ДЕ — молотый до удельной поверхности 445 м²/кг (длительность помола 3 ч) Ельниковский доломит; ТГН — никитская глина, прошедшая термическую обработку и молотая до удельной поверхности 780 м²/кг (длительность помола 1 ч); ТС (ГН + ИА) — смесь 2:1 по массе никитской глины и атемарского известняка с удельной поверхностью соответственно 780 и 1300 м²/кг после термической обработки. Обжиг производился при температуре 700 °С в течение 2 ч.

Исследования проводились на портландцементе класса ЦЕМ I 42,5Б производства АО «Мордовцемент» (ГОСТ 31108–2020). Минералогический состав ПЦ представлен минералами: трехкальциевого силиката (C₃S) — 65,7 %; двухкальциевого силиката (C₂S) — 11,4 %; трехкальциевого алюмината (C₃A) — 13,5 %; четырехкальциевого аллюмоферита (C₄AF) — 6,7 %. Исследуемые минеральные добавки вводились в количестве 20 % от массы

твердой фазы (Ц + МД). Дозировка суперпластификатора Melflux 5581 F составляла 1 % от массы твердой фазы. Водотвердое отношение $B/T = B/(Ц + МД) = 0,21$. Фазовый состав цементного камня (ЦК) исследован в возрасте 28 сут с применением метода рентгенофазового анализа (РФА) на автоматизированном дифрактометре Empyrean компании PANalytical. Дифрактограммы исследуемых порошков ЦК представлены на рис. 1–8.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам полуколичественного РФА цементного камня (рис. 1–4) установлено, что интенсивность отражений безводных фаз цемента в исследуемых образцах (C_3S — 2,776; 2,730 Å; C_2S — 2,785; 2,748 Å) уменьшается в ряду «цемент (100 %) → цемент (80 %) + ТС(ГН + ИА) (20 %) → цемент (80 %) + ТГН (20 %) → цемент (80 %) + ДЕ (20 %)\», что свидетельствует об активации процесса гидратации силикатных фаз цемента в присутствии добавок на 18–26 % (таблица). В отношении гидросульфалоюминатных фаз по данным РФА следует сделать вывод, что интенсивность отражений этtringита ($d = 9,73$; 5,61; 3,88; 3,24; 2,564; 2,209 Å) во всех образцах с добавками ниже, чем для контрольного состава (рис. 1–4). В ЦК, модифицированном добавками ТГН и ТС(ГН + ИА), происходит снижение интенсивности рефлексов при $d = 4,93$ Å

и $d = 1,93$ Å (соответственно, на 27 и 25 %), что говорит о снижении концентрации портландита по отношению к контрольному составу.

При гидратации C_3S и β - C_2S образуются два основных продукта — гель $C-S-H$ и $Ca(OH)_2$ [19]. При этом гидратация β - C_2S происходит более медленно, чем C_3S . Известно большое количество кристаллических гидросиликатов кальция (ГСК), но большинство из них образуются в гидротермальных условиях под давлением и при температуре выше 100 °С. Множество полукристаллических ГСК являются промежуточными между этими соединениями — гелем $C-S-H$, образующимся в цементе. Это два типа гидросиликатов кальция — низкоосновные ($C-S-H(I)$) и высокоосновные ($C-S-H(II)$), близкие соответственно к 1,4 нм тобермориту и женниту. 1,4 нм тоберморита может быть синтезировано в водной суспензии при 60 °С из $Ca(OH)_2$ –(СН) и кремниевой кислоты, женнит — в водной суспензии из СН и водного раствора кремнезема при температуре, близкой к 80 °С.

В цементных системах образуются слабо закристаллизованные продукты $C-S-H$, необходимым условием для которых является присутствие $Ca(OH)_2$. Подобные фазы, как правило, слабокристаллически и достаточно сложно различимы методами РФА. На представленных рентгенограммах некоторые отражения, предположительно, могут быть отнесены к фазам: 1,98; 1,82; 1,4; 1,56 Å. Ха-

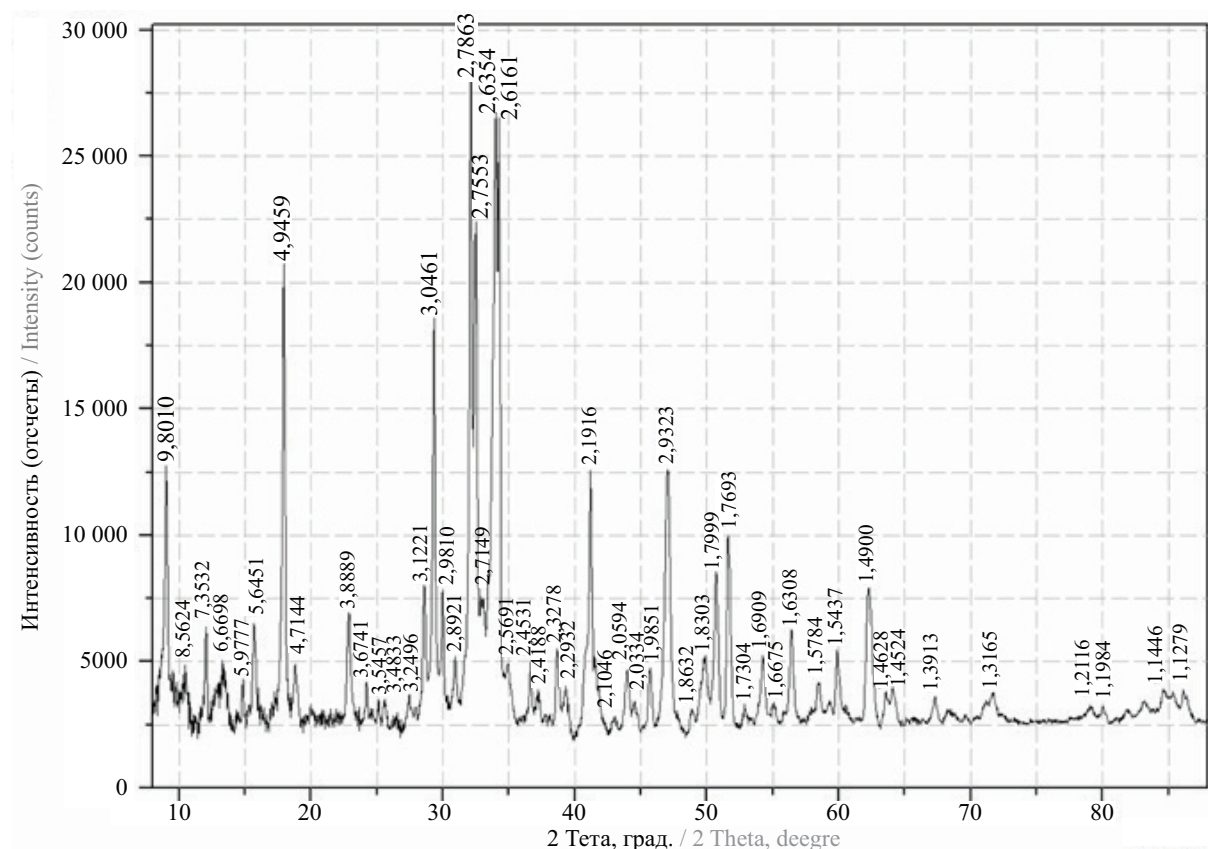


Рис. 1. Дифрактограмма порошка цементного камня контрольного бездобавочного состава в возрасте 28 суток

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of cement stone powder of the control composition without additives at the age of 28 days

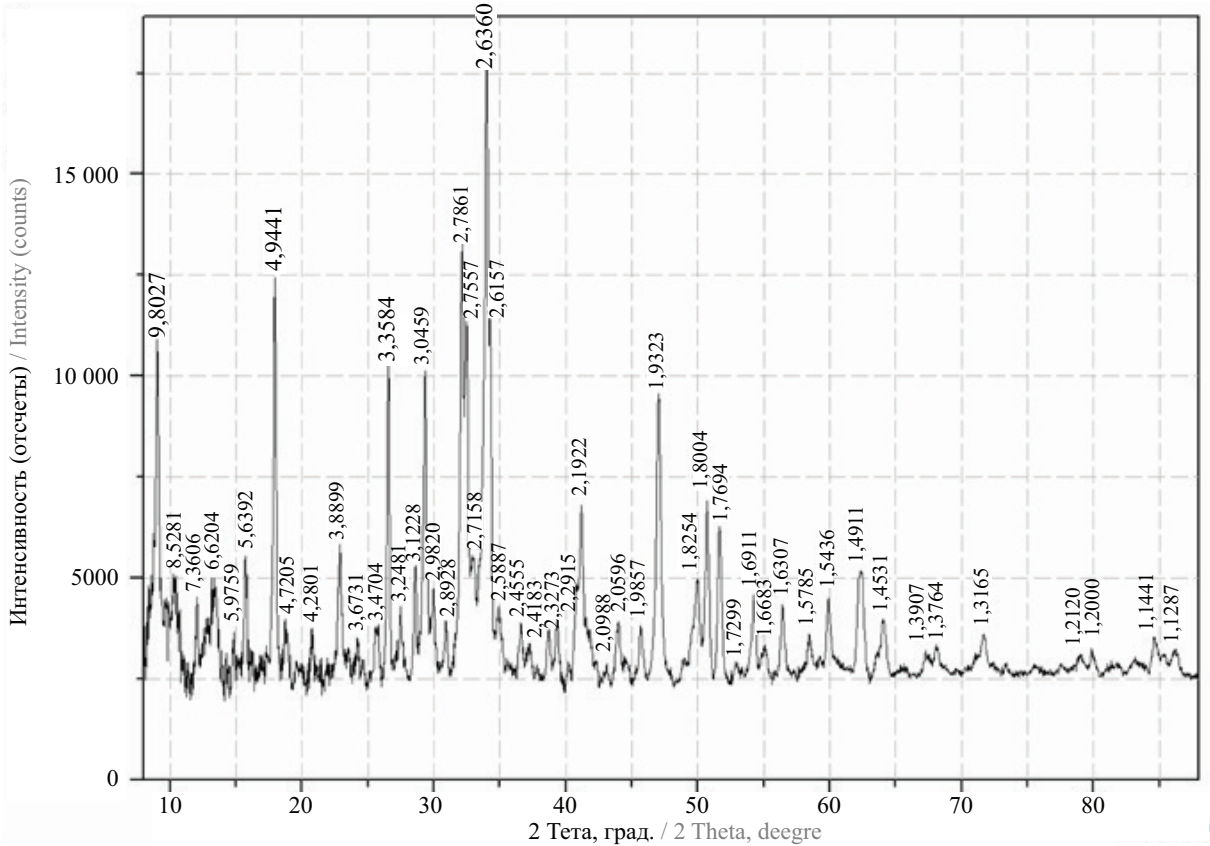


Рис. 2. Дифрактограмма порошка цементного камня, содержащего 20 % добавки ТГН, в возрасте 28 суток

Fig. 2. Powder diffraction pattern of cement stone containing 20 % TGN supplement at the age of 28 days

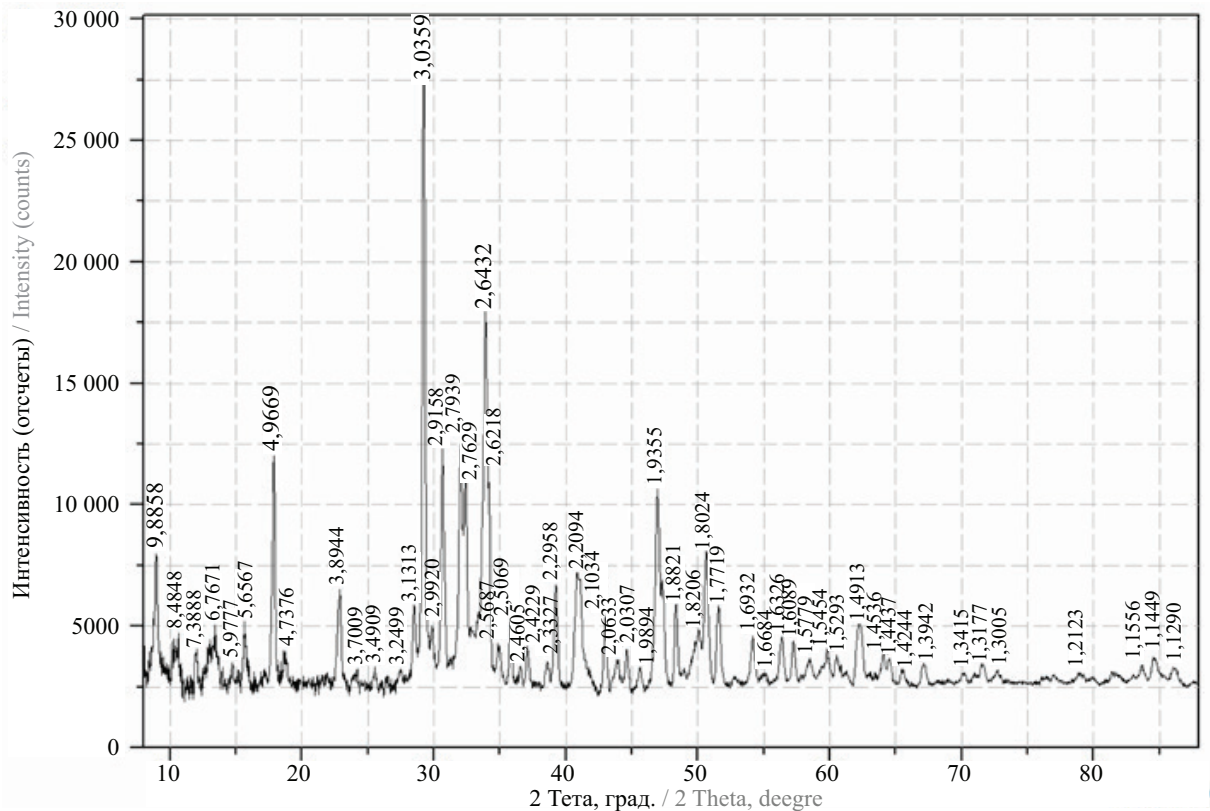


Рис. 3. Дифрактограмма порошка цементного камня, содержащего 20 % добавки ДЕ, в возрасте 28 суток

Fig. 3. Powder diffraction pattern of cement stone containing 20 % DE supplement at the age of 28 days

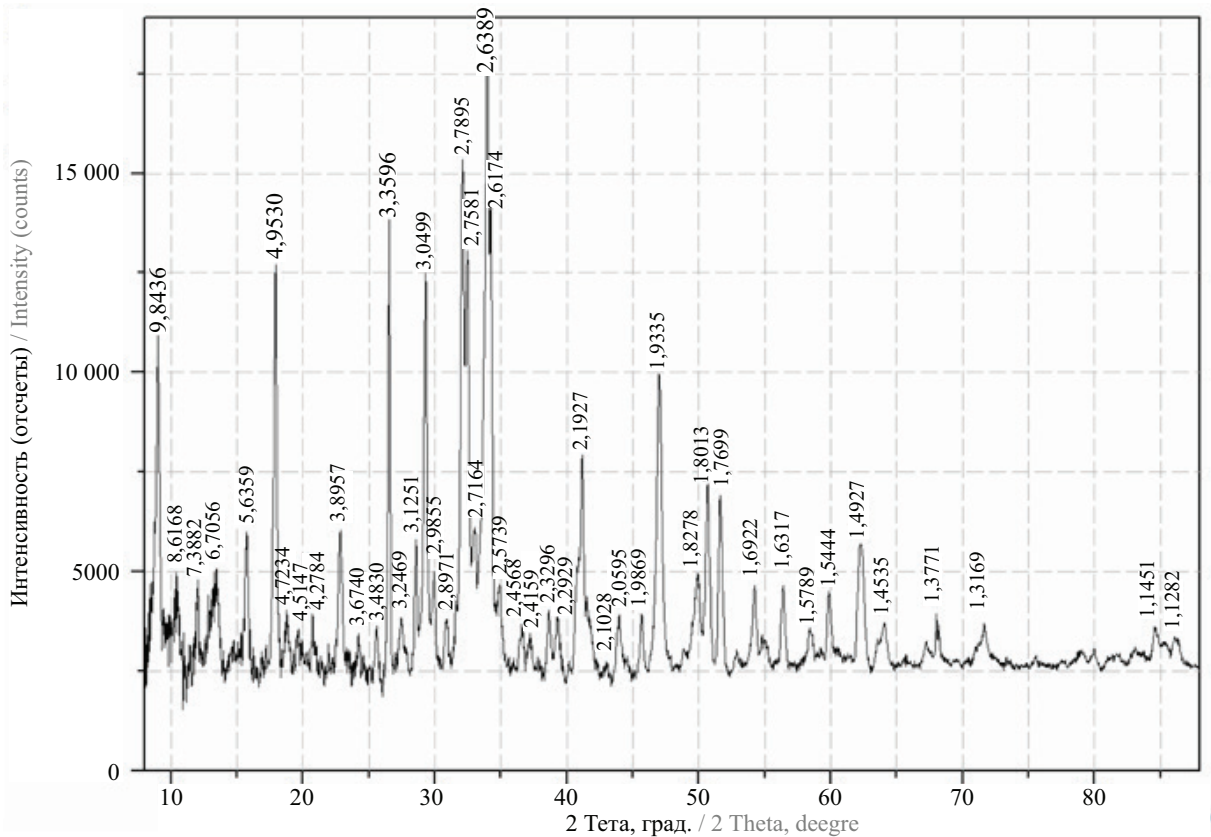


Рис. 4. Дифрактограмма порошка цементного камня, содержащего 20 % добавки ТС(ГН + ИА), в возрасте 28 суток
Fig. 4. Powder diffraction pattern of cement stone containing 20 % additives TS(GN+IA) at the age of 28 days

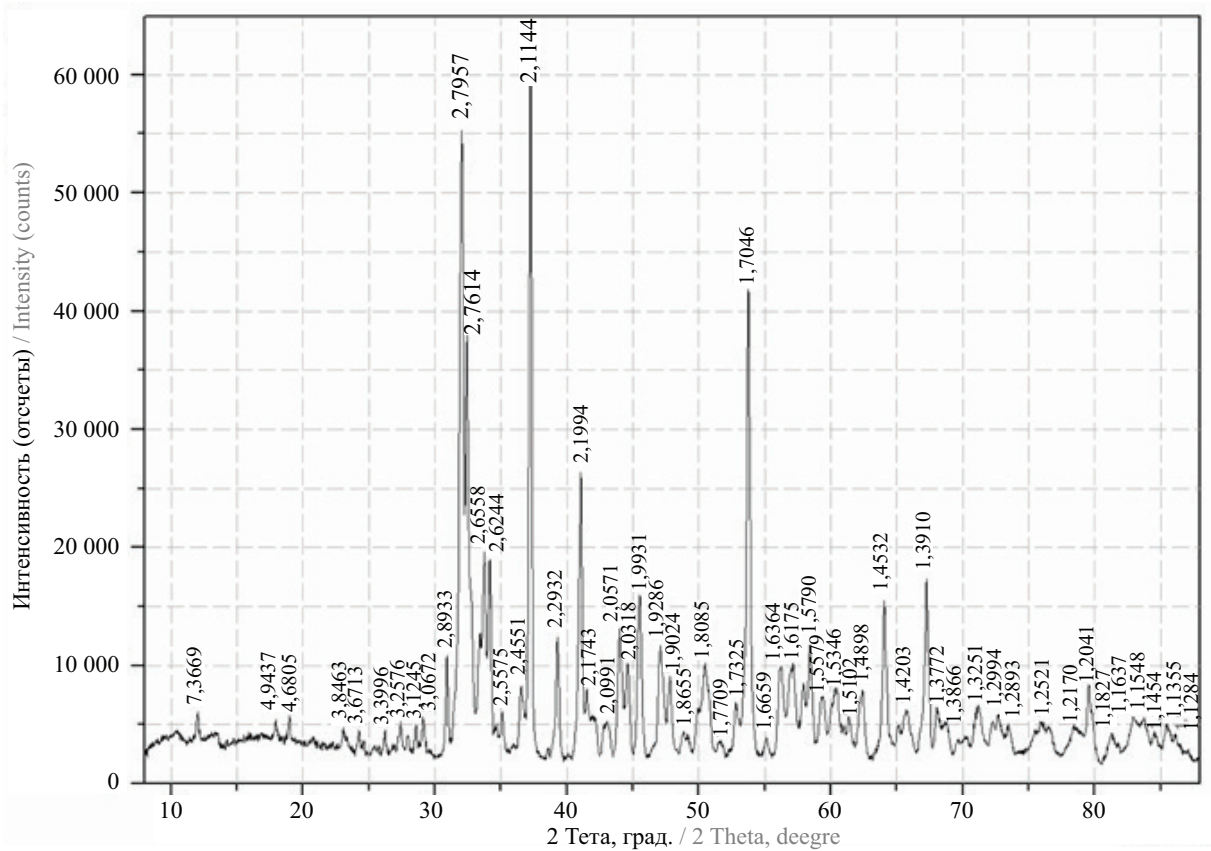


Рис. 5. Дифрактограмма порошка цементного камня (28 сут) контрольного бездобавочного состава, обожженного при 1000 °C
Fig. 5. Powder diffraction pattern of cement stone (28 days) control composition without additives, fired at 1,000 °C

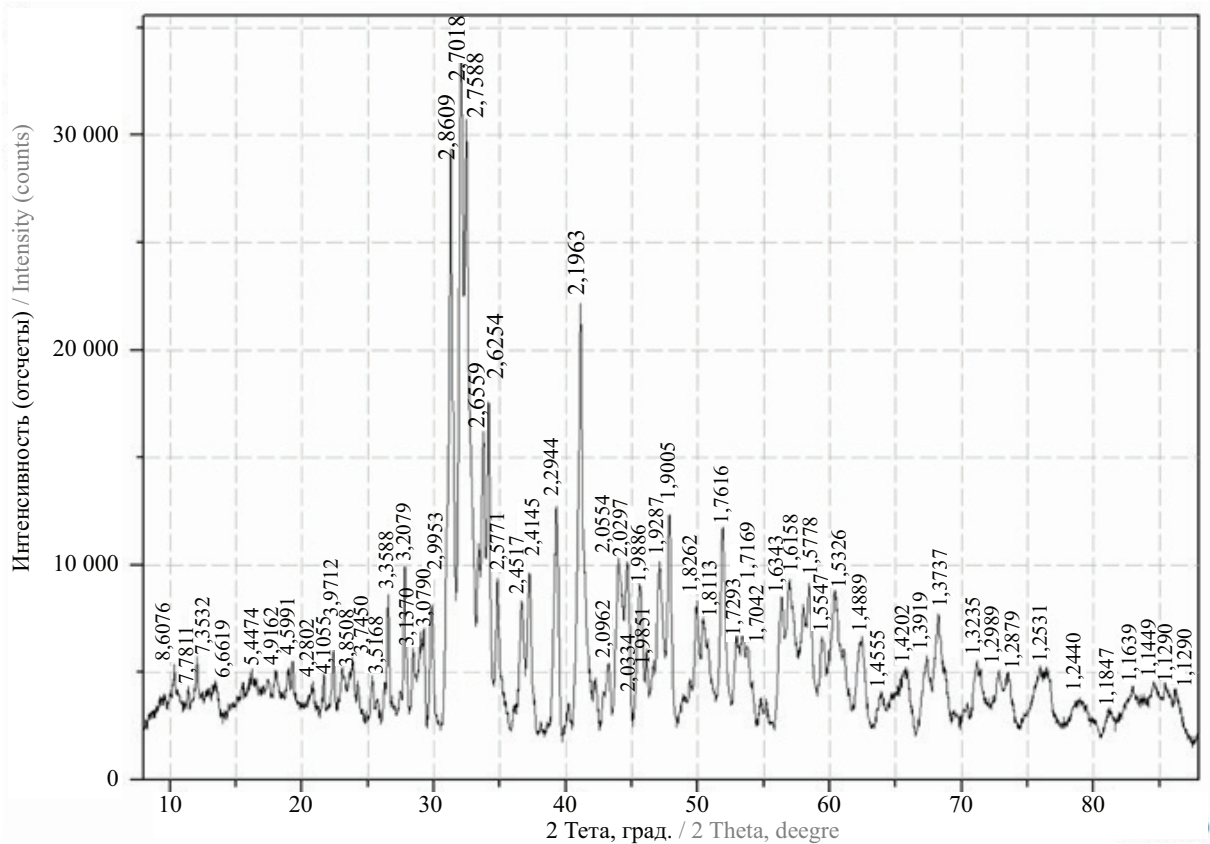


Рис. 6. Дифрактограмма порошка цементного камня (28 сут), содержащего 20 % добавки ТГН, обожженного при 1000 °С

Fig. 6. Powder diffraction pattern of cement stone (28 days) containing 20 % addition of TGN, fired at 1,000 °C

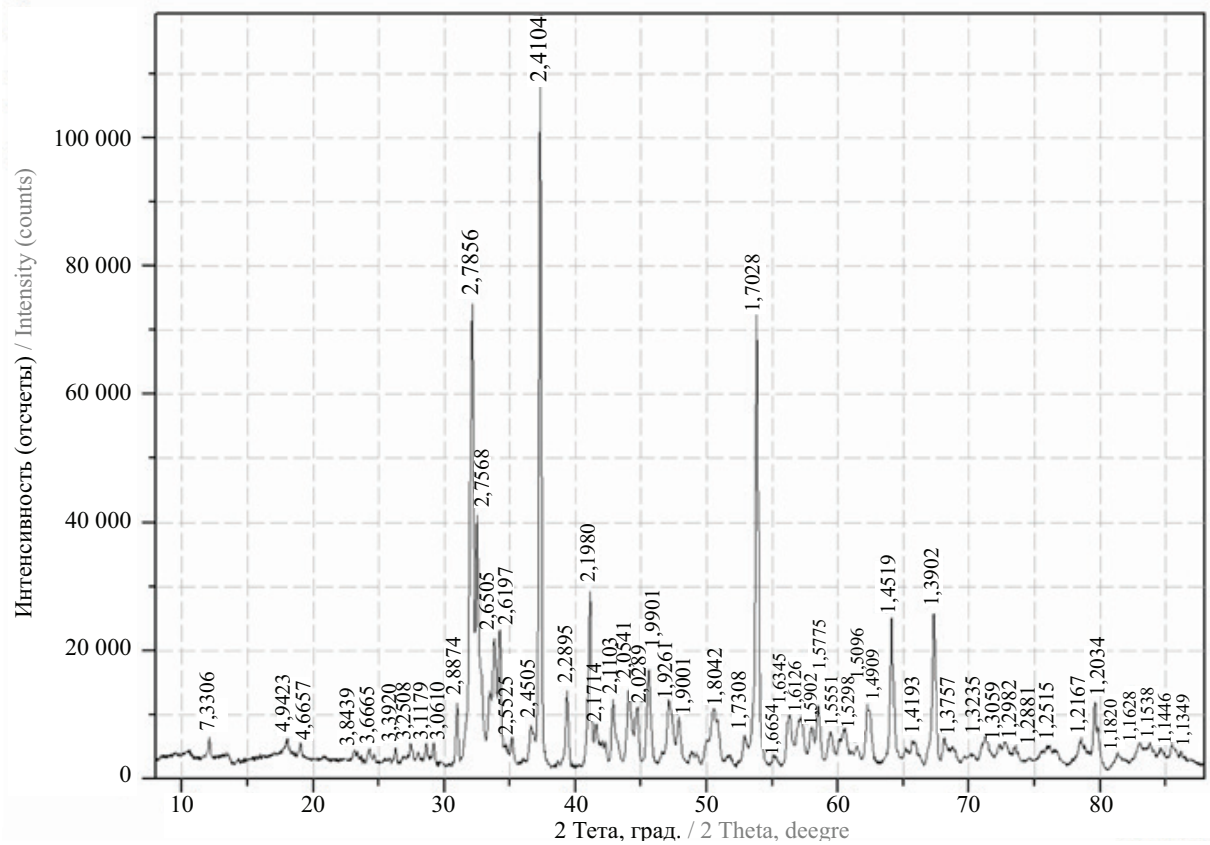


Рис. 7. Дифрактограмма порошка цементного камня (28 суток), содержащего 20 % добавки ДЕ, обожженного при 1000 °С

Fig. 7. Powder diffraction pattern of cement stone (28 days) containing 20 % DE additive, fired at 1,000 °C

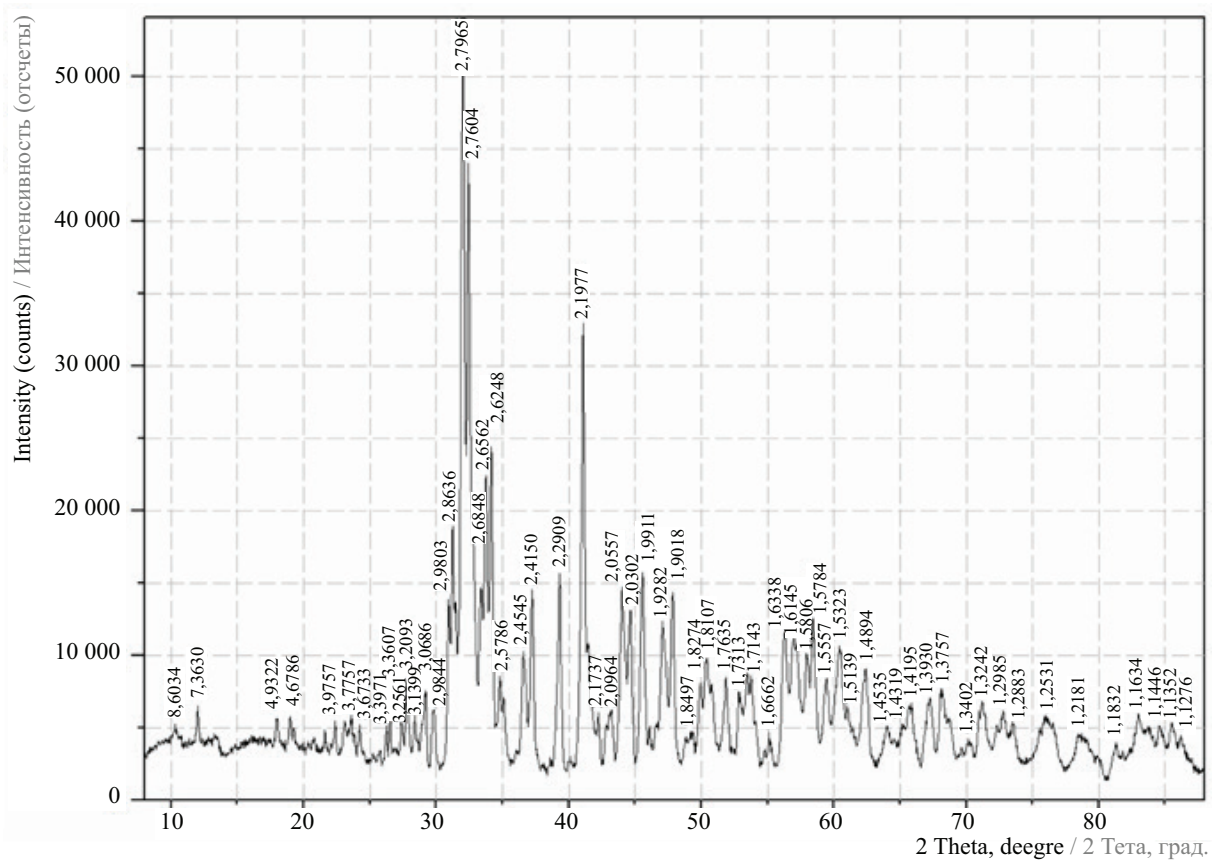


Рис. 8. Дифрактограмма порошка цементного камня (28 сут), содержащего 20 % добавки ТС(ГН + ИА), обожженного при 1000 °С

Fig. 8. Powder diffraction pattern of cement stone (28 days) containing 20 % additive TS(GN + IA), fired at 1,000 °C

Результаты РФА цементного камня исследуемых составов

Results of X-ray diffraction analysis of the cement stone of the studied compositions

Состав вяжущего Binder composition	Степень гидратации портландцемента, % Degree of hydration of Portland cement, %	Относительное содержание этtringита ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) Relative content of ettringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$)	Относительное содержание портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Relative content of portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Относительное содержание низкоосновных гидросиликатов кальция C-S-H(I) Relative content of low-basic calcium hydrosilicates C-S-H(I)	Относительное содержание высокоосновных гидросиликатов кальция C-S-H(II) Relative content of highly basic calcium hydrosilicates C-S-H(II)
Цемент (100 %) Cement (100 %)	65	100	100	100	100
Цемент (80 %) + ТГН (20 %) Cement (80 %) + TGN (20 %)	79	80	73	255	59
Цемент (80 %) + ДЕ (20 %) Cement (80 %) + DE (20 %)	82	62	91	108	130
Цемент (80 %) + ТС(ГН + ИА) (20 %) Cement (80 %) + TS(GN + IA) (20 %)	77	94	75	238	94

рактерных отражений при $d = 3,07 \text{ \AA}$ для С-S-H (I) и $3,05 \text{ \AA}$ для тоберморитового геля, а также при $d = 2,8$ и $2,85 \text{ \AA}$ для С-S-H (II) не обнаружено (рис. 1–4). Интенсивности отражений при $d = 1,83 \text{ \AA}$ (С-S-H (II) и С-S-H (I)) и при $d = 1,82 \text{ \AA}$ (тоберморитовый гель) примерно равны для всех образцов. Интенсивности отражений при $d = 1,98 \text{ \AA}$ (С-S-H (II)) в образцах с добавками меньше, чем в контрольном составе. Предположительно, к фазе С-S-H (II) можно отнести отражение при $d = 1,4 \text{ \AA}$, но интенсивности этих рефлексов для всех анализируемых дифрактограмм незначительны.

Известно [20], что дегидратация С-S-H(II) наблюдается при температуре $650\text{--}800^\circ\text{C}$, а при температуре $800\text{--}900^\circ\text{C}$ происходит полное обезвоживание С-S-H(I). В работе [21] предлагается определять относительное содержание низкоосновных и высокоосновных гидросиликатов кальция после обжига образцов при 1000°C . В данном случае оценка производится путем сравнения интенсивностей одного из основных рефлексов $\alpha\text{-CS}$ ($d = 3,23 \text{ \AA}$ и $2\theta = 27,4^\circ$) и $\beta\text{-CS}$ ($d = 2,97 \text{ \AA}$ и $2\theta = 29,9^\circ$) для С-S-H(I) и $\beta\text{-C2S}$ ($d = 2,79 \text{ \AA}$ и $2\theta = 32,1^\circ$) для С-S-H(II).

Анализ дифрактограмм порошков ЦК, обожженного при 1000°C , показал снижение интенсивности рефлексов при $d = 2,79 \text{ \AA}$ на $6\text{--}41\%$, а также увеличение интенсивности рефлексов при $d = 3,23 \text{ \AA}$ и $d = 2,97 \text{ \AA}$ в $2,4\text{--}2,6$ раза для составов, содержащих 20% МД ТГН и ТС(ГН + ИА), по отношению

к контрольному составу, что говорит об изменении соотношения гидросиликатов кальция в сторону увеличения доли низкоосновных. Данный химический эффект связан с пуццолановой активностью МД ТГН и ТС(ГН + ИА) в цементных системах и обусловлен наличием в их химико-минералогическом составе активных кремнеземсодержащих компонентов (реакционноспособных минералов с аморфизированной структурой) [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований изучены процессы гидратации портландцемента, модифицированного минеральными добавками на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород. Установлено, что минеральные добавки ТГН и ТС(ГН + ИА) способствуют в фазовом составе цементного камня:

- повышению степени гидратации портландцемента с 65 до 79 и 77% соответственно;
- снижению содержания этtringита на 20 и 6% соответственно;
- уменьшению содержания портландита на 27 и 25% соответственно;
- сокращению содержания высокоосновных гидросиликатов кальция на 6 и 41% соответственно, при этом повышая содержание низкоосновных гидросиликатов кальция соответственно в $2,6$ и $2,4$ раза.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р. «Карбонатные» цементы низкой водопотребности. М. : АСВ, 2021. 366 с.
2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 4–10. EDN ZWUFVB.
3. Калашиников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М., Белякова Е.А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8 (34). С. 47–53. EDN PJWLHF. DOI: 10.5862/mce.34.7
4. Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Yurova V.S. On the issue of expanding the base of mineral and complex additives for cement concrete // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 135. P. 01018. DOI: 10.1051/e3sconf/201913501018
5. Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Yurova V.S. Complex organomineral additives with hardening accelerator // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. Pp. 929–935. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.284.929
6. Nizina T.A., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I. Fiber fine-grained concretes with polyfunctional modifying additives // Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 4 (72). Pp. 73–83. DOI: 10.18720/MCE.72.9. EDN ZFCAMF.
7. Nizina T.A., Balykov A.S., Korovkin D.I., Volodin V.V. Physical and mechanical properties of modified fine-grained fibre-reinforced concretes containing carbon nanostructures // International Journal of Nanotechnology. 2019. Vol. 16. Issue 6/7/8/9/10. P. 496. DOI: 10.1504/ijnt.2019.106621
8. Баженов Ю.М. Бетонovedение : учебник. М. : Изд-во АСВ, 2015. 144 с.
9. Нгуен Зоан Тунг Лам, Самченко С.В. Комплексный модификатор на основе алюминатного цемента и пуццолановой добавки // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 5. С. 709–716. DOI: 10.22227/1997-0935. 2023.5.709-716
10. Лам Н.З.Т., Самченко С.В., Швецова В.А., Булгаков Б.И. Влияние комплексных добавок на прочность цементного камня в раннем возрасте // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 5. С. 52–59. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.05.52-59. EDN PFYHXG.
11. Бумт Ю.М. Технология цемента и других вяжущих материалов. М. : Стройиздат, 1976. 407 с.
12. Habert G., Choupay N., Escadeillas G., Guillaume D., Montel J.M. Clay content of argillites: Influence

on cement based mortars // *Applied Clay Science*. 2009. Vol. 43. Issue 3–4. Pp. 322–330. DOI: 10.1016/j.clay.2008.09.009

13. Schulze S.E., Rickert J. Pozzolanic activity of calcined clays // SP-289: Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues. 2012.

14. Fernandez R., Martirena F., Scrivener K.L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. Issue 1. Pp. 113–122. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.09.013

15. Rakhimov R.Z., Kamalova Z.A., Yermilova E.Y. Blended portland cement based on thermally activated clays and carbonate additives // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9. Issue 4. Pp. 578–583. DOI: 10.1134/s2075113318040329

16. Balykov A.S., Nizina T.A., Volodin V.V., Kyashkin V.M. Effects of calcination temperature and time on the physical-chemical efficiency of thermally activated clays in cement systems // *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1017. Pp. 61–70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1017.61

17. Nizina T., Balykov A., Volodin V., Kyashkin V. Structure and properties of cement systems with addi-

tives of calcined clay and carbonate rocks // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. No. 8 (116). P. 11602. DOI: 10.34910/MCE.116.2. EDN XFXNAO.

18. Володин В.В., Низина Т.А. Анализ минерально-сырьевой базы Республики Мордовия, пригодной для производства активных минеральных добавок // *Эксперт: теория и практика*. 2023. № 1 (20). С. 59–62. DOI: 10.51608/26867818_2023_1_59. EDN ZBEXPG.

19. Тейлор Х.Ф. Химия цементов. М. : Мир, 1996. 529 с.

20. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ : учебное пособие. М. : Высшая школа, 1981. 335 с.

21. Шейнфельд А.В., Каприелов С.С., Чулин И.А. Влияние температуры на параметры структуры и свойства цементных систем с органоминеральными модификаторами // *Градостроительство и архитектура*. 2017. Т. 7. № 1 (26). С. 58–63. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.01.10. EDN YRDUEV.

22. Detwiler R.J., Mehta P.K. Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete // *ACI Materials Journal*. 1989. Vol. 86. Issue 6. Pp. 609–614. DOI: 10.14359/2281

Поступила в редакцию 22 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 13 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 14 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Владимирович Володин — кандидат технических наук, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва); 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 933723, Scopus: 57195424982, ResearcherID: AAN-7738-2020, ORCID: 0000-0002-3008-6242; volodinvv1994@gmail.com;

Олег Вячеславович Тараканов — доктор технических наук, профессор, декан факультета управления территориями; Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС); 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28; РИНЦ ID: 448093, Scopus: 7004757888; tarov60@mail.ru;

Татьяна Анатольевна Низина — доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва); 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 131099, Scopus: 57190161363, ResearcherID: P-2639-2017, ORCID: 0000-0002-2328-6238; nizinata@yandex.ru;

Владимир Михайлович Кяшкин — кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры физического материаловедения; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва); 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 27869, Scopus: 7801669853, ResearcherID: AAE-1757-2019, ORCID: 0000-0002-3413-247X; kyashkin@mail.ru;

Артёмий Сергеевич Балыков — кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва); 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 813269, Scopus: 57190170885, ResearcherID: AAF-4208-2020, ORCID: 0000-0001-9087-1608; artbalrun@yandex.ru.

Вклад авторов:

Володин В.В. — развитие методологии исследования, обработка материала, написание исходного текста, создание иллюстраций и таблицы, изготовление образцов.

Тараканов О.В. — редакция текстового материала.

Низина Т.А. — научное руководство, методология исследования.

Кяшкин В.М. — проведение экспериментальных исследований, сбор материала.

Балыков А.С. — участие в экспериментальной работе, редактирование текста статьи, изготовление образцов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Sibgatulin I.R. "Carbonate" cements of low water demand. Moscow, ASV, 2021; 366. (rus.).
2. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Dondukov V.G. Cements and additives for producing high-strength concretes. *Construction Materials*. 2017; 11:4-10. EDN ZWUFVB. (rus.).
3. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kusnetsov Y.S., Volodin V.M., Belyakova E.A. Next generation concrete on the basis of fine-grained dry powder mixes. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 8(34):47-53. EDN PJWLHF. DOI: 10.5862/mce.34.7. (rus.).
4. Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Yurova V.S. On the issue of expanding the base of mineral and complex additives for cement concrete. *E3S Web of Conferences*. 2019; 135:01018. DOI: 10.1051/e3sconf/201913501018
5. Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Yurova V.S. Complex organomineral additives with hardening accelerator. *Solid State Phenomena*. 2018; 284:929-935. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.284.929
6. Nizina T.A., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I. Fiber fine-grained concretes with polyfunctional modifying additives. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 4(72):73-83. DOI: 10.18720/MCE.72.9. EDN ZFCAMF.
7. Nizina T.A., Balykov A.S., Korovkin D.I., Volodin V.V. Physical and mechanical properties of modified fine-grained fibre-reinforced concretes containing carbon nanostructures. *International Journal of Nanotechnology*. 2019; 16(6/7/8/9/10):496. DOI: 10.1504/ijnt.2019.106621
8. Bazhenov Y.M. *Concrete science : textbook*. Moscow, ASV Publishing House, 2015; 144. (rus.).
9. Nguyen Doan Tung Lam, Samchenko S.V. Complex modifier based on alumina cement and pozzolanic addition. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(5):709-716. DOI: 10.22227/19970935.2023.5.709-716 (rus.).
10. Lam N.D.T., Samchenko S.V., Shvetsova V.A., Bulgakov B.I. Influence of complex additives on the strength of cement stone at an early age. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 5:52-59. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.05.52-59. EDN PFYHXG. (rus.).
11. Butt Y.M. *Technology of cement and other binders*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976; 407. (rus.).
12. Habert G., Choupay N., Escadeillas G., Guillaume D., Montel J.M. Clay content of argillites: Influence on cement based mortars. *Applied Clay Science*. 2009; 43(3-4):322-330. DOI: 10.1016/j.clay.2008.09.009
13. Schulze S.E., Rickert J. Pozzolanic activity of calcined clays. *SP-289: Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues*. 2012.
14. Fernandez R., Martirena F., Scrivener K.L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41(1):113-122. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.09.013
15. Rakhimov R.Z., Kamalova Z.A., Yermilova E.Y. Blended portland cement based on thermally activated clays and carbonate additives. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018; 9(4):578-583. DOI: 10.1134/s2075113318040329
16. Balykov A.S., Nizina T.A., Volodin V.V., Kyashkin V.M. Effects of calcination temperature and time on the physical-chemical efficiency of thermally activated clays in cement systems. *Materials Science Forum*. 2021; 1017:61-70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1017.61
17. Nizina T., Balykov A., Volodin V., Kyashkin V. Structure and properties of cement systems with additives of calcined clay and carbonate rocks. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 8(116):11602. DOI: 10.34910/MCE.116.2. EDN XFXNAO.
18. Volodin V.V., Nizina T.A. Analysis of the mineral raw material base of the republic of Mordovia suitable for the production of active mineral additives. *Expert: Theory and Practice*. 2023; 1(20):59-62. DOI: 10.51608/26867818_2023_1_59. EDN ZBEXPG. (rus.).
19. Taylor H.F. *Chemistry of cements*. Moscow, Mir Publ., 1996; 529. (rus.).
20. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savelyev V.G. *Methods of physical and chemical analysis of binders : textbook*. Moscow, Higher School Publ., 1981; 335. (rus.).
21. Sheinfeld A.V., Kaprielov S.S., Chilin I.A. Influence of temperature on the parameters of the structure and properties of cement systems with organo-mineral modifiers. *Urban planning and architecture*. 2017; 7(1):58-63. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.01.10. EDN YRDUEV. (rus.).
22. Detwiler R.J., Mehta P.K. Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete. *ACI Materials Journal*. 1989; 86(6):609-614. DOI: 10.14359/2281

Received October 22, 2023.

Adopted in revised form on February 13, 2024.

Approved for publication on February 14, 2024.

B I O N O T E S: **Vladimir V. Volodin** — Candidate of Technical Sciences, research engineer of the Research Laboratory of Ecological and Meteorological Monitoring, Construction Technologies and Expertise; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RSCI: 933723, Scopus: 57195424982, ResearcherID: AAH-7738-2020, ORCID: 0000-0002-3008-6242; volodinvv1994@gmail.com;

Oleg V. Tarakanov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Territorial Management; **Penza State University of Architecture and Construction (PGUAS)**; 28 German Titov st., Penza, 440028, Russian Federation; ID RSCI: 448093, Scopus: 7004757888; tarov60@mail.ru;

Tat'yana A. Nizina — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Structures; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RSCI: 131099, Scopus: 57190161363, ResearcherID: P-2639-2017, ORCID: 0000-0002-2328-6238; nizinata@yandex.ru;

Vladimir M. Kyashkin — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Physical Materials Science; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RSCI: 27869, Scopus: 7801669853, ResearcherID: AAE-1757-2019, ORCID: 0000-0002-3413-247X; kyashkin@mail.ru;

Artemiy S. Balykov — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Research Laboratory of Ecological and Meteorological Monitoring, Construction Technologies and Expertise; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RSCI: 813269, Scopus: 57190170885, ResearcherID: AAF-4208-2020, ORCID: 0000-0001-9087-1608; artbalrun@yandex.ru.

Author contributions:

Vladimir V. Volodin — development of the research methodology, processing of the material, writing the source text, creating illustrations and tables, making samples.

Oleg V. Tarakanov — editing of text material.

Tat'yana A. Nizina — scientific guidance, research methodology.

Vladimir M. Kyashkin — conducting experimental studies, collecting material.

Artemiy S. Balykov — participation in experimental work, editing the text of the article, making samples.

The authors declare no conflict of interest.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 502.64

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1328-1342

Проблема нефтезагрязненной геосреды и пути ее решения

Константин Львович Чертес¹, Виталий Николаевич Пыстин¹,
Ольга Владимировна Тупицына¹, Ирина Михайловна Евграфова²

¹ Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. С одной стороны, загрязненные грунты выступают источником деградации экосистем, с другой — потенциальным основанием для возведения сооружений. На площадках нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятий постоянно осуществляются строительные работы. Строительство новых и реконструкция существующих установок сопровождаются сносом старых объектов вплоть до извлечения фундаментов из загрязненной геосреды.

Материалы и методы. Оценка нефтезагрязненных грунтов проводилась на существующих предприятиях нефтяного комплекса в ходе проектно-изыскательских работ по подготовке площадок к новому строительству. На стадии изысканий исследовали несущую способность загрязненных грунтов с использованием метода штамповых испытаний. Отдельные параметры, необходимые для оценки строительного освоения промплощадок без экскавации загрязненных грунтов, определяли в грунтовой лаборатории по стандартным методикам.

Результаты. Нефтезагрязненные грунты под площадками реконструируемых предприятий отличаются многообразием видового состава, геомеханических свойств и экологических показателей. Соответственно многообразно и количество направлений ликвидации загрязнений. Промывку загрязненных грунтов осуществляли растворами реагентов (флокулянт, сода, карбонизированная вода) через сети дрена и скважин под давлением. При этом происходил перевод загрязнений, «защемленных» в порах и капиллярах грунта, в свободное состояние с последующим оттоком в дренаж, перехватом загрязненной жидкости и ее подъемом на поверхность для дальнейшей очистки.

Выводы. Учитывая значимость проблемы, авторами был разработан и внедрен в строительную практику набор технологий, позволяющих проводить на территориях реконструируемых и ликвидируемых объектов нефтяного комплекса удаление углеводородсодержащих загрязнений без извлечения грунтов из выемок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нефтезагрязненные грунты, охрана окружающей среды, рекультивация, экологическая безопасность, санация недр

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чертес К.Л., Пыстин В.Н., Тупицына О.В., Евграфова И.М. Проблема нефтезагрязненной геосреды и пути ее решения // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1328–1342. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1328-1342

Автор, ответственный за переписку: Ирина Михайловна Евграфова, irina-sen811@yandex.ru.

The problem of the oil-contaminated geo-environment and ways to solve it

Konstantin L. Chertes¹, Vitaliy N. Pystin¹, Olga V. Tupitsyna¹, Irina M. Evgrafova²

¹ Samara State Technical University (SamGTU); Samara, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. On the one hand, polluted soils are a source of ecosystem degradation. On the other hand, it is a potential basis for the construction of structures. Construction works are constantly carried out at the sites of oil producing and oil processing enterprises. The construction of new and reconstruction of existing installations is accompanied by the demolition of old facilities up to the extraction of foundations from contaminated.

Materials and methods. The assessment of oil-contaminated soils was carried out at existing enterprises of the oil complex during design and survey work to prepare sites for new construction. At the survey stage, the bearing capacity of contaminated soils was investigated using the stamp test method. The individual parameters necessary to assess the construction development of industrial sites without excavating contaminated soils were determined in a soil laboratory using standard methods.

Results. The oil-contaminated soils under the sites of the reconstructed enterprises are distinguished by a variety of species composition, geomechanical properties and environmental indicators. Accordingly, the number of ways to eliminate pollu-

tion is diverse. The contaminated soils were washed with reagent solutions (flocculant, soda, carbonized water) through a network of drains and wells under pressure. At the same time, the contamination “trapped” in the pores and capillaries of the soil was transferred to a free state, followed by outflow into the drainage, interception of the contaminated liquid and its rise to the surface for subsequent cleaning.

Conclusions. Taking into account the importance of the problem, the authors developed and introduced into construction practice a set of technologies that allow for the removal of hydrocarbon-containing pollutants in the territories of reconstructed and liquidated facilities of the oil complex, without extracting soils from recesses.

KEYWORDS: oil-contaminated soils, environmental protection, reclamation, environmental safety, subsoil remediation

FOR CITATION: Chertes K.L., Pystin V.N., Tupitsyna O.V., Evgrafova I.M. The problem of the oil-contaminated geo-environment and ways to solve it. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1328-1342. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1328-1342 (rus.).

Corresponding author: Irina M. Evgrafova, irina-sen811@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Геосреда в границах зоны аэрации загрязняется нефтепродуктами в результате прорывов на трубопроводах и утечек углеводородов из емкостных сооружений. Долговременные инфильтраты из накопителей нефтеотходов также приводят к загрязнению грунтов.

Глубина загрязнения может составлять десятки, а в отдельных случаях и сотни метров [1–3]. Состав нефтезагрязненной геосреды разнообразен. Различаются виды загрязненных грунтов, их генезис, механическая структура и физические свойства. В широком диапазоне значений представлены содержания загрязнений, соотношения нефти и подземной воды. Различны диапазоны значений пластичности, вязкости, деформационных характеристик грунтов, а также способности загрязнений к биохимической и химической трансформации¹. С одной стороны, загрязненные грунты выступают источником деградации экосистем, с другой — потенциальным основанием для возведения сооружений.

На площадках нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятий постоянно осуществляются строительные работы. Строительство новых и реконструкция существующих установок сопровождаются сносом старых объектов вплоть до извлечения фундаментов из загрязненной геосреды².

СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» устанавливает требования к возможности использования грунтов для строительства. При этом применение загрязненных грунтов для строительства запрещено. Поэтому для возведения новых объектов на существующих промплощадках производят экскавацию и вывоз загрязненных грунтов до подошвы будущих фундаментов. В отдельных случаях осуществляют полную замену строительных оснований чистым грунтом. При этом

образуется значительное количество отходов, происходит деградация геосреды на значительном удалении от предприятий из-за формирования новых и расширения существующих карьеров.

Практический опыт показал, что стоимость работ по замене грунтов котлованов составляет до 20 % от капиталозатрат на строительные работы. В эти работы входят выемка загрязненного грунта вплоть до подошвы новых фундаментов, его доставка на объекты обезвреживания, обработка для снижения класса опасности, а также покупка, транспорт, обратная засыпка и уплотнение чистого грунта.

Перед специалистами стоит проблема, очерчиваемая кругом вопросов:

- можно ли использовать нефтезагрязненные грунты в качестве строительных оснований с проведением очистных мероприятий без извлечения массива из геосреды;
- на каких типах грунтов, подвергшихся загрязнению, и при каких остаточных содержаниях нефтепродуктов можно осуществлять строительные работы;
- возможна ли подготовка загрязненных промплощадок к строительным работам без извлечения углеводородных токсикантов из геосреды;
- какие методы удаления загрязнений из геосреды или, наоборот, их иммобилизации целесообразно применять на освоенных строительством территориях, не нарушая сплошность пород, т.е. без экскавации, которая превращает грунт в отход. При этом необходимо учитывать и обременения близкорасположенными пожаро- и взрывоопасными производствами.

Цель исследования — обоснование возможности хозяйственно-строительного освоения территорий, деградированных деятельностью нефтяного комплекса без извлечения загрязненных грунтов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Критериально-параметрическая оценка деградированных углеводородами грунтов как потенциальных оснований для строительства.
2. Создание новых и адаптация существующих технологий реагентной промывки нефтезагряз-

¹ ООО «ЛУКОЙЛ-Центрнефтепродукт». URL: <https://centrnp.lukoil.ru/ru>

² Реестр проектируемых, строящихся и введенных в эксплуатацию нефтеперерабатывающих заводов в РФ. URL: <https://rcit.su/inform-rf-npz.html>

ненных грунтов без нарушения их механической сплошности.

3. Определение соответствия вида возводимого сооружения типу грунта по загрязненности.

В настоящей работе предложено классифицировать области загрязненной геосреды и применяемые методы удаления углеводородов в зависимости от глубин:

- < 1,0 м — I аэробная подобласть; целесообразно применение в основном биохимического метода очистки. Обеспечиваются естественные условия «кислородного дыхания» микрофлоры-редуцента притоком из атмосферы;
- 1,0–3,0 м — II аэробная подобласть; целесообразно сочетание методов как биохимической очистки, так и реагентной промывки. «Кислородное дыхание» обеспечивается принудительным способом с использованием или рыхлительной техники, или низконапорной аэрации от вентилятора (давление воздуха до 0,6 атм); до глубины 3,0 м возможно применение физико-химических методов промывки или пропарки с флокулянт под давлением нагнетания раствора до 1,0 атм;
- 3,0–10,0 м — анаэробная область; здесь доступ кислорода с поверхности затруднен. Энергообмен обеспечивается за счет «нитритного» и «нитратного» дыхания микрофлоры; целесообразно применение средненапорной аэрации от воздуходувки или компрессора с давлением от 0,6 до 2,0 атм; подача промывочного раствора для химочистки возможна в диапазоне давлений от 1,0 до 10,0 атм;
- > 10,0 м — анаэробная область; биодеструкция загрязнений нецелесообразна; очистка обеспечивается высоконапорными физико-химическими методами под давлением более 10 атм.

В отдельных случаях применяют методы подачи промывочных растворов под давлением 100 атм и более, направленные на изменение фильтрационно-реологических свойств загрязненной горной породы, улучшение ее проницаемости и снижение вязкости загрязнений неньютоновской природы [4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценку нефтезагрязненных грунтов проводили на существующих предприятиях нефтяного комплекса в ходе проектно-изыскательских работ по подготовке площадок к новому строительству. На стадии изысканий исследовали несущую способность загрязненных грунтов с использованием метода штамповых испытаний. Отдельные параметры, необходимые для оценки строительного освоения промплощадок без экскавации загрязненных грунтов, определяли в грунтовой лаборатории по стандартным методикам. Исследуемые параметры объединены в группы: геомеханическую и геоэкологическую. Причем, в геомеханической группе сделан упор на несущую способность загрязненных углеводородами грунтов, а в экологическую группу, наряду с загрязнением, внесены параметры реологии и фильтрации грунтов, определяющие возможность их предварительной промывки. В составе геомеханической группы изучали коэффициент пористости, модуль деформации, сцепление, влажность и плотность грунта, показатель текучести и число пластичности. В составе геоэкологической группы исследовали общие содержания нефтепродуктов в грунте и подземных водах на доступных роторному бурению глубинах пробоботбора, а также коэффициенты фильтрации, динамической вязкости и степени опасности компонентов геосреды.

Табл. 1. Геомеханические свойства различных типов нефтезагрязненных грунтов и шламов (по данным инженерных изысканий)

Table 1. Geomechanical properties of various types of oil-contaminated soils and sludge (according to engineering surveys)

Наименование породы (ИГЭ) Name of the breed (EGE)	Геомеханические и отдельные структурные показатели Geomechanical and selected structural indicators						
	Коэффициент пористости ε Porosity coefficient ε	Диапазон линейных размеров частиц l , мм Range of linear particle sizes l , mm	Модуль деформации E , МПа Modulus of deformation E , MPa	Сцепление C , кПа The clutch with C , kPa	Плотность ρ , т/м ³ (при влажности до 30 %) Density ρ , t/m ³ (at humidity up to 30 %)	Показатель текучести I_l Turnover rate I_l	Число пластичности I_p The number of plasticity I_p
Песок мелкий/пылеватый с содержанием нефтепродуктов до 0,5 % масс. Fine/dusty sand with a content of petroleum products up to 0.5 % by weight	0,6–0,7	0,1–1,0	20–30	–	1,65–1,70	–	–

Продолжение табл. 1 / Continuation of the Table

Наименование породы (ИГЭ) Name of the breed (EGE)	Геомеханические и отдельные структурные показатели Geomechanical and selected structural indicators						
	Коэффициент пористости ε Porosity coefficient ε	Диапазон линейных размеров частиц l , мм Range of linear particle sizes l , mm	Модуль деформации E , МПа Modulus of deformation E , MPa	Сцепление C , кПа The clutch with C , kPa	Плотность ρ , т/м ³ (при влажности до 30 %) Density ρ , t/m ³ (at humidity up to 30 %)	Показатель текучести I_l Turnover rate I_l	Число пластичности I_p The number of plasticity I_p
Песок мелкий с содержанием нефтепродуктов 0,5–1,0 % масс. Fine sand with a petroleum product content of 0.5–1.0 % by weight	0,5–0,6	0,5–3,0	30–40	9,0–11,0	1,65–1,70	–	–
Песок мелкий с содержанием нефтепродуктов более 1,0 % масс. Fine sand with a petroleum product content of more than 1.0 % by weight	0,4–0,5	0,5–3,0	40–50	12,0–15,0	1,6–1,65	–	1,0–3,0
Глина твердая с содержанием нефтепродуктов до 0,5 % масс. Solid clay with a content of petroleum products up to 0.5 % by weight	0,6–0,7	0,001–0,05	17,0–21,0	60,0–70,0	1,2–1,3	0,15–0,25	3,0–10,0
Глина твердая (до полутвердой) с содержанием нефтепродуктов 0,5–1,0 % масс. Clay is solid (up to semi-solid) with a petroleum product content of 0.5–1.0 % by weight	0,5–0,6	0,001–0,05	15,0–18,0	40,0–45,0	1,2–1,5	0,15–0,25	7,0–15,0
Глина твердая (до полутвердой) с содержанием нефтепродуктов 1,0–3,0 % масс. Clay is solid (up to semi-solid) with a petroleum product content of 1.0–3.0 % by weight	0,4–0,5	0,001–0,05	12,0–15,0	30,0–40,0	1,0–1,5	0,25–0,50	10,0–17,0
Глина пластичная с содержанием нефтепродуктов 3,0–5,0 % масс. Plastic clay with a petroleum product content of 3.0–5.0 % by weight	0,4–0,5	0,001–0,05	9,0–12,0	25,0–35,0	< 1	0,50–0,75	17,0–25,0
Суглинок с доломитом с содержанием нефтепродуктов 1,0–3,0 % масс. Loam with dolomite with a petroleum product content of 1.0–3.0 % by weight	0,45–0,8	0,01–0,1	20,0–30,0	25,0–35,0	1,2–1,3	0,25–0,50	5,0–12,0

Наименование породы (ИГЭ) Name of the breed (EGE)	Геомеханические и отдельные структурные показатели Geomechanical and selected structural indicators						
	Коэффициент пористости ϵ Porosity coefficient ϵ	Диапазон линейных размеров частиц l , мм Range of linear particle sizes l , mm	Модуль деформации E , МПа Modulus of deformation E , MPa	Сцепление C , кПа The clutch with C , kPa	Плотность ρ , т/м ³ (при влажности до 30 %) Density ρ , t/m ³ (at humidity up to 30 %)	Показатель текучести I_t Turnover rate I_t	Число пластичности I_p The number of plasticity I_p
Суглинок с доломитом с содержанием нефтепродуктов 3,0–5,0 % масс. Loam with dolomite with an oil content of 3.0–5.0 % by weight	0,65–0,75	0,01–0,1	15,0–25,0	15,0–20,0	1,2–1,3	0,50–1,0	3,0–10,0
Смесь песков и нефтешламов с содержанием нефтепродуктов более 5,0 % масс. A mixture of sands and oil sludge with an oil product content of more than 5.0 % by weight	0,65–0,75	0,4–0,6	15,0–20,0	10,0–15,0	1,5–1,55	–	1,0–5,0
Нефтешламы с содержанием нефтепродуктов более 10 % масс. Oil sludge with an oil product content of more than 10 % by weight	> 0,8	< 0,001	–	–	1,25–1,30	–	–
Буровые шламы на водной основе суглинистые/пылеватые (содержание нефтепродуктов менее 0,05 % масс.) Water-based drilling mud, loamy/powdery (oil content less than 0.05 % by weight)	> 0,8	< 0,001	–	–	1,90–2,10	–	–

Параметры оценки геосреды по двум группам показателей представлены в табл. 1, 2.

Были проведены исследования по очистке нефтезагрязненных грунтов с использованием биохимических (слоевое и штабельное компостирование) и высоконапорных физико-химических методов (промывка с флокулянтами). Давление нагнетания промывочного раствора регулировали в диапазоне от $1,0 \pm 0,2$ до $40,0 \pm 1,0$ МПа с применением промышленной установки высоконапорного нагнетания растворов в геосреду [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из табл. 1, 2 видно, что нефтезагрязненные грунты под площадками реконструируемых пред-

приятий отличает многообразие видового состава, геомеханических свойств и экологических показателей. Соответственно многообразно и количество направлений ликвидации загрязнений.

Промывку загрязненных грунтов осуществляли растворами реагентов (флокулянт, сода, карбонизированная вода) через сети дрен и скважин под давлением. Происходил перевод загрязнений, «защемленных» в порах и капиллярах грунта, в свободное состояние с последующим оттоком в дренаж, перехватом загрязненной жидкости и ее подъемом на поверхность для последующей очистки. При промывке очищаемые от нефтяных загрязнений грунты, особенно на глубинах заложения фундаментов, не должны терять несущую способность как ос-

Табл. 2. Геоэкологические показатели загрязненных грунтов и шламов (по данным инженерных изысканий)
Table 2. Geoecological indicators of contaminated soils and sludge (according to engineering surveys)

Наименование породы (ИГЭ) Name of the breed (EGE)	Отдельные геоэкологические показатели Selected geoecological indicators					
	Общее содержание нефтепродуктов в грунте $C_{н.п.р}$, мг/кг The total content of petroleum products in the soil is $S_{н.п.р}$, mg/kg	Общее содержание нефтепродуктов в подземных водах $C_{н.п.в}$, мг/л The total content of petroleum products in groundwater is $S_{н.п.в}$, mg/l	Коэффициент фильтрации грунта $K_{ф}$, м/сут Soil filtration coefficient C_f , m/day	Коэффициент динамической вязкости μ при $5,0 \pm 2,0$ °С, Па·с·10 ⁻³ Dynamic viscosity coefficient μ , at 5.0 ± 2.0 °C, Pa·s·10 ⁻³	Глубина залегания подземных вод от поверхности земли $H_{п.в}$, м Depth of groundwater from the earth's surface $N_{п.в}$, m	Коэффициент степени опасности отхода K_o The coefficient of the degree of danger of waste K_o
Песок мелкий/пылеватый с содержанием нефтепродуктов до 0,5 % масс. Fine/dusty sand with a content of petroleum products up to 0.5 % by weight	1462–3643	0,15–0,57	0,1–2,0	98–344	8,0 ± 0,5	87–119
Песок мелкий с содержанием нефтепродуктов 0,5–1,0 % масс. Fine sand with a petroleum product content of 0.5–1.0 % by weight	5211–9427	0,78–2,43	0,1–2,0	485–1024	8,0 ± 0,5	136–422
Песок мелкий с содержанием нефтепродуктов более 1,0 % масс. Fine sand with a petroleum product content of more than 1.0 % by weight	12 293–24 690	3,55–10,15	0,1–2,0	877–2480	8,0 ± 0,5	495–813
Глина твердая с содержанием нефтепродуктов до 0,5 % масс. Solid clay with a content of petroleum products up to 0.5 % by weight	1287–3425	0,22–0,75	< 5,0 · 10 ⁻⁴	2732–9584	12,0 ± 0,5	62–217
Глина твердая (до полутвердой) с содержанием нефтепродуктов 0,5–1,0 % масс. Clay is solid (up to semi-solid) with a petroleum product content of 0.5–1.0 % by weight	6189–10 332	4,45–15,76	< 5,0 · 10 ⁻⁵	12 452–18 584	12,0 ± 0,5	582–970
Глина твердая (до полутвердой) с содержанием нефтепродуктов 1,0–3,0 % масс. Clay is solid (up to semi-solid) with a petroleum product content of 1.0–3.0 % by weight	14 226–29 470	3,88–26,52	3,2 · 10 ⁻⁴ –7,4 · 10 ⁻⁵	27 633–38 488	12,0 ± 0,5	–

Наименование породы (ИГЭ) Name of the breed (EGE)	Отдельные геоэкологические показатели Selected geoeccological indicators					
	Общее содержание нефтепродуктов в грунте $C_{н.п.г}$, мг/кг The total content of petroleum products in the soil is $S_{н.п.г}$, mg/kg	Общее содержание нефтепродуктов в подземных водах $C_{н.п.в}$, мг/л The total content of petroleum products in groundwater is $S_{н.п.в}$, mg/l	Коэффициент фильтрации грунта $K_{ф}$, м/сут Soil filtration coefficient C_f , m/day	Коэффициент динамической вязкости μ при $5,0 \pm 2,0$ °C, Па·с·10 ⁻³ Dynamic viscosity coefficient μ , at $5,0 \pm 2,0$ °C, Pa·s·10 ⁻³	Глубина залегания подземных вод от поверхности земли $H_{п.в}$, м Depth of groundwater from the earth's surface $N_{p.v}$, m	Коэффициент степени опасности отхода K_o The coefficient of the degree of danger of waste K_o
Глина пластичная с содержанием нефтепродуктов 3,0–5,0 % масс. Plastic clay with a petroleum product content of 3.0–5.0 % by weight	38 204–68 328	31,45–57,73	$8,1 \cdot 10^{-5}$ – $5,2 \cdot 10^{-6}$	39 629– –54 831	$18,0 \pm 0,5$	2643–7910
Суглинок с доломитом с содержанием нефтепродуктов 1,0–3,0 % масс. Loam with dolomite with a petroleum product content of 1.0–3.0 % by weigh	9248–29 242	1,07–3,62	$4,6 \cdot 10^{-5}$ – $2,1 \cdot 10^{-6}$	47 228– –79 315	$27,0 \pm 0,5$	3558–8034
Суглинок с доломитом с содержанием нефтепродуктов 3,0–5,0 % масс. Loam with dolomite with an oil content of 3.0–5.0 % by weight	34 250–52 243	18,39–24,55	$1,3 \cdot 10^{-6}$ – $3,4 \cdot 10^{-7}$	82 941– –11 2062	$27,0 \pm 0,5$	9268–21 452
Смесь песков и нефтешламов с содержанием нефтепродуктов более 5,0 % масс. A mixture of sands and oil sludge with an oil product content of more than 5.0 % by weight	69 251– –11 2452	112,94–285,94	$< 5,0 \cdot 10^{-4}$	11 836– –25 387	$4,0 \pm 0,5$	18 593– –42 176
Нефтешламы с содержанием нефтепродуктов более 10 % масс. Oil sludge with an oil product content of more than 10 % by weight	155 727– –468 950	2190,4–4238,2	$< 5,0 \cdot 10^{-5}$	162 943– –272 540	$1,5 \pm 0,2$	53 296– –86 452
Буровые шламы на водной основе суглинистые/пылеватые (содержание нефтепродуктов менее 0,05 % масс.) Water-based drilling mud, loamy/powdery (oil content less than 0.05 % by weight)	128–501	0,04–0,17	0,1–2,0	287–789	$1,0 \pm 0,1$	23–55

нования для строительства. Отдельное внимание при разработке опытно-промышленных испытаний и внедрении перечисленных выше технологий уделялось изучению влияния ряда абиотических факторов среды, а также управляющих параметров (исходного содержания углеводородов, рабочих доз реагентов и добавок, давлений нагнетания промышленных и вяжущих растворов) на деформационные и экологические показатели геосреды.

На рис. 1, 2 приведены зависимости изменения величин модуля деформации и сцепления от общего содержания нефтепродуктов в образцах грунтов с различной степенью загрязненности; графики представлены в логарифмических координатах.

Исследования показали, что содержание углеводородов в нефтезагрязненных грунтах в диапазоне значений от 1,0 до 5,0 % масс. (10 000–50 000 мг/кг) не приводит к существенному понижению модуля деформации нарушенного грунта, если образец находится в состоянии монолита. Диапазоны значений модуля деформации для образцов глин (влажность 25,87 %) и песков с пылеватыми включениями (влажность 38,61 %) составили $(7,0–38,0) \pm 1,0$ МПа и $(4,0–25,0) \pm 1,0$ МПа соответственно. Подобные значения обеспечивают несущую способность нефтезагрязненных грунтов и их последующее использование в качестве оснований под объекты капитального строительства. Аналогичные результаты были получены для показателей удельного сцепления грунтов: $(28,0–60,0) \pm 1,0$ кПа — глины и $(2,0–6,0) \pm 1,0$ кПа — пески.

Снижение несущей способности нефтезагрязненных оснований происходит из-за ослабления межагрегатных связей в скелете грунта и начинает проявляться при достижении содержания углеводородов более 5 % масс. ($> 50\,000$ мг/кг). По всей видимости, углеводородные инфильтраты в поровом пространстве оснований с содержанием нефтепродуктов > 5 % масс. определяют текучую консистенцию грунтов. При этом происходит снижение угла внутреннего трения и удельного сцепления, изменяется сжимаемость грунтов, особенно в водонасыщенных глинах и песках с преобладанием пылеватых частиц [6].

Учитывая значимость проблемы, авторами был разработан и внедрен в строительную практику набор технологий, позволяющих проводить на территориях реконструируемых и ликвидируемых объектов нефтяного комплекса удаление углеводородсодержащих загрязнений без извлечения грунтов из выемок.

К таким технологиям относятся:

- удаление из загрязненных почв до глубин 1,0 м летучих фракций углеводородов методом газоконтактной продувки [7, 8];
- удаление углеводородов из загрязненных грунтов и нефтеотходов в верхних горизонтах пород зоны аэрации (до глубин 3,0 м) с использованием биотермических методов [9];
- иммобилизация нефтяных загрязнений на глубинах до 10,0 м путем закачки в геосреду растворов реагентов, обладающих вяжущими, флокулирующими и сорбционными свойствами [10];

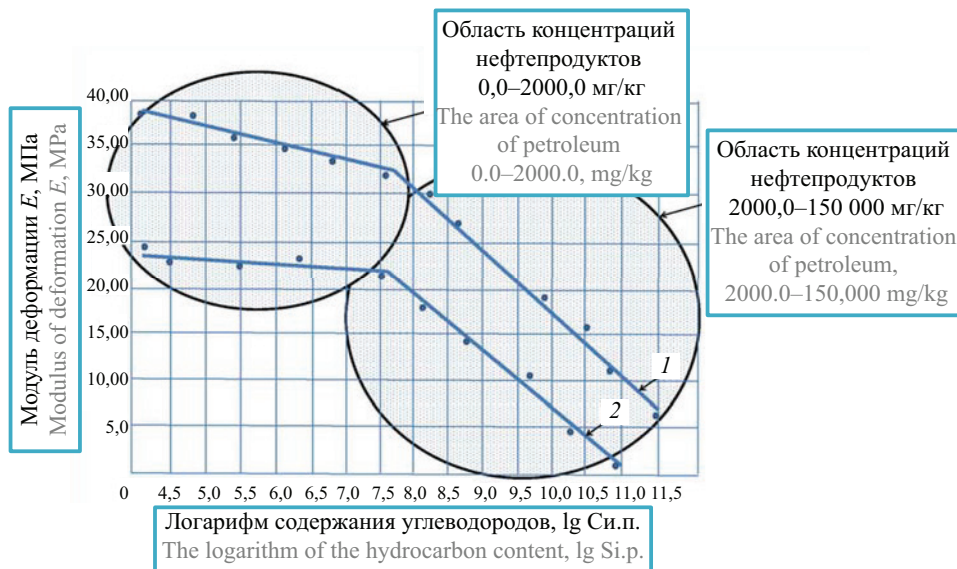


Рис. 1. Изменение величин модуля деформации E , МПа, от общего содержания нефтепродуктов $C_{н.п.}$ в образцах грунтов с различной степенью загрязненности; ось абсцисс представлена в логарифмических значениях: 1 — образец глины твердой до полутвердой, влажностью 25,87 %; 2 — образец песка мелкого с пылеватыми включениями, влажностью 38,61 %

Fig. 1. Change in the values of the deformation modulus E , MPa, from the total content of petroleum products $C_{н.п.}$ in soil samples with varying degrees of contamination; the abscissa axis is represented in logarithmic values: 1 — sample of clay, solid to semi-solid, with humidity of 25.87 %; 2 — sample of fine sand with dusty inclusions, with humidity of 38.61 %

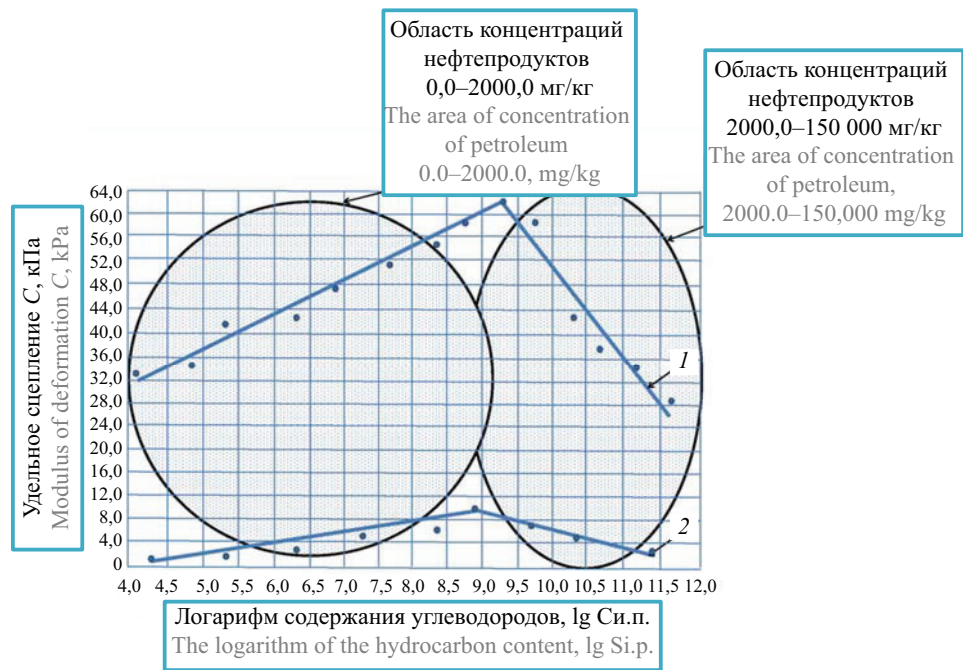


Рис. 2. Изменение величин удельного сцепления C , кПа, от общего содержания нефтепродуктов $C_{н.п.}$ в образцах грунтов с различной степенью загрязненности; ось абсцисс представлена в логарифмических значениях: 1 — образец глины твердой до полутвердой, влажностью 25,87 %; 2 — образец песка мелкого с пылеватыми включениями, влажностью 38,61 %

Fig. 2. Change in the values of specific adhesion C , kPa, from the total content of petroleum products in soil samples with varying degrees of contamination; the abscissa axis is represented in logarithmic values: 1 — sample of solid clay, up to semi-solid, with humidity of 25.87 %; 2 — sample of fine sand with dusty inclusions, with humidity of 38.61 %

- очистка нефтезагрязненного грунта на глубине более 10 м с использованием высоконапорной промывки растворами, содержащими углекислоту (технология Jet) [11, 12].

В I аэробной подобласти на глубине до 1,0 м ликвидацию углеводородных загрязнений возможно проводить, как правило, без извлечения грунтов из геосреды. Здесь рекомендуется применение методов аэробной биохимической деструкции аборигенными или искусственно созданными микроорганизмами-редуцентами; производят рыхление, мульчирование грунта и после обезвреживания его укатку [13, 14].

При ликвидации нефтяных загрязнений во II аэробной подобласти (1,0–3,0 м), а также в анаэробной области (до 10,0 м) возможно производить экскавацию грунта, его формирование в штабели или бурты с последующей биотермической обработкой. Аэрацию извлеченного из геосреды грунта целесообразно обеспечивать перемешиванием ковшом или непосредственно от воздухоподводящих устройств. После обезвреживания возможен возврат грунтов в котлован в качестве вторичных рекультивационных материалов. Также на глубинах до 10,0 м имеет смысл использование низконапорной дренажной промывки нефтяных загрязнений.

Ликвидация загрязнений на значительных глубинах (более 10,0 м) сопряжена с необходимостью применения высоконапорной промывки [15, 16].

Варианты схем очистки грунтов для различных условий залегания углеводородных загрязнений в различных фрагментах загрязненной геосреды с использованием методов нагнетания и откачки промывных растворов представлены на рис. 3.

Решением проблемы строительства на грунтах, деградированных поступлением углеводородов, были охвачены промышленные площадки трех нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) Среднего Поволжья. Здесь в период 2009–2018 гг. проводили полную реконструкцию технологических установок для последующего выпуска топлив марок Евро-5.

На двух НПЗ выполнили объектный демонтаж бездействующих и морально изношенных установок, извлечение фундаментов в горизонтах отметок (–2,50)–(20,0) и частичную экскавацию нефтезагрязненных грунтов с последующей заменой привозными грунтами.

На одном НПЗ произвели снос старых установок в отметках (0,00)–(–3,00), однако строительство осуществили на загрязненных грунтах, так как их геомеханические характеристики отвечали требованиям к производству работ.

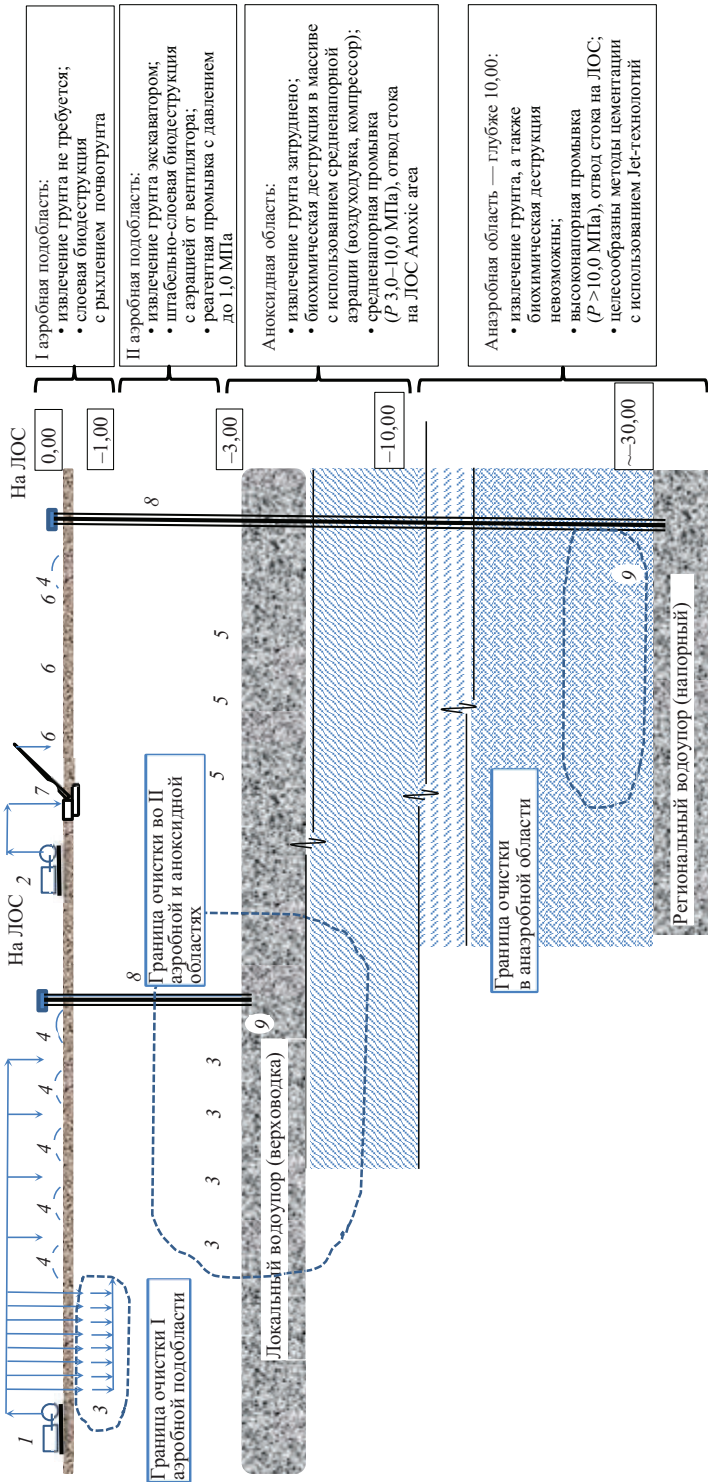
В общей сложности на площадках существующих НПЗ после объектного демонтажа были построены десятки новых цехов, например каталитического риформинга, крекинга, изомеризации, а также вспо-

могательных установок обслуживания этих цехов, включая эстакадные и надземные коммуникации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения соответствия вида возводимого сооружения типу грунта по загрязненности все установки по расчетным и фактическим нагрузкам на основание дифференцированы на три группы:

- Группа 1. В основном в нее входят временные или бесфундаментные сооружения и часть эстакад. Нагрузки на основание составляют до 1,0 МПа;
- Группа 2. К ней отнесли основной набор строений с фундаментами ленточного и частично свайного типов глубиной 3,0–5,0 м под нагрузками от 1,0 до 3,0 МПа;
- Группа 3. Сооружения на свайных фундаментах, резервуарные парки от 10 до 50 тыс. м³ и более, а так-



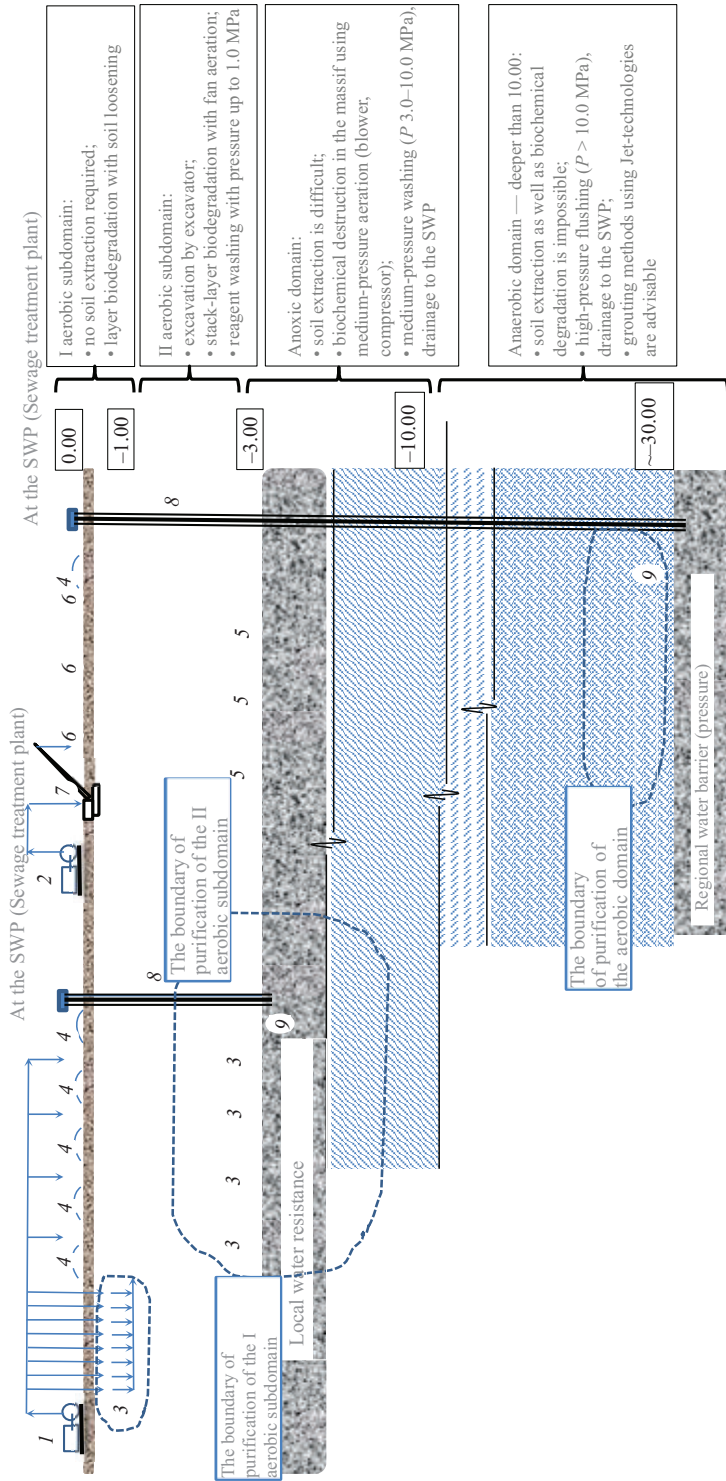


Рис. 3. Варианты схем очистки грунтов для различных условий залегания углеводородных загрязнений: ЛОС — локальные очистные сооружения; 1 — насосная группа низкого давления; 2 — насосная группа высокого давления; 3 — промывные дрены; 4 — колодцы сбора загрязненного промывочного раствора; 5 — промывные нагнетательно-извлекающие скважины; 6 — превенторы; 7 — передвижной высоконапорный экструдер (Jet-нагнетатель); 8 — композитный шпунт геотехнической защиты, прорезанный до водоупора; 9 — погружной насос

Fig. 3. Variants of soil purification schemes for various conditions of occurrence of hydrocarbon pollutants: SWP - Sewage treatment plants; 1 — low pressure pumping group; 2 — high pressure pumping group; 3 — flushing drains; 4 — wells for collecting contaminated flushing solution; 5 — flushing injection and extraction wells; 6 — preventers; 7 — mobile high-pressure extruder (Jet-supercharger); 8 — composite sheet pile of geotechnical protection, cut through to the water barrier; 9 — submersible pump

же новые ТЭЦ. Сооружения имеют заглубленную часть ниже — 5,00 м. Нагрузки составляют более 3,0 МПа (в отдельных случаях 10,0 МПа и более).

Сооружения группы 1 с нагрузками на естественное или создаваемое основания до 1,0 МПа расположены в первой аэробной подобласти. Их строительство не требует извлечения загрязненных грунтов. Очистку грунтов можно ограничить внесением биодобавок, слоевой биотермической деструкцией углеводородов, начиная с концентраций более 2000 мг/кг масс. с аэрацией рыхлением и последующей укаткой.

Во второй аэробной подобласти — от (–3,00) до (–5,00) целесообразно извлечение загрязненного грунта экскавацией с вывозом на полигон. Методы очистки подобных грунтов сопряжены с необходимостью штабельно-слоевой биодеструкции в диапазоне исходных концентраций углеводородов от 2000 до 50 000 мг/кг масс. Аэрацию штабелей возможно проводить от средненапорных воздухоподувающих устройств с давлением нагнетания 1,0–3,0 кПа. Также во второй аэробной подобласти возможна реагентная промывка через дрены под давлением раствора флокулянта до 1,0–2,0 МПа.

Сооружения группы 2 с нагрузками на основания до 3,0 МПа располагаются в аэробной и частично в анакисидной области.

Извлечение грунта экскавационной техникой здесь возможно до глубин 10,0 м. В качестве техно-

логий очистки такого грунта авторами рекомендована биохимическая деструкция в штабелях. Без извлечения нефтегрунта допустима биодеструкция углеводородов непосредственно в грунтовом массиве с использованием газодренажной системы и средненапорных аэрационных устройств (воздуходувки, компрессоры, давление более 3,0 кПа).

В отдельных случаях на стесненных территориях с опасными производствами извлечение грунта затруднено или невозможно. В подобных условиях в анакисидной области предпочтительна средненапорная промывка от загрязнений ($P = 3,0\text{--}10,0$ МПа) с отводом стока на ЛОС.

В анаэробной области (группа 3) нагрузки со стороны сооружений составляют 3,0–10,0 МПа и более. Криофильные условия среды, отсутствие доступа кислорода на глубину более 10,0 м не позволяют осуществлять очистку биохимическими методами. Поэтому для ликвидации углеводородных загрязнений здесь предпочтительны высоконапорная промывка ($P > 10,0$ МПа) с отводом стока на ЛОС, а в отдельных случаях методы цементации с использованием Jet-технологий.

Технологии очистки грунта от загрязнений для последующего осуществления хозяйственной деятельности входят составной частью в специализированные предприятия — комплексы санации нефтезагрязненной геосреды [17–20].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сафаров А.М., Акчурина Л.Р., Хурамуши-на Р.А., Мунирова Д.Д., Кузнецова Г.М., Сафаров А.Х. Процессы формирования и распространения техногенных потоков нефтяных углеводородов в природной среде // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. № 5 (121). С. 158–168. DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-4-158-168. EDN KQXOAJ.

2. Галинуров И.Р. Оценка техногенных потоков углеводородов в поймах рек в зоне влияния нефтехимических предприятий (на примере Республики Башкортостан) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2012. 23 с. EDN ZONEQH.

3. Чертес К.Л., Тупицына О.В., Петренко Е.Н. Система оценки и охраны компонентов геосреды от техногенных воздействий залежей углеводородов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2023. № 1. С. 87–94. DOI: 10.31857/S0869780923010034. EDN HSKUPL.

4. Чертес К.Л., Букин А.А. Типизация и фильтрационно-реологические свойства фрагментов геосреды, загрязненной шламонакопителями // Потаповские чтения — 2023 : сб. мат. VIII ежегодной Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. памяти д-ра техн. наук, профессора Александра Дмитриевича Потапова. 2023. С. 25–29. EDN CLZNQW.

5. Чертес К.Л., Букин А.А., Бухман Н.С., Пыстин В.Н., Тупицына О.В. Прогнозирование и ликвидация загрязнений, сформированных объектами накопленного экологического вреда (на примере бездействующих шламонакопителей) // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 9. С. 33–39. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-9-33-39. EDN KRKULT.

6. Мухаметшина Э.Р. Инновационная методика оценки состояния, паспортизации, систематизации и учета нефтезагрязненных участков // Нефтяная столица : мат. 4-й Междунар. мол. науч.-практ. форума. 2021. С. 142–147. EDN ZZTOKK.

7. Симбиркина К.П., Каверин А.В., Горшенникова Е.Л. Утилизация отходов нефтепродуктов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : мат. Всерос. науч.-метод. конф. 2019. С. 1278–1284. EDN YZBQPI.

8. Бикбулатова Г.Г., Ильин С.Н. Геодезическое обеспечение процесса утилизации загрязненных нефтяными отходами грунтов на технологических площадках биоремедиации // Геодезия, землеустройство и кадастры: проблемы и перспективы развития : сб. науч. тр. по мат. III Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию юбилею д-ра экон. наук, профессора Ю.М. Рогатнева. 2021. С. 10–12. EDN BBEEFU.

9. Мухаметшина Э.Р. Инноватика в представлении, учете, систематизации и паспортизации нефтезагрязненных участков // Западно-Сибирский нефтегазовый конгресс : сб. науч. тр. XIV Междунар. науч.-техн. конгресса студ. отделения общества инженеров-нефтяников — Society of Petroleum Engineers (SPE). 2022. С. 74–77. EDN KRNJRO.

10. Сыропятов Д.А., Бариева Э.Р., Серазеева Е.В., Королёв А.Э. Технология утилизации нефтешламных отходов // Академический вестник ELPIT. 2023. Т. 8. № 1 (23). С. 26–32. EDN XQMOHW.

11. Цыганков Д.А. Техническая рекультивация нефтезагрязненного участка земли // Современные проблемы науки и образования : мат. междунар. науч. конф., проведенных Академией Естествознания (Международной ассоциацией ученых, преподавателей и специалистов). 2023. С. 66–68. EDN TFRSPJ.

12. Конгар-оол В.В., Мелкозеров В.М., Кайзер Ю.Ф. Индустриальная очистка нефтезагрязненных земель, водоемов, лесных угодий и других ландшафтов // Вестник Тувинского государственного университета № 3. Технические и физико-математические науки. 2019. № 4 (54). С. 31–38. DOI: 10.24411/2077-6896-2019-10018. EDN NQXWHD.

13. Бургутудинов А.М., Колобова А.А. Применение нефтесодержащих отходов и нефтезагрязненных грунтов для устройства парогидроизолирующих прослоек в земляном полотне лесовозной автомобильной дороги // Теория и практика современной науки. 2022. № 3 (81). С. 60–66. EDN COHVPN.

14. Sivkov Y., Nikiforov A. Study of oil-contaminated soils phytotoxicity during bioremediation activities // Journal of Ecological Engineering. 2021. Vol. 22.

Issue 3. Pp. 67–72. DOI: 10.12911/22998993/132435

15. Tsivadze A.Yu., Fridman A.Ya., Tumanyan B.P., Novikov A.K., Polyakova I.Ya., Sudarkin A.P. Prospective preparations for accelerated bioremediation of oil-contaminated soils // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2020. Vol. 56. Issue 4. Pp. 588–592. DOI: 10.1007/s10553-020-01171-1

16. Lu X., Liu R., Xia L. Landscape planning and design and visual evaluation for landscape protection of geological environment // Journal of King Saud University — Science. 2023. Vol. 35. Issue 6. P. 102735. DOI: 10.1016/j.jksus.2023.102735

17. Liu C. Research on geological environment protection and geological disasters control countermeasures in China // 3C Empresa. Investigación y pensamiento crítico. 2023. Vol. 12. Issue 1. Pp. 186–205. DOI: 10.17993/3cemp.2023.120151.186-205

18. Lunev A.G., Tsapkova N.N., Pavlik G.N., Babayan V.R. A combination system for protection of the geological environment in toxic waste disposal area // Tailings and mine waste '96. 2022. Pp. 289–290. DOI: 10.1201/9781003077855-32. EDN VTUNZU.

19. Analysis of key points of geological exploration under the background of ecological environment protection // Foreign Language Science and Technology Journal Database Engineering Technology. 2022. DOI: 10.47939/et.v3i3(06).16. EDN UKXEEH.

20. Mustaev R., Kerimov V., Bondarev A., Guryanov S. Assessment of geological risks when performing prospecting and exploration for oil and gas // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 315 LNNS. Pp. 271–282. DOI: 10.1007/978-3-030-85799-8_23. EDN MEXROQ.

Поступила в редакцию 11 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 18 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 25 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Константин Львович Чертес** — доктор технических наук, профессор кафедры химической технологии и промышленной экологии; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 185126, Scopus: 16308870400, ORCID: 0000-0002-3353-4768; chertes2007@yandex.ru;

Виталий Николаевич Пыстин — кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии и промышленной экологии; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 741101, Scopus: 57192370017, ResearcherID: D-8410-2014, ORCID: 0000-0002-4027-1804; vitaliy.pystin@yandex.ru;

Ольга Владимировна Тупицына — доктор технических наук, доцент, доцент кафедры химической технологии и промышленной экологии; **Самарский государственный технический университет (СамГТУ)**; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 185125, Scopus: 57209210925, ResearcherID: E-1153-2014, ORCID: 0000-0003-0638-2700; olgatupicyna@yandex.ru;

Ирина Михайловна Евграфова — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инженерных изысканий и геоэкологии; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 433377, ORCID: 0009-0006-2747-6705; irina-sen811@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Safarov A.M., Akchurina L.R., Khuramshina R.A., Munirova D.D., Kyznetsova G.M., Safarov A.Kh. Processes of formation and distribution of petroleum hydrocarbons technogenic flows in natural environment. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2019; 5(121):158-168. DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-4-158-168. EDN KQXOAJ. (rus.).
2. Galinurov I.R. *Assessment of technogenic hydrocarbon flows in floodplains in the zone of influence of petrochemical enterprises (on the example of the Republic of Bashkortostan)*. Ufa, 2012; 23. EDN ZONEQH. (rus.).
3. Chertes K.L., Tupitsyna O.V., Petrenko E.N. Assessment and protection of geoenvironment components from impacts produced by technogenous hydrocarbon deposits. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*. 2023; 1:87-94. DOI: 10.31857/S0869780923010034. EDN HSKUPL. (rus.).
4. Chertes K.L., Bukin A.A. Typification and filtration-rheological properties of fragments of the geomedium contaminated with sludge accumulators. *Potapov readings – 2023 : collection of materials of the VIII annual All-Russian Scientific and Practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor Alexander Dmitrievich Potapov*. 2023; 25-29. EDN CLZNQW. (rus.).
5. Chertes K.L., Bukin A.A., Bukhman N.S., Pystin V.N., Tupitsyna O.V. Forecasting and elimination of pollution generated by objects of accumulated environmental damage (on the example of inactive sludge reservoirs). *Ecology and Industry of Russia*. 2023; 27(9):33-39. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-9-33-39. EDN KRKULT. (rus.).
6. Mukhametshina E.R. Innovative methodology for assessing the condition, certification, systematization and accounting of oil-contaminated sites. *The Oil Capital : materials of the 4th International Youth Scientific and Practical Forum*. 2021; 142-147. EDN ZZTOKK. (rus.).
7. Simbirskina K.P., Kaverin A.V., Gorshenina E.L. Waste disposal of petroleum products. *The University complex as a regional center of education, science and culture : materials of the All-Russian scientific and methodological Conference*. 2019; 1278-1284. EDN YZBQPJ. (rus.).
8. Bikbulatova G.G., Ilyin S.N. Geodetic support of the process of utilization of soils contaminated with oil waste at technological sites of bioremediation. *Geodesy, land management and cadastres: problems and prospects of development : collection of scientific papers based on the materials of the III international scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of Doctor of Economics, Professor Yu.M. Rohatnev*. 2021; 10-12. EDN BBEEFU. (rus.).
9. Mukhametshina E.R. Innovation in the representation, accounting, systematization and certification of oil-contaminated sites. *West Siberian Oil and Gas Congress : collection of scientific papers of the XIV International Scientific and Technical Congress of the student branch of the Society of Petroleum Engineers — Society of Petroleum Engineers (SPE)*. 2022; 74-77. EDN KRNJRO. (rus.).
10. Syropyatov D.A., Barieva E.R., Serazeeva E.V., Korolev A.E. Technology of utilization of oil sludge waste. *Academic Bulletin ELPIT*. 2023; 8(1):26-32. EDN XQMOHW. (rus.).
11. Tsygankov D.A. Technical reclamation of an oil-contaminated land plot. *Modern problems of science and education : materials of international scientific conferences held by the Academy of Natural Sciences (International Association of Scientists, Teachers and Specialists)*. 2023; 66-68. EDN TFRSPJ. (rus.).
12. Kongar-ool V.V., Melkozherov V.M., Kaiser Yu.F. Industrial cleaning of lands, waterbodies and other landscapes contaminated with oil. *Bulletin of TuvSU*. 2019; 4(54):31-38. DOI: 10.24411/2077-6896-2019-10018. EDN NQXWHD. (rus.).
13. Burgonutdinov A.M., Kolobova A.A. The application of oil-containing waste and oil-contained soils for the device of vapor-hydro-insulating layers in the ground path of a forest road. *Theory and Practice of Modern Science*. 2022; 3(81):60-66. EDN COHVPN. (rus.).
14. Sivkov Y., Nikiforov A. Study of oil-contaminated soils phytotoxicity during bioremediation activities. *Journal of Ecological Engineering*. 2021; 22(3):67-72. DOI: 10.12911/22998993/132435
15. Tsivadze A.Yu., Fridman A.Ya., Tumanyan B.P., Novikov A.K., Polyakova I.Ya., Sudarkin A.P. Prospective preparations for accelerated bioremediation of oil-contaminated soils. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020; 56(4):588-592. DOI: 10.1007/s10553-020-01171-1.
16. Lu X., Liu R., Xia L. Landscape planning and design and visual evaluation for landscape protection of geological environment. *Journal of King Saud University — Science*. 2023; 35(6):102735. DOI: 10.1016/j.jksus.2023.102735
17. Liu C. Research on geological environment protection and geological disasters control countermeasures in China. 3C Empresa. *Investigación y pensamiento crítico*. 2023; 12(1):186-205. DOI: 10.17993/3cemp.2023.120151.186-205
18. Lunev A.G., Tsapkova N.N., Pavlik G.N., Babayan V.R. A combination system for protection of the geological environment in toxic waste disposal area. *Tailings and Mine Waste '96*. 2022; 289-290. DOI: 10.1201/9781003077855-32. EDN VTUNZU.
19. Analysis of key points of geological exploration under the background of ecological environment protection. *Foreign Language Science and Technology Journal Database Engineering Technology*. 2022. DOI: 10.47939/et.v3i3(06).16. EDN UKXEEH.

20. Mustaev R., Kerimov V., Bondarev A., Guryanov S. Assessment of geological risks when performing prospecting and exploration for oil and gas. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 315 LNNS:271-282. DOI: 10.1007/978-3-030-85799-8_23. EDN MEXROQ.

Received April 11, 2024.

Adopted in revised form on April 18, 2024.

Approved for publication on April 25, 2024.

B I O N O T E S: **Konstantin L. Chertes** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Chemical Technology and Industrial Ecology; **Samara State Technical University (SamGTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 185126, Scopus: 16308870400, ORCID: 0000-0002-3353-4768; chertes2007@yandex.ru;

Vitaliy N. Pystin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Industrial Ecology; **Samara State Technical University (SamGTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 741101, Scopus: 57192370017, ResearcherID: D-8410-2014, ORCID: 0000-0002-4027-1804; vitaliy.pystin@yandex.ru;

Olga V. Tupitsyna — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Industrial Ecology; **Samara State Technical University (SamGTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 185125, Scopus: 57209210925, ResearcherID: E-1153-2014, ORCID: 0000-0003-0638-2700; olgatupicyna@yandex.ru;

Irina M. Evgrafova — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Engineering Surveys and Geoecology; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 433377, ORCID: 0009-0006-2747-6705; irina-sen811@yandex.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

Корреляционный анализ ежедневных уровней воды в реках
Калининградской области по результатам наблюдений
в 2008–2021 годах

Владимир Аркадьевич Наумов, Наталья Равиловна Ахмедова
Калининградский государственный технический университет (КГТУ); г. Калининград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При обосновании проектных решений в гидротехническом строительстве, разработке мероприятий по использованию и охране водных ресурсов практический и научный интерес представляет информация о внутри-годовом распределении стока. Представлены итоги корреляционного анализа ежедневных уровней воды в реках Калининградской области по результатам наблюдений в годы разной водности с 2008 по 2021 г.

Материалы и методы. Выполнен статистический анализ массива данных наблюдений за ежедневными уровнями воды в 12 створах рек Калининградской области за период с 2008 по 2021 г. Источник данных — автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. Обработка результатов наблюдений осуществлялась в среде Mathcad.

Результаты. Рассчитаны коэффициенты парной корреляции (КПК) между ежедневными уровнями воды в исследуемых створах рек Калининградской области. Определены средние, наибольшие и наименьшие КПК ежедневных уровней воды в рассматриваемых створах. Установлена зависимость КПК ежедневных уровней воды в двух створах, расположенных в одной речной системе, и для разных речных систем.

Выводы. Выявлено, что наиболее тесная стохастическая связь ежедневных уровней воды наблюдается у р. Неман и рук. Матросовка; в маловодные годы значения КПК ежедневных уровней воды в рассматриваемых створах снижаются; в качестве аналогов для водотоков Калининградской области следует рекомендовать р. Преголю (ГП Гвардейск) и р. Инструч (ГП Ульяново). Полученные результаты могут быть использованы при разработке мероприятий по использованию и охране водных ресурсов региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: внутригодовое распределение стока, водность реки, гидрологические расчеты, ежедневные уровни воды, Калининградская область, река Ангара, река Инструч, река Мамоновка, река Писса, река Преголя, рукав Дейма

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 22-27-20016.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Наумов В.А., Ахмедова Н.Р. Корреляционный анализ ежедневных уровней воды в реках Калининградской области по результатам наблюдений в 2008–2021 годах // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1343–1355. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1343-1355

Автор, ответственный за переписку: Наталья Равиловна Ахмедова, isfendi@mail.ru.

Correlation analysis of daily water levels in rivers
of the Kaliningrad region based on observation results in 2008–2021

Vladimir A. Naumov, Natal'ya R. Ahmedova
Kaliningrad State Technical University (KSTU); Kaliningrad, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When justifying design decisions in hydraulic engineering, developing measures for the use and protection of water resources, information on the intra-annual distribution of runoff is of practical and scientific interest. The paper presents the results of a correlation analysis of daily water levels in the rivers of the Kaliningrad region, based on the results of observations in years with different water content from 2008 to 2021.

Materials and methods. The statistical analysis of the data set of observations of daily water levels in 12 river stations of the Kaliningrad region for the period from 2008 to 2021 was carried out. The data source was the automated information system of state monitoring of water bodies. The observation results were processed in Mathcad environment.

Results. Pair correlation coefficients between daily water levels in the studied river stations of the Kaliningrad region were calculated. The average, maximum and minimum pair correlation coefficients of daily water levels in the considered stations were determined. The dependence of pair correlation coefficients of daily water levels in two stations located in the same

river system (The Angrapa River – Berestovo gauging station – The Pregolya River – Gvardeysk gauging station) and for different river systems (The Mamonovka River – Mamonovo gauging station – The Pregolya River – Chernyakhovsk gauging station) was determined.

Conclusions. It was found that the closest stochastic relationship of daily water levels is observed near the Neman and Matrosovka Rivers; in dry years, the values of the pair correlation coefficients of daily water levels decrease in the studied stations; The Pregolya river (Gvardeysk gauging station) and the Instruch River (Ulyanovo gauging station) should be recommended as analogues for watercourses of the Kaliningrad region. The obtained results can be used for the development of measures for the use and protection of water resources in the region.

KEYWORDS: intra-annual distribution of runoff, river water content, hydrological calculations, daily water levels, Kaliningrad region, Angrapa river, Instruch river, Mamonovka river, Pissa river, Pregolya river, Deyma river

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Science Foundation and the Government of the Kaliningrad Region under the scientific project No. 22-27-20016.

FOR CITATION: Naumov V.A., Ahmedova N.R. Correlation analysis of daily water levels in rivers of the Kaliningrad region based on observation results in 2008–2021. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1343-1355. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1343-1355 (rus.).

Corresponding author: Natal'ya R. Ahmedova, isfendi@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение гидрологических особенностей водотоков Калининградской области является актуальной задачей, поскольку они определяют условия жизни населения, возможности развития сельского хозяйства и промышленности, а также состояние окружающей среды. Кроме того, знание этих особенностей необходимо для разработки мер по охране и рациональному использованию водных ресурсов региона.

Научно обоснованное планирование комплексного использования водных ресурсов бассейна реки требует знания закономерностей внутригодового распределения стока. Этой проблеме посвящено большое количество исследований [1–8].

Так, в статье [1] проанализированы характеристики неравномерности стока (коэффициент естественной зарегулированности и доля объема весеннего половодья в годовом стоке) и влияние на них гидрографических, морфометрических, климатических и ландшафтных факторов. Наблюдается существенное изменение условий формирования стока и увеличение его неравномерности для рек европейской части Российской Федерации. Авторы [1] считают, что установленная неравномерность внутригодового распределения стока служит одним из основных факторов гидроэкологической безопасности территорий.

Рассмотрено распределение годового стока малых водотоков (площадь бассейна не более 7000 км²) [2]. В исследовании определено, что водный режим исследуемых рек южной половины европейской территории России, начиная с 70-х гг. XX в., значительно изменился — произошло перераспределение стока, что привело, по мнению авторов работы, к снижению темпов аккумуляции наносов на поймах малых рек.

Климатические изменения повлияли на характеристики внутригодового стока рек Европы [3]. На реках с преобладающим весенним стоком, сходных по режиму с реками на севере и в средней поло-

се европейской части России, отмечено увеличение стока в осенне-зимний период, связанное с дождями и оттепелями, и сокращение стока весеннего половодья, что также характерно для рек Калининградской области [4].

Исследовалась взаимосвязь гидрологических факторов и основных физико-химических характеристик воды малых водотоков [5]. Авторы [5] указывают на то, что изучение внутригодового стока необходимо для понимания биогеохимических процессов. Влияние внутригодовой изменчивости стока на экосистему фиксируется и в работах [6, 8].

Во многих случаях, в частности при проектировании гидротехнических сооружений, необходимы характерные значения уровня воды. Изучение таких характеристик имеет и самостоятельное значение, учитывая меньшую погрешность их определения (как прямых измерений), в отличие от расхода воды (косвенные измерения). Уровни воды в реках являются важным показателем состояния водных ресурсов региона. Они зависят от множества факторов, включая климатические условия, геологические особенности местности, антропогенную деятельность и другое. Результаты исследования динамики изменения уровня воды в реках представлены во многих публикациях [9–16].

С целью прогнозирования гидрологических характеристик для повышения безопасности судоходства выполнен анализ массива данных наблюдений за уровнями воды в р. Амур, который позволил выявить тенденцию понижения водности [9]. Авторы установили, что динамика характерных уровней воды в р. Амур имеет отрицательный тренд, наиболее интенсивно проявляющийся в летнюю межень. Такая тенденция указывает на неблагоприятную перспективу для судоходства на реке. Также отмечаются значительные изменения в распределении стока на реках России, которые авторы связывают с современными климатическими условиями.

В статье [11] предпринята попытка анализа динамики ежедневных уровней воды в реке. Предложен метод моделирования ежедневных уровней воды

по фазам изменения гидрологического режима. Для р. Угрюмой (гидрологический пост (ГП) Горное)) выделено шесть фаз: от зимней межени до начала весеннего половодья; от начала весеннего половодья (включая весенний ледоход) до летней межени; от летней межени до начала осени; от начала осени до начала осеннего ледохода; от начала осеннего ледохода до начала ледостава; от начала ледостава до зимней межени. Были использованы результаты наблюдений за ежедневными уровнями воды 1975 г. в указанном створе для построения математической модели каждой фазы. Например, для ежедневных уровней воды y в первой фазе (до начала весеннего половодья) формула имеет следующий вид:

$$y = 10,9790 \cdot \exp(0,04917t) - 2,1833 \cdot 10^{-9} t^{6,7638} \exp(-0,002242t) - 0,004739 t^{2,3820} \cos(\pi/16,7560), \quad (1)$$

где t — время от начала фазы 6 января.

Автор [11] считает, что первое слагаемое формулы (1) обусловлено экспоненциальным ростом уровня реки на этом этапе. Второе и третье слагаемые вычитаются из первого. Второе слагаемое описывает стрессовое возбуждение реки, третье — волновой характер изменения ежедневных уровней воды (с периодом 33,5 дня). Полагается [11], что структура предложенных формул останется такой же и в другие годы, изменятся лишь численные значения эмпирических коэффициентов. Но подтверждения этой гипотезы отсутствуют. По сути описана лишь одна реализация случайного процесса.

Исследованы водные объекты в верховьях бассейна Вислы (на территории Республики Польша), которые имеют различные параметры и функции [12]. Для получения полной картины динамики стока с применением статистических методов обрабатывались ряды данных наблюдений до изменений антропогенного характера (строительство водохранилищ) и после них. Анализировалась информация по пяти гидропостам на р. Раба и трем ГП — на р. Дунаец.

Статистический анализ для исследования уровней некоторых рек Калининградской области приведен в трудах [14, 15]. Установлено, что уклон водной поверхности р. Преголи между Гвардейском и Калининградом весьма мал, а в отдельные дни он был отрицательным, что обусловлено сильными нагонными явлениями в устье р. Преголи. Из-за этого стохастическая связь между ежедневными уровнями реки в указанных створах слабая, тогда как коэффициент парной корреляции ежедневных уровней воды в Черняховске и Гвардейске в исследованные годы наблюдался больше порогового значения 0,7.

После рекордно большого стока рек Калининградской области в 2017 г. (например, у р. Преголи, ГП Гвардейск средний годовой расход составил $Q = 167 \text{ м}^3/\text{с}$) последующие четыре года были маловодными (у р. Преголи в 2018 г. $Q = 77,1 \text{ м}^3/\text{с}$; 2019 —

$Q = 71,3 \text{ м}^3/\text{с}$; 2020 — $Q = 57,7 \text{ м}^3/\text{с}$; 2021 — $Q = 50,1 \text{ м}^3/\text{с}$), тогда как средний многолетний расход за 120 лет наблюдений составляет $86,4 \text{ м}^3/\text{с}$.

В последнее время число гидрологических постов сети Росгидромет на территории Калининградской области уменьшается, есть пропуски в наблюдениях на действующих постах. С 2014 г. закрыты посты на р. Голубой — ГП Угрюмово (открыт 01.10.1983), р. Нельме — ГП Кострово (открыт 27.09.1963). В связи с этим в целях восстановления данных гидрологических рядов необходима информация о степени (тесноте) стохастической связи. Изучение корреляционных связей между уровнями воды в различных реках может помочь лучше понять процессы формирования водного режима и выявить потенциальные риски для окружающей среды и населения.

Цель исследования — выполнить корреляционный анализ ежедневных уровней воды в реках Калининградской области по результатам наблюдений в годы разной водности с 2008 по 2021.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- собраны данные об уровнях воды в реках региона за период с 2008 по 2021 г.;
- проведен статистический анализ данных;
- выявлены корреляционные связи между уровнями воды в разных реках;
- проанализированы полученные результаты и сделаны выводы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходным материалом для анализа послужили данные ежедневных уровней в 12 створах рек Калининградской области: р. Неман — ГП Советск; р. Преголя — ГП Гвардейск, ГП Черняховск; р. Лава — ГП Родники; р. Шешупе — ГП Долгое; р. Анграпа — ГП Берестово; р. Писса — ГП Зеленый Бор; р. Инструч — ГП Ульяновово; р. Мамоновка — ГП Мамоново; р. Злая — ГП Приозерье; рук. Матросовка — ГП Мостовое; рук. Дейма — ГП Полесск (рис. 1).

Неман — крупнейшая река Калининградской области. Ее длина составляет 937 км, площадь бассейна — 98,2 тыс. км². Река берет начало от Минской возвышенности и впадает в Куршский залив Балтийского моря.

Преголя — одна из самых длинных рек Калининградской области, ее длина составляет 123 км, площадь водосбора — 15 500 км². Она берет свое начало от слияния р. Инструч и р. Анграпы (на территории Калининградской области) и впадает в Калининградский (Вислинский) залив Балтийского моря. Преголя является важной транспортной артерией и источником водоснабжения в регионе.

Река Лава — приток р. Преголи. Длина реки Лавы — 289 км, площадь бассейна — 7130 км². Река берет начало в Мазурских озерах на территории

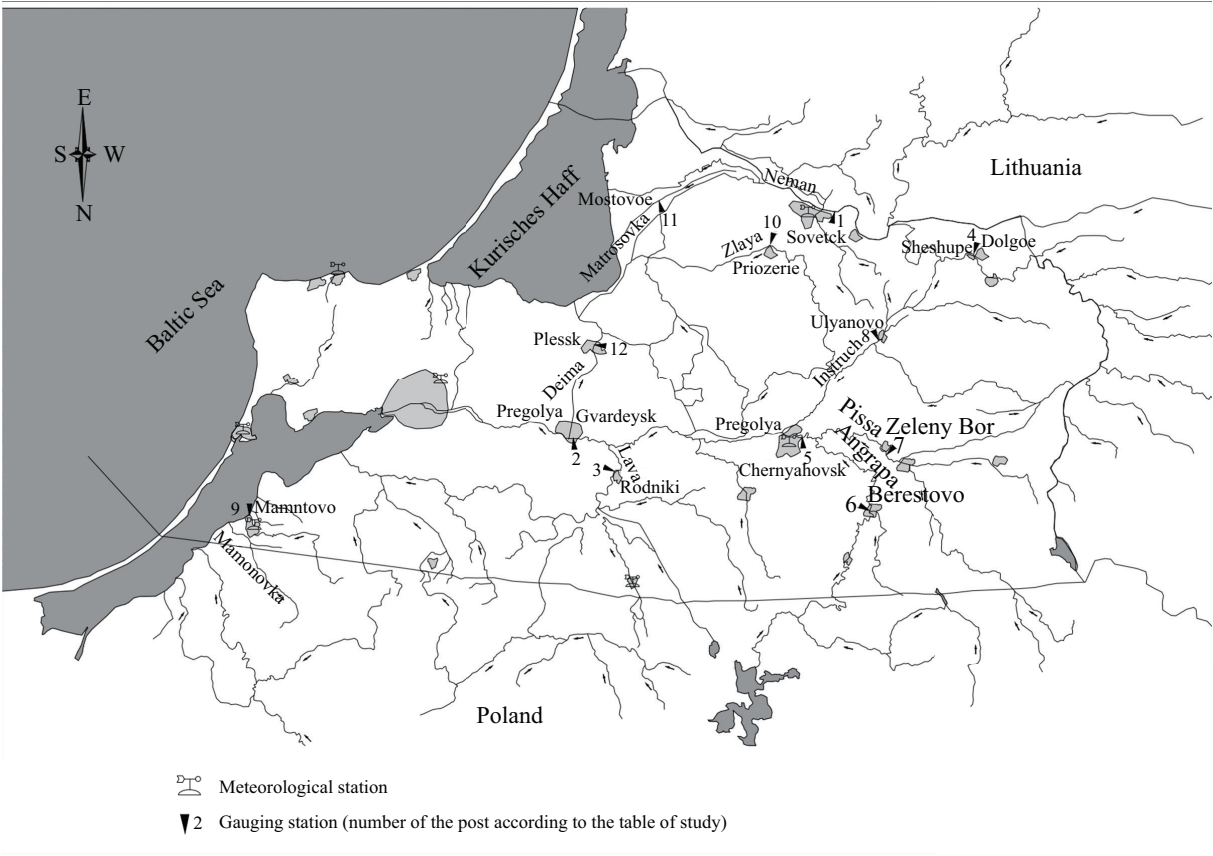
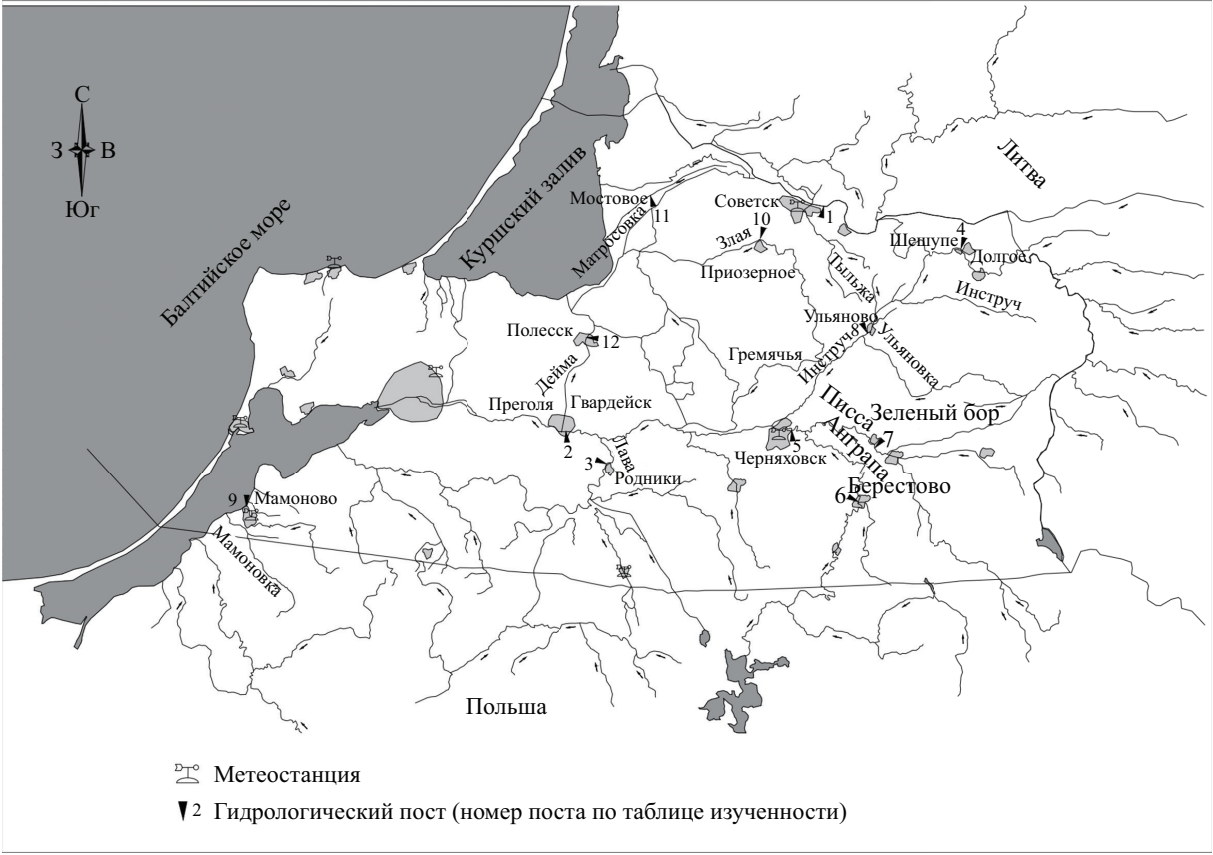


Рис. 1. Обзорная схема расположения гидропостов на территории Калининградской области

Fig. 1. Overview diagram of the location of gauging stations of the Kaliningrad region

Польши и впадает в Преголю у поселка Знаменска (Калининградская область).

Река Шешупе является левым притоком р. Неман. Общая длина реки составляет 298 км, площадь бассейна — 6104,8 км². Река берет начало на Балтийской гряде и впадает в р. Неман.

Анграпа — приток р. Преголи, длина реки — 169 км, площадь водосборного бассейна — 3960 км². Анграпа берет начало из оз. Мамры в районе польского г. Венгожево, в Черняховском районе р. Анграпа сливается с р. Инструч, образуя р. Преголю.

Река Писса расположена на востоке Калининградской области, ее длина — 98 км, площадь водосборного бассейна — 1440 км². Река берет начало из Виштынецкого озера и впадает в р. Анграпу.

Инструч — один из основных притоков р. Преголи в Калининградской области, берет начало на востоке области в районе г. Черняховска, сливается с р. Анграпой и образует начало р. Преголи. Длина р. Инструч составляет 101 км, площадь водосборного бассейна — 1250 км².

Река Мамоновка берет начало на территории Польши, недалеко от г. Олыштынек и впадает в Калининградский (Вислинский) залив. Длина реки составляет 51 км, площадь водосборного бассейна — 311 км².

Реки Матросовка и Дейма — рукава рек Неман и Преголи соответственно, относятся к существенно модифицированным водным объектам¹.

¹ Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Неман и рек бассейна Балтийского моря (российская часть в Калининградской области) : утв. приказом Невско-Ладожского БВУ Федерального агентства водных ресурсов от 09.12.2014 № 171.

К категории больших рек (согласно ГОСТ²) относится только р. Неман, которая протекает по территории Республики Беларусь, Литовской Республики и Российской Федерации (Калининградская область). Остальные водные объекты относятся к категории средних (р. Преголя, р. Лава, р. Шешупе, р. Анграпа) и малых рек (р. Инструч, р. Мамоновка, р. Злая).

Трансграничными водотоками также являются р. Мамоновка, р. Лава, р. Анграпа (протекают по территории двух стран — Республики Польши, РФ) и р. Шешупе (протекает, как и р. Неман, по территории Республики Беларусь, Литовской Республики, РФ и является ее притоком). Реки Инструч и Писса не являются трансграничными, протекают только в пределах Калининградской области.

Исследуемые водотоки располагаются в различных частях региона — это реки равнинного типа. Следует выделить р. Мамоновку, р. Анграпу и р. Писсу, которые в верховье имеют несколько другой характер течения, поскольку берут начало с Вармийской (р. Мамоновка) и Виштынецкой возвышенностей (р. Анграпа, р. Писса).

В табл. 1 представлены данные о действующих гидропостах на исследуемых водотоках. Нумерация гидропостов на рис. 1 соответствует нумерации в табл. 1.

В данной статье выполнен анализ массива данных ежедневных уровней в 12 створах рек Калининградской области за 2008–2021 гг. Для проведения исследования использованы методы математической статистики, в частности корреляционный анализ.

² ГОСТ 19179–73. Гидрология суши. Термины и определения.

Табл. 1. Действующие ГП на реках Калининградской области в 2020–2021 гг.³

Table 1. Operating gauging stations on the rivers of the Kaliningrad region in 2020–2021³

Номер Number	Название водотока Watercourse name	Гидрологический пост Hydrological post	Расстояние, км, от Distance, km, from		Площадь <i>A</i> , км ² Area <i>A</i> , km ²	Отметка нуля поста, м, БС Gauge datum, m, BS
			истока the river head	устья the mouth		
1	р. Неман Neman	Советск Sovetsk	878	59,0	91 800	1,90
2	р. Преголя Pregolya	Гвардейск Gvardeysk	67,0	56,0	13 600	–5,17
3	р. Лава Lava	Родники Rodniki	271	18,0	7020	1,15
4	р. Шешупе Sheshupe	Долгое Dolgoe	265	43,0	5830	8,32
5	р. Преголя Pregolya	Черняховск Chernyakhovsk	1,00	122	5210	3,21
6	р. Анграпа Angrapa	Берестово Berestovo	139	30,0	2460	23,85
7	р. Писса Pissa	Зеленый Бор Zeleny Bor	87,0	11,0	1360	20,90
8	р. Инструч Instruch	Ульяново Ulyanovo	51,0	50,0	587	13,23

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Номер Number	Название водотока Watercourse name	Гидрологический пост Hydrological post	Расстояние, км, от Distance, km, from		Площадь А, км² Area А, km²	Отметка нуля поста, м, БС Gauge datum, m, BS
			истока the river head	устья the mouth		
9	р. Мамоновка Mamonovka	Мамоново Mamonovo	45,0	6,20	300	5,50
10	р. Злая Zlaya	Приозерье Priozerie	50,0	12,0	142	–2,31
11	рук. Матросовка Matrosovka	Мостовое Mostovoe	19,0	24,0	–	–2,00
12	рук. Дейма Deyma	Полесск Polessk	32,0	5,00	–	–5,18

Сведения об уровнях воды получены из открытых источников — автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов³.

За исследуемый период наибольшая водность в регионе наблюдалась в 2017 г., наименьшая — в 2015 г. Для выделения рек по водности были построены кривые обеспеченности, в качестве теоретического принимали трехпараметрическое гамма-распределение. Массив рядов исходных данных прошел проверку на однородность (использовался критерий Стьюдента). Все вычисления выполнялись в среде Mathcad.

Примеры ежедневных уровней воды приведены на рис. 2–5. Видно, что некоторые графики еже-

дневных уровней воды весьма схожи, как в 2020 г. у рек Инстрuch и Преголя (Черняховск) на рис. 2. Другие отличаются, как в 2021 г. у р. Мамоновки и рук. Деймы (Полесск) на рис. 5.

Следует обратить внимание на особенности гидрографов рек Калининградской области: частые паводки холодного времени года и несколько пиков весеннего половодья, во время которого могут наблюдаться затяжные дожди.

По гидрографам рек Калининградской области в декабре и январе наблюдается заметное повышение уровня воды в реках, вызванное таянием снега и льда во время зимних оттепелей. За зимний период может произойти несколько таких оттепелей, чередующихся с понижением температуры. Также во время весеннего половодья часто бывают затяжные дожди.

Разделение стока на половодье и паводки, за редким исключением, не представляется возможным. Ярким подтверждением этого служат паводковые

³ Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/>

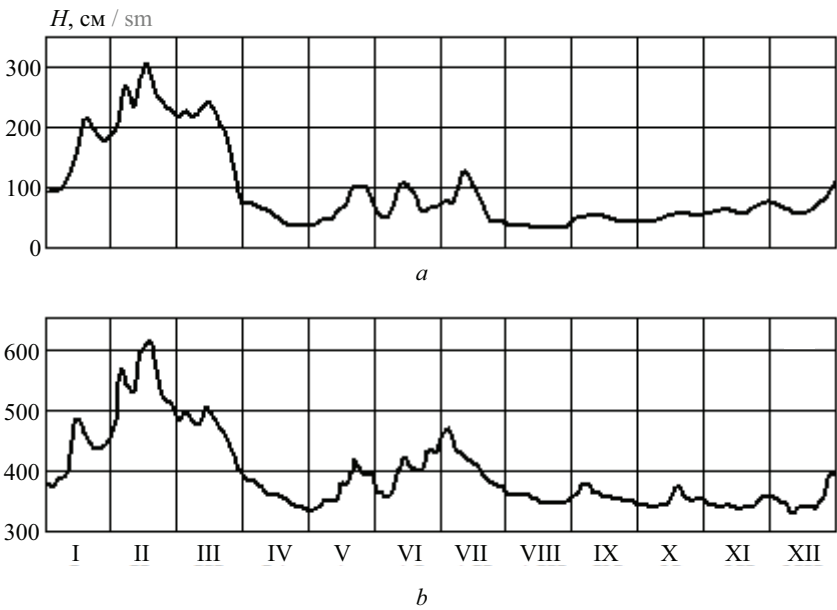


Рис. 2. Ежедневные уровни воды (2020) р. Инстрuch (а) и р. Преголя (Черняховск) (b)
Fig. 2. Daily water levels (2020) of the Instruch River (a) and the Pregolya River (Chernyakhovsk) (b)

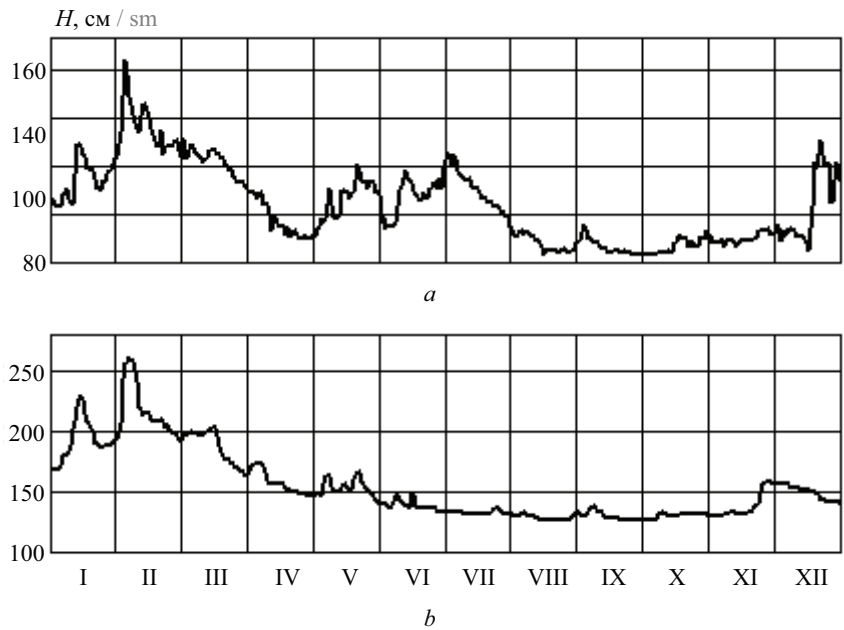


Рис. 3. Ежедневные уровни воды (2020) р. Анграпы (а) и р. Мамоновки (b)

Fig. 3. Daily water levels (2020) of the Angrapa River (a) and the Mamonovka River (b)

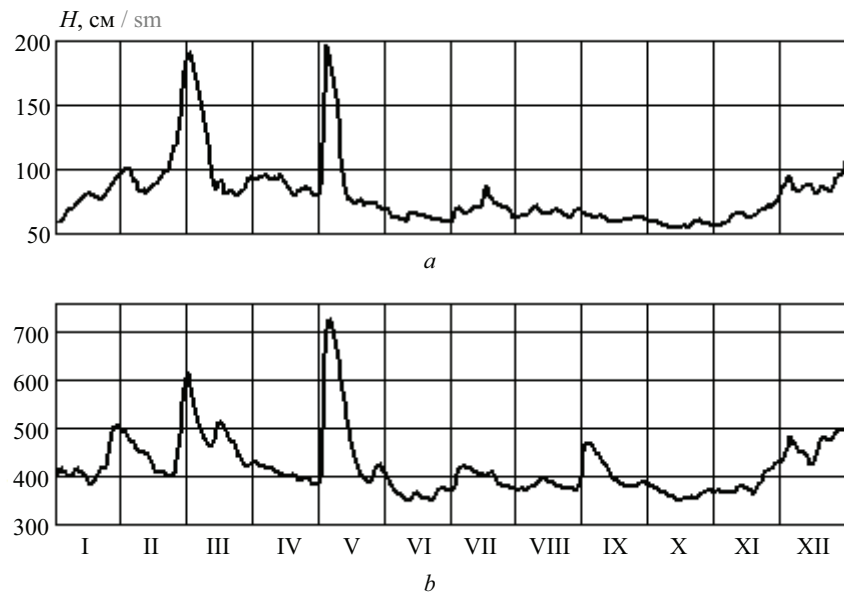
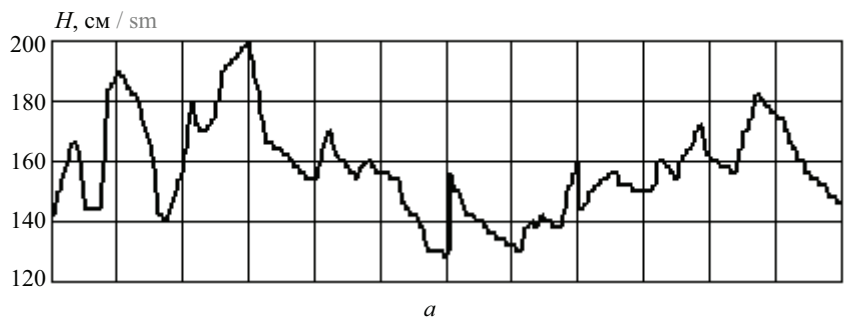


Рис. 4. Ежедневные уровни воды (2021) р. Писсы (а) и р. Преголи (Черняховск) (b)

Fig. 4. Daily water levels (2021) of the Pissa River (a) and the Pregolya River (Chernyakhovsk) (b)



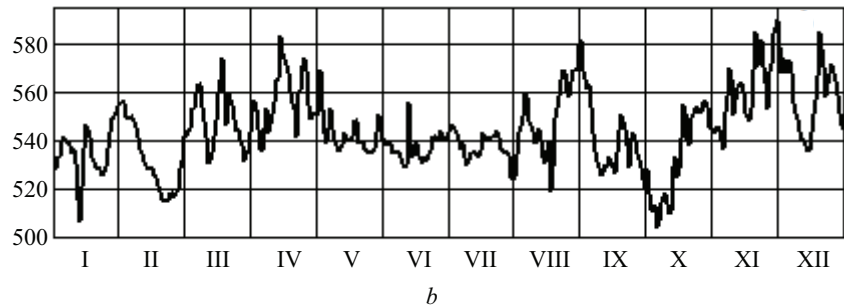


Рис. 5. Ежедневные уровни воды (2021) р. Мамоновки (а) и рук. Деймы (Полесск) (b)
Fig. 5. Daily water levels (2021) of the Mamonovka River (a) and the Deyma River (Polessk) (b)

явления в январе-марте 2020 г. Снежный покров на территории Калининградской области отсутствовал. Возрастание расхода в этот период было вызвано осадками в виде дождя. Высокие пики расходов в первые три месяца 2020 г. обусловлены низкой интенсивностью испарения из-за температур воздуха, немногим выше нуля, и слабой проницаемостью почвогрунтов. Тогда как в мае-июне более интенсивные осадки при достаточно высоких температурах привели лишь к незначительным паводкам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассчитаны коэффициенты парной корреляции (КПК) между ежедневными уровнями воды разных рек Калининградской области r_{ij} . Для примера в табл. 2 приведены результаты расчета для двух лет средней водности, в табл. 3 — малой (2020) и большой (2017) водности.

В исследуемый период наблюдалось семь лет средней водности: 2008, 2011, 2012, 2013, 2016, 2018 и 2021. В табл. 2 и 3 номера водотока и ГП такие же, как на рис. 1, в табл. 1.

КПК рассчитывались в среде Mathcad для каждого года наблюдений гидрологического поста:

$$r_{ij,k} = \text{corr} (Q_{i,k}, Q_{j,k}), \tag{2}$$

где $r_{ij,k}$ — коэффициент корреляции между ежедневными уровнями воды i -го и j -го гидрологических постов в k -м году.

Были отобраны наименьшие и наибольшие КПК за каждый год; рассчитаны средние значения КПК в каждом створе относительно остальных створов за год (см. табл. 4) по следующей формуле:

$$\overline{r_j} = \frac{1}{11} \cdot \left(\sum_{i=1}^{12} r_{i,j} - 1 \right). \tag{3}$$

За рассматриваемый период стабильно выше среднего значения за год КПК ежедневных уровней воды наблюдались на р. Преголе, р. Инструч, р. Шешепе, ниже среднего значения за все годы — у рук. Деймы.

Также можно отметить, что средний коэффициент корреляции в маловодный 2020 г. ($r = 0,786$) ниже, чем в многоводный 2017 г. ($r = 0,824$).

Общая тенденция — значения КПК ежедневных уровней воды в разных створах в маловодные годы снижаются. Наибольшую тесноту стохастической связи в годы различной водности продемонстрировали ежедневные уровни воды р. Неман и ее рукава — р. Матросовки (во все годы $r_{1,11} > 0,94$).

Табл. 2. Коэффициенты парной корреляции ежедневных уровней воды (выше главной диагонали 2008 г., ниже — 2012 г.)
Table 2. Pair correlation coefficients of daily water levels (above the main diagonal in 2008, below in 2012)

Номер Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0,883	0,809	0,902	0,941	0,915	0,903	0,907	0,696	0,880	0,988	0,593
2	0,665	1	0,802	0,901	0,964	0,926	0,922	0,934	0,827	0,873	0,907	0,834
3	0,632	0,733	1	0,834	0,820	0,774	0,780	0,841	0,776	0,824	0,828	0,637
4	0,851	0,832	0,756	1	0,946	0,934	0,948	0,924	0,701	0,907	0,918	0,704
5	0,797	0,913	0,720	0,875	1	0,969	0,970	0,942	0,764	0,908	0,947	0,726
6	0,611	0,757	0,770	0,734	0,801	1	0,959	0,897	0,731	0,863	0,918	0,687
7	0,813	0,786	0,758	0,898	0,852	0,847	1	0,893	0,684	0,870	0,903	0,707
8	0,552	0,828	0,554	0,722	0,854	0,530	0,621	1	0,817	0,922	0,926	0,753
9	0,508	0,781	0,652	0,734	0,732	0,570	0,675	0,763	1	0,776	0,738	0,754
10	0,478	0,758	0,533	0,703	0,773	0,449	0,592	0,876	0,803	1	0,899	0,681
11	0,943	0,592	0,593	0,794	0,706	0,582	0,791	0,446	0,433	0,335	1	0,646
12	0,193	0,483	0,102	0,340	0,376	0,147	0,205	0,478	0,406	0,394	0,199	1

Табл. 3. Коэффициенты парной корреляции ежедневных уровней воды (выше главной диагонали 2020 г., ниже — 2017 г.)
Table 3. Pair correlation coefficients of daily water levels (above the main diagonal in 2020, below in 2017)

Номер Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0,821	0,766	0,747	0,807	0,809	0,617	0,894	0,890	0,847	0,972	0,602
2	0,846	1	0,849	0,861	0,869	0,784	0,739	0,904	0,847	0,848	0,872	0,846
3	0,805	0,930	1	0,849	0,887	0,836	0,728	0,857	0,792	0,858	0,754	0,560
4	0,812	0,926	0,938	1	0,920	0,765	0,764	0,892	0,714	0,809	0,747	0,584
5	0,829	0,961	0,929	0,945	1	0,877	0,876	0,931	0,797	0,838	0,816	0,626
6	0,809	0,933	0,960	0,929	0,945	1	0,814	0,836	0,793	0,786	0,782	0,536
7	0,741	0,850	0,889	0,893	0,875	0,889	1	0,737	0,631	0,635	0,630	0,529
8	0,806	0,908	0,844	0,889	0,893	0,874	0,889	1	0,868	0,899	0,892	0,653
9	0,830	0,849	0,888	0,820	0,859	0,894	0,785	0,821	1	0,893	0,900	0,642
10	0,794	0,842	0,864	0,877	0,864	0,877	0,805	0,895	0,860	1	0,835	0,580
11	0,985	0,821	0,761	0,771	0,782	0,767	0,719	0,766	0,795	0,756	1	0,708
12	0,540	0,774	0,686	0,734	0,713	0,699	0,635	0,690	0,637	0,654	0,523	1

Табл. 4. Средние, наибольшие и наименьшие коэффициенты парной корреляции ежедневных уровней воды
Table 4. Average, maximum and minimum pair correlation coefficients of daily water levels

Номер Number	Река River	Год Year				
		2008	2012	2017	2020	2021
1	р. Неман Neman	0,856	0,640	0,801	0,797	0,598
2	р. Преголя (Гвардейск) Pregolya (Gvardeysk)	0,888	0,739	0,875	0,843	0,636
3	р. Лава Lava	0,793	0,619	0,863	0,794	0,512
4	р. Шешупе Sheshupe	0,874	0,749	0,866	0,786	0,641
5	р. Преголя (Черняховск) Pregolya (Chernyakhovsk)	0,902	0,764	0,876	0,843	0,666
6	р. Анграпа Angrapa	0,870	0,622	0,871	0,783	0,523
7	р. Писса Pissa	0,867	0,713	0,808	0,700	0,631
8	р. Инструч Instruch	0,887	0,657	0,837	0,851	0,671
9	р. Мамоновка Mamonovka	0,751	0,642	0,822	0,797	0,391
10	р. Злая Zlaya	0,855	0,613	0,826	0,802	0,529
11	рук. Матросовка Matrosovka	0,874	0,583	0,768	0,810	0,526
12	рук. Дейма Deyma	0,702	0,302	0,662	0,624	0,165
Среднее значение Average value		0,843	0,637	0,823	0,529	0,541
Наибольшее Maximum value		$r_{1,11} = 0,988$	$r_{1,11} = 0,943$	$r_{2,5} = 0,961$	$r_{1,11} = 0,972$	$r_{1,11} = 0,972$
Наименьшее Minimum value		$r_{1,12} = 0,593$	$r_{3,12} = 0,102$	$r_{11,12} = 0,523$	$r_{7,12} = 0,529$	$r_{6,12} = 0,077$

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 8, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 8, 2024

Наиболее отличающиеся от всех остальных ежедневные уровни воды оказались у рук. Деймы (рукав р. Преголи), в отдельные годы КПК был менее 0,1. Такое отличие ежедневных уровней воды рук. Деймы (Полесск) даже от ежедневных уровней воды основного русла р. Преголи (см. рис. 4, *b*) обусловлено скорее всего подпором со стороны Куршского залива.

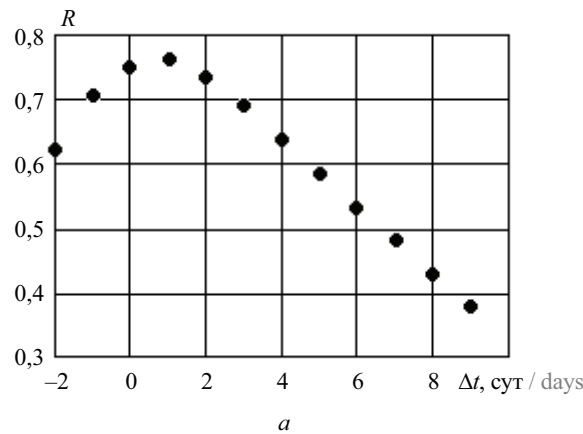
Наименьшие средние значения КПК ежедневных уровней воды ($r > 0,7$) наблюдаются у рук. Деймы (Полесск) и р. Мамоновки (Мамоново). Возможно, это связано с тем, что гидропост на р. Мамоновке расположен в 6,2 км от устья, и так же, как у рук. Деймы (Полесск), может наблюдаться подпор со стороны Калининградского (Вислинского) залива.

По наибольшему среднему значению КПК установлено, что наиболее типичные для региона ежедневные уровни воды в 2008–2021 гг. наблюдались у р. Преголи в створе г. Черняховска. Несколько меньшие средние КПК у р. Преголи (Гвардейск) и у р. Инструч (Ульяново). Именно их следует рекомендовать в качестве аналогов для водотоков Калининградской области. Аналогичный результат был получен в труде [17] при корреляционном анализе ежедневных расходов рек региона.

Известное явление максимума КПК ежедневных уровней воды в двух створах одной реки при интервале времени, за которое вода от верхнего створа приходит в нижний створ, используется для краткосрочного прогнозирования [18–20]. Обработка результатов наблюдений выполнена в среде Mathcad по методике, изложенной в работе [20].

Зависимость коэффициента корреляции уровней в двух створах от сдвига по времени Δt рассчитывалась по формуле:

$$R(\Delta t) = \frac{1}{(n-1) \cdot s_j \cdot s_k} \cdot \sum_{i=1}^n (H_j(t_i) - \overline{H_j}) \times (H_k(t_i + \Delta t) - \overline{H_k}), \tag{4}$$



где $\overline{H_j}, \overline{H_k}$ — среднее значение уровня реки за n дней в j -м и k -м створе соответственно; s_j, s_k — точечная оценка среднего квадратичного отклонения уровня реки в створе в указанных створах. Величина Δt принимала следующие целые значения (–2, –1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6, +7, +8, +9 сут).

Значения КПК, рассчитанные по формуле (4) для результатов наблюдений разных лет, показаны точками на рис. 6, 7.

По рис. 6 видно, что КПК между ежедневными уровнями воды в створах р. Анграпа (Берестово) – р. Преголя (Гвардейск) был с интервалом Δt около суток в 2012 г. и чуть больше суток в 2017 г.

Кроме расчета $R(\Delta t)$ в одной речной системе, как на рис. 6, были рассчитаны значения для разных речных систем, и также обнаружены максимумы КПК. Например, на рис. 7 видно наличие максимума функции $R(\Delta t)$ и в 2008, и в 2017 г. ($\Delta t = 2–3$ сут). Указанное явление можно использовать для краткосрочного прогнозирования, хотя его и не объяснишь приходом воды с запаздыванием в следующий створ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнен корреляционный анализ ежедневных уровней воды на реках Калининградской области по 12 гидрологическим постам за период с 2008 по 2021 г., который позволил сделать следующие выводы:

- наибольшая теснота стохастической связи ежедневных уровней воды наблюдается у р. Неман и ее рукава — р. Матросовки (во все годы $r_{1,11} > 0,94$);
- наиболее отличающиеся ежедневные уровни воды отмечались у рук. Деймы (Полесск), что может быть обусловлено подпором со стороны Куршского залива;
- наиболее типичные для Калининградской области ежедневные уровни воды в 2008–2021 гг. наблюдались у р. Преголи (Черняховск);

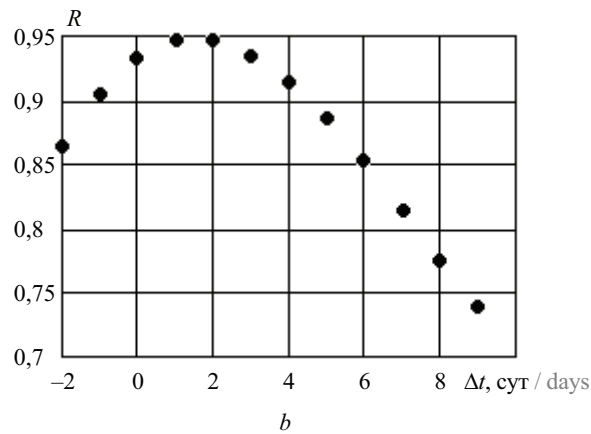


Рис. 6. Зависимость коэффициентов парной корреляции ежедневных уровней воды в двух створах от сдвига по времени: *a* — в 2012 г.; *b* — в 2017 г.

Fig. 6. Dependence of pair correlation coefficients of daily water levels in two stations on the time shift: *a* — in 2012; *b* — in 2017

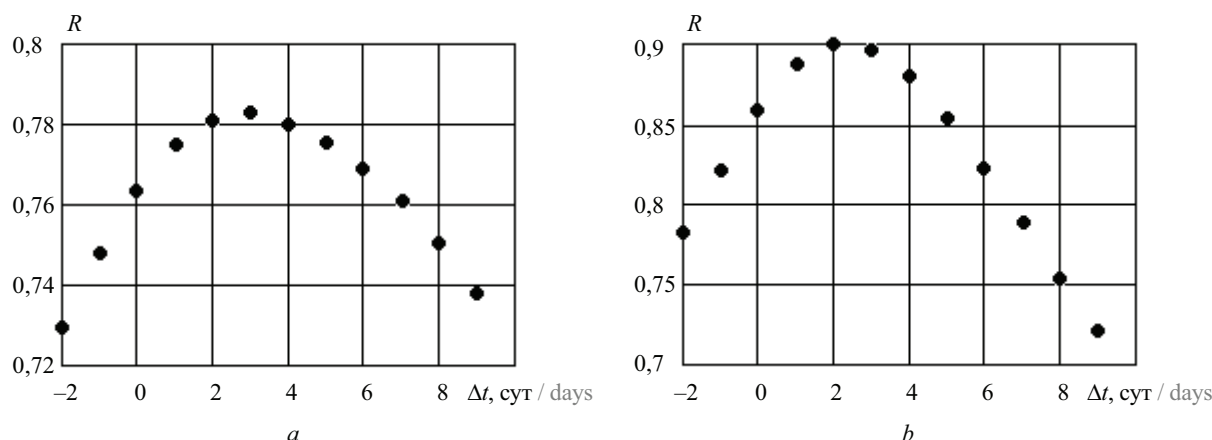


Рис. 7. Зависимость коэффициентов парной корреляции ежедневных уровней воды в двух створах Мамоновка – Преголя (Черняховск) от сдвига по времени: *a* — в 2008 г.; *b* — в 2017 г.

Fig. 7. Dependence of pair correlation coefficients of daily water levels in two stations Mamonovka – Pregolya (Chernyakhovsk) on the time shift: *a* — in 2008; *b* — in 2017

- значения коэффициентов парной корреляции ежедневных уровней воды в рассматриваемых 12 створах в маловодные годы снижаются;

- в качестве аналогов для водотоков Калининградской области следует рекомендовать р. Преголю (Гвардейск) и р. Инструч (Ульяново).

Следует обратить внимание на особенности гидрографов рек Калининградской области, а именно:

на несколько пиков весеннего половодья и частые паводки холодного времени года на всех реках региона.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных результатов при выполнении инженерных изысканий для проектирования гидротехнических сооружений, разработке региональных программ по охране и восстановлению водотоков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фролова Н.Л., Нестеренко Д.П., Шенберг Н.В. Внутригодовое распределение стока рек России // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2010. № 6. С. 8–16. EDN NCSYLB.

2. Сафина Г.Р., Голосов В.Н. Влияние изменений климата на внутригодовое распределение стока малых рек южной половины европейской территории России // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2018. Т. 160. № 1. С. 111–125. EDN XUGKPI.

3. Фролова Н.Л., Повалишников Е.С., Курева М.Б. Классификация и районирование рек по водному режиму: история, методология, перспективы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 2. С. 121–134. DOI: 10.31857/S032105962102005X. EDN PSMUKH.

4. Akhmedova N., Naumov V. Study of floods on the rivers of the Kaliningrad region at the beginning of 2020 in the absence of snow cover and ice // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 463. P. 02009. DOI: 10.1051/e3sconf/202346302009

5. Indivero J., Myers-Pigg A.N., Ward N.D. Seasonal changes in the drivers of water physico-chemistry variability of a small freshwater tidal river // Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 8. DOI: 10.3389/fmars.2021.821316

6. Izquierdo-Ayala K., García-Aragón J.A., Castillo-Uzcanga M.M., Díaz-Delgado C., Carrillo L., Salinas-Tapia H. Flocculation patterns related to intra-annual hydrodynamics variability in the lower grilva-usumacinta system // Water. 2023. Vol. 15. Issue 2. P. 292. DOI: 10.3390/w15020292

7. Kodirov S., Djumanov Ja. Intra-annual surface runoff distribution of The Chatkal River in different watery years // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 264. P. 01035. DOI: 10.1051/e3sconf/202126401035

8. Xia R., Sun H., Chen Y., Wang Q., Chen X., Hu Q. et al. Ecological flow response analysis to a typical strong hydrological alteration river in China // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20. Issue 3. P. 2609. DOI: 10.3390/ijerph20032609

9. Соколова Г.В. Статистический анализ водного режима реки Амур для целей прогноза // Региональные проблемы. 2022. Т. 25. № 1. С. 49–61. DOI: 10.31433/2618-9593-2022-25-1-49-61. EDN FAOIBK.

10. Бейсембаева М.А., Дубровская Л.И., Земцов В.А. Антропогенные изменения водных ресурсов и максимальных уровней реки Иртыш в равнинной части бассейна в Республике Казахстан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 3. С. 6–15. EDN XVVOST.

11. Мазуркин П.М. Метод поэтапного анализа динамики уровня реки // Современные наукоемкие технологии. 2010. № 7. С. 32–41. EDN MLKPXX.
12. Kędra M. Dam-induced changes in river flow dynamics revealed by RQA // The European Physical Journal Special Topics. 2023. Vol. 232. Issue 1. Pp. 209–215. DOI: 10.1140/epjs/s11734-022-00689-1
13. Giang N.N.H., Quang C.N.X., Long D.T., Ky P.D., Vu N.D., Tran D.D. Statistical and hydrological evaluations of water dynamics in the lower Sai Gon-Dong Nai River, Vietnam // Water. 2022. Vol. 14. Issue 1. P. 130. DOI: 10.3390/w14010130
14. Асатрян М.В., Валл И.В., Варламова А.Д., Жуковская Д.Д., Сивакова О.А. Анализ результатов совместных наблюдений за уровнем воды реки Преголи на разных постах в середине 20-го века // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2022. Т. 8. № 4. С. 58–67. EDN GZBFPX.
15. Кочеткова С.А. Уровни воды и уклоны реки Шешупе на четырех гидропостах // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т. 9. № 3. С. 52–59.
16. Nguyen H.Q., Tran Q.V., Ha N.Th., Nguyen T.D.H. Long-term water level dynamics in the Red

River basin in response to anthropogenic activities and climate change // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 912. P. 168985. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168985

17. Наумов В.А. Корреляционный анализ ежедневных расходов рек региона // Вестник Научно-методического совета по природообустройству и водопользованию. 2020. № 20. С. 48–54. DOI: 10.26897/2618-8732-2020-48-54. EDN RQNAMP.

18. Зиновьев А.Т., Галахов В.П., Кошелев К.Б. О результатах прогнозирования весеннего половодья на Верхней Оби в 2015 году // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 3. С. 58–68. EDN WAWIVL.

19. Кошелева Е.Д., Кудишин А.В. Краткосрочное прогнозирование уровней воды реки Обь у города Барнаула во время половодья 2018 года // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2018. № 3 (50). С. 27–37. EDN VNOPEM.

20. Наумов В.А. Оценка скорости движения воды в реке Неман между городами Смалининкай и Советск методом корреляционного анализа // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2022. Т. 8. № 2. С. 41–49. EDN WCBUVR.

Поступила в редакцию 19 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 21 мая 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Аркадьевич Наумов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности и природообустройства, **Калининградский государственный технический университет (КГТУ)**; 236022, г. Калининград, Советский пр-т, д. 1; SPIN-код: 1788-8843, Scopus: 16441812200, ResearcherID: T-2380-2017, ORCID: 0000-0003-0560-5933; van-old@mail.ru;

Наталья Равиловна Ахмедова — кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры техносферной безопасности и природообустройства, **Калининградский государственный технический университет (КГТУ)**; 236022, г. Калининград, Советский пр-т, д. 1; SPIN-код: 5896-2408, ORCID: 0000-0003-3483-3580; isfendi@mail.ru.

Вклад авторов:

Наумов В.А. — научное руководство, концепция исследования, написание исходного текста.

Ахмедова Н.Р. — сбор материала, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Frolova N.L., Nesterenko D.P., Shenberg N.V. Intra-annual flow regime of rivers in Russia. *Lomonosov Geography Journal*. 2010; 6:8-16. EDN NCSYLB. (rus.).
2. Safina G.R., Golosov V.N. The effect of climate change on the annual flow distribution of small rivers in the southern half of the European territory of Russia. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*. 2018; 160(1):111-125. EDN XUGKPI. (rus.).
3. Frolova N.L., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B. Classification and zoning of rivers by their water regime: history, methodology, and perspectives. *Water Resources*. 2021; 48(2):121-134. DOI: 10.31857/S032105962-102005X. EDN PSMUKH. (rus.).
4. Akhmedova N., Naumov V. Study of floods on the rivers of the Kaliningrad region at the beginning of 2020 in the absence of snow cover and ice. *E3S Web of Conferences*. 2023; 463:02009. DOI: 10.1051/e3s-conf/202346302009
5. Indivero J., Myers-Pigg A.N., Ward N.D. Seasonal changes in the drivers of water physico-chemistry variability of a small freshwater tidal river. *Frontiers in Marine Science*. 2022; 8. DOI: 10.3389/fmars.2021.821316

6. Izquierdo-Ayala K., García-Aragón J.A., Castillo-Uzcanga M.M., Díaz-Delgado C., Carrillo L., Salinas-Tapia H. Flocculation patterns related to intra-annual hydrodynamics variability in the lower Grijalva-Usamacinta system. *Water*. 2023; 15(2):292. DOI: 10.3390/w15020292
7. Kodirov S., Djumanov Ja. Intra-annual surface runoff distribution of the Chatkal River in different watery years. *E3S Web of Conferences*. 2021; 264:01035. DOI: 10.1051/e3sconf/202126401035
8. Xia R., Sun H., Chen Y., Wang Q., Chen X., Hu Q. et al. Ecological flow response analysis to a typical strong hydrological alteration river in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023; 20(3):2609. DOI: 10.3390/ijerph20032609
9. Sokolova G.V. Statistical analysis of the Amur river water regime forecast. *Regional Problems*. 2022; 25(1):49–61. DOI: 10.31433/2618-9593-2022-25-1-49-61. EDN FAOIBK. (rus.).
10. Beysembaeva M.A., Dubrovskaya L.I., Zemtsov V.A. Anthropogenic transformations of water resources and maximum water levels of the Irtysh river in the lowland part of the basin in the republic of Kazakhstan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018; 329(3):6–15. EDN XVVOST. (rus.).
11. Mazurkin P.M. Method of step-by-step analysis of river level dynamics. *Modern Science-Intensive Technologies*. 2010; 7:32–41. EDN MLKPXX. (rus.).
12. Kędra M. Dam-induced changes in river flow dynamics revealed by RQA. *The European Physical Journal Special Topics*. 2023; 232(1):209–215. DOI: 10.1140/epjs/s11734-022-00689-1
13. Giang N.N.H., Quang C.N.X., Long D.T., Ky P.D., Vu N.D., Tran D.D. Statistical and hydrological evaluations of water dynamics in the lower Sai Gon-Dong Nai River, Vietnam. *Water*. 2022; 14(1):130. DOI: 10.3390/w14010130
14. Asatrian M.V., Vall I.V., Varlamova A.D., Zhukovskaia D.D., Sivakova O.A. Analysis of the results of the Pregel river joint water level observations at different posts in the middle of the 20th century. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2022; 8(4):58–67. EDN GZBFPX. (rus.).
15. Kochetkova S.A. Water levels and slopes of the Sheshupe river at four hydroposts. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023; 9(3):52–59. (rus.).
16. Nguyen H.Q., Tran Q.V., Ha N.Th., Nguyen T.D.H. Long-term water level dynamics in the Red River basin in response to anthropogenic activities and climate change. *Science of The Total Environment*. 2024; 912:168985. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168985
17. Naumov V.A. Correlation analysis of daily river flows in the region. *Bulletin of the Scientific and Methodological Council for Environmental Engineering and Water Use*. 2020; 20:48–54. DOI: 10.26897/2618-8732-2020-48-54. EDN RQNPAMP. (rus.).
18. Zinovyev A.T., Galakhov V.P., Koshelev K.B. On results of forecasting of spring high-water at the Verkhnyaya Ob river in 2015. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2016; 3:58–68. EDN WAWIVL. (rus.).
19. Kosheleva E.D., Kudishin A.V. Short-term forecast of Ob river water level near Barnaul city during flood 2018. *Bulletin of the Altay Branch of the Russian Geographical Society*. 2018; 3(50):27–37. EDN VNOPEM. (rus.).
20. Naumov V.A. Estimation of the water movement speed in the Neman river between the cities of Smalininkai and Sovetsk by the method of correlation analysis. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2022; 8(2):41–49. EDN WCBUVR. (rus.).

Received March 19, 2024.

Adopted in revised form on March 26, 2024.

Approved for publication on May 21, 2024.

B I O N O T E S: **Vladimir A. Naumov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technosphere Safety and Environmental Management; **Kaliningrad State Technical University (KSTU)**; 1 Sovetsky prospekt, Kaliningrad, 236022, Russian Federation; SPIN-code: 1788-8843, Scopus: 16441812200, ResearcherID: T-2380-2017, ORCID: 0000-0003-0560-5933; van-old@mail.ru;

Natal'ya R. Ahmedova — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety and Environmental Management; **Kaliningrad State Technical University (KSTU)**; 1 Sovetsky prospekt, Kaliningrad, 236022, Russian Federation; SPIN-code: 5896-2408, ORCID: 0000-0003-3483-3580; isfendi@mail.ru.

Contribution of the authors:

Vladimir A. Naumov — scientific guidance, research concept, writing the source text.

Natal'ya R. Ahmedova — collection of material, revision of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.059:620.193

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1365-1372

Метод повышения производительности труда в строительстве

Азарий Абрамович Лapidус

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Предпринята попытка решения задачи определения производительности труда, рассмотрен метод ее повышения. Представление производительности труда в виде сложной системы, формирующейся исходя из положений системотехники в строительстве, позволяет создать декомпозицию ее составляющих в виде факторов и влияющих на них параметров.

Материалы и методы. Рассмотрена производительность труда как сложная строительная система, имеющая большое количество подсистем ее формирующую. Математическая модель производительности труда, сформированная из факторов и влияющих на них параметров, дает возможность определять фактическое значение производительности труда.

Результаты. Фактическое значение производительности труда предлагается сравнивать с нормальным значением — величиной, обеспечивающей требуемую производительность труда в строительстве, его отдельном виде или даже производственной структуре. В качестве основных факторов взяты исследуемые подсистемы, каждая из них принята за факторы, влияющие на производительность труда. К ним можно добавить и другие, например унификацию проектных решений или какой-нибудь еще фактор. Каждый из перечисленных факторов характеризуется создающими его параметрами. Так же, как и факторы, параметры, их создающие, представляют открытую подсистему, наполнение которой является предметом исследования. Результат — построение математической модели производительности труда.

Выводы. Решение прямой задачи — определение фактической величины производительности труда на основе значений факторов и влияющих на них параметров может осуществляться для сравнения с нормальным значением производительности труда и определением фактического роста производительности труда. Решение обратной задачи — достижение директивной продолжительности труда за счет присвоения факторам и влияющим на них параметрам значений, необходимых для решения поставленной задачи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: производительность труда, фактическое значение производительности труда, нормальное значение производительности труда, факторы производительности труда, влияющие на факторы параметры, метод повышения производительности труда

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лapidус А.А. Метод повышения производительности труда в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1365–1372. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1365-1372

Автор, ответственный за переписку: Азарий Абрамович Лapidус, lapidus58@mail.ru.

A method of increasing labour productivity in construction

Azariy A. Lapidus

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

ABSTRACT

Introduction. The attempt to solve the problem of labour productivity determination is made, the method of increasing it is considered. The representation of labour productivity in the form of a complex system, formed on the basis of the provisions of system engineering in construction, makes it possible to create a decomposition of its components in the form of factors and parameters influencing them.

Materials and methods. Labour productivity as a complex construction system with a large number of subsystems forming it is considered. A mathematical model of labour productivity, formed from factors and parameters influencing them, makes it possible to determine the actual value of labour productivity.

Results. The actual value of labour productivity is proposed to be compared with the normal value — the value that ensures the required labour productivity in construction, its individual type or even the production structure. The subsystems under study are taken as the main factors, each of them is taken as factors affecting labour productivity. Others can be added to them, for example, unification of design solutions or some other factors. Each of the listed factors is characterized by the pa-

rameters creating it. As well as the factors, the parameters creating them represent an open subsystem, the content of which is the subject of research. The result is the construction of a mathematical model of labour productivity.

Conclusions. The solution of the direct problem — determination of the actual value of labour productivity based on the value of factors and the parameters influencing them can be carried out for comparison with the normal value of labour productivity and determination of the actual growth of labour productivity. The solution to the inverse problem is to achieve the target labour duration by assigning to the factors and parameters influencing them the values necessary to solve the task.

KEYWORDS: labour productivity, actual value of labour productivity, normal value of labour productivity, labour productivity factors, parameters influencing factors, method of increasing labour productivity

FOR CITATION: Lapidus A.A. A method of increasing labour productivity in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1365-1372. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1365-1372 (rus.).

Corresponding author: Azariy A. Lapidus, lapidus58@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день достижение основных результатов в строительстве — сокращение продолжительности, снижение бюджета проекта и повышение его качества — невозможно без повышения производительности труда [1]. Для рассмотрения вопросов повышения производительности труда необходимо сформулировать и обосновать, каким образом формируется это понятие, какие факторы его формируют.

Классическое определение производительности труда характеризуется объемом выпущенной продукции за рассматриваемую единицу времени [2]. Для строительства выпущенной продукцией могут являться элементы конструкций, конструкции, здания, комплексы зданий. Тем больше можно произвести продукции, чем качественнее будут применяемые материалы и технологии, простые и унифицированные проектные решения, выше квалификация исполнителей, отсутствие административных барьеров, проще логистика поставок и многое другое.

Производительность труда может выражаться в безразмерных единицах, как результат комбинаторики элементов, в дальнейшем факторов и их параметров, составляющих математическую модель, или в физическом выражении натуральных объемов произведенного продукта за единицу времени — смена, сутки, месяц, год [3].

Общая оценка производительности труда складывается из нескольких, наиболее значимых групп влияния на конечный результат. К ним можно отнести такие, как внесение изменений в регулирование строительной отрасли для придания ей максимальной прозрачности, совершенствование контрактной системы, модернизация производственных процессов на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) объекта строительства, оптимизация системы логистики и закупок, управление проектами строительства на современном уровне, цифровизация процессов строительства и производства строительных материалов, повышение уровня квалификации персонала на всех уровнях и другое [4].

В настоящее время поручением заместителя председателя Правительства Российской Федерации

Марата Хуснуллина от 29.05.2023 № 2825-П49-МХ¹ при Департаменте строительства Правительства РФ созданы рабочие группы, такие как «Повышение эффективной организации труда», «Создание стимулов для подрядных организаций по повышению производительности труда» и другие, деятельность которых направлена в том числе на повышение производительности труда в строительстве. Ранее был рассмотрен исследовательский механизм, позволяющий учитывать данные направления через создание организационно-технологической платформы в строительстве [5].

По результатам оценки работы этих групп можно представить, что производительность труда зависит от следующих направлений:

- развитие конкуренции на рынке строительства и производства строительных материалов;
- повышение скорости внедрения новых технологий и инноваций;
- развитие кадрового потенциала;
- цифровизация внешних и внутренних процессов, внедрение информационной системы управления проектами;
- повышение эффективности труда;
- сокращение инвестиционно-строительного цикла (ИСЦ);
- сокращение логистических издержек.

Этот перечень не является закрытым и в качестве дополнений можно, например, привести такие направления, как формирование типовых проектных решений, увеличение инвестиций в фундаментальные научные исследования, новые формы взаимодействия участников строительства [6] и др.

Существует подход оценки производительности труда, связанный со смежными не сырьевыми отраслями промышленности [7, 8], выделяющий следующие факторы — подсистемы, влияющие на производительность труда:

- финансирование основных фондов;
- вывод продукции на внешние рынки, участие в экспортной деятельности;

¹ Поручение заместителя председателя Правительства Российской Федерации Марата Хуснуллина от 29.05.2023 № 2825-П49-МХ.

- финансирование научных исследований и создание новых продуктов;
- финансирование технологических и организационных продуктов;
- цифровизация отраслей экономики;
- финансирование человеческого капитала.

Представленные выше факторы, формирующие производительность труда, отмечаются и в работах зарубежных ученых [9–11]. В отечественных исследованиях подчеркивается необходимость снижения административных барьеров в строительстве за счет различных процедур [12] при строгом выполнении требований по безопасности зданий и сооружений [13].

Как видно, формирование факторов, влияющих на производительность труда, приводит к созданию пересекающихся множеств, с повторением одних и тех же факторов, но иначе сформулированных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поэтому, по мнению автора, важно создать метод, опирающийся на изучение факторов, оказывающих влияние на производительность труда, позволяющий оценивать, а значит, и повышать производительность труда.

Рассмотрим производительность труда как сложную строительную систему, имеющую большое количество подсистем ее формирующую.

Этой строительной системе присущи все свойства сложной системы [14], благодаря которым мы сможем описать ее поведение и построить аналитическую модель, являющуюся основой метода формирования повышения производительности труда.

Для дальнейшего описания производительности труда сформулируем основные принципы существования сложной строительной системы [15]:

- системность — представление крупномасштабного строительного проекта как сложной системы;
- иерархичность — представление системы в виде поуровневой иерархии;
- этапность — представление строительного проекта в виде последовательных этапов, представляющих ЖЦ объекта [16];
- непрерывность — отсутствие перерывов между этапами ЖЦ строительного объекта;
- интеграция — возможность совмещения этапов ЖЦ строительного проекта;
- гибкость — способность системы в процессе реализации проекта оперативно реагировать на внешние воздействия и риски;
- адаптивность — возможность изменять структуру системы в процессе реализации проекта с сохранением его заданных конечных показателей;
- надежность — выполнение основных функциональных требований системы в установленных определенных диапазонах изменения ее параметров, направленных на реализацию проекта в соответствии с конечными показателями.

Метод повышения производительности труда можно представить в виде последовательности конкретных операций на следующих этапах:

- 1-й этап. Формирование факторов, оказывающих влияние на производительность труда.
- 2-й этап. Оценка весов и ранжирование факторов.
- 3-й этап. Формирование параметров, влияющих на факторы.
- 4-й этап. Оценка весов и ранжирование параметров, влияющих на факторы.
- 5-й этап. Создание аналитической модели производительности труда, учитывающей формирующие ее факторы и влияющие на них параметры.
- 6-й этап. Расчет производительности труда.
- 7-й этап. Корректировка параметров и факторов, направленная на повышение производительности труда.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим подробнее действия на каждом из перечисленных выше этапов.

1-й этап. Формирование факторов, оказывающих влияние на производительность труда

Возьмем в качестве основных факторов перечисленные выше при описании направления формирования системы производительности труда. Приняв каждую из подсистем за фактор, влияющий на производительность труда, составим открытый перечень, к которому на следующих этапах исследований можно добавить и другие факторы, например унификацию проектных решений или выход на зарубежные рынки, внедрение смарт-технологий [17].

Перед экспертами на этом этапе будет поставлена задача оценить необходимость и достаточность представленных факторов. Таким образом, итогом данного этапа является сформулированный перечень факторов:

- развитие конкуренции на рынке строительства;
- развитие конкуренции на рынке производства строительных материалов;
- повышение скорости внедрения новых технологий и инноваций;
- повышение скорости внедрения новых материалов;
- развитие кадрового потенциала;
- цифровизация внешних и внутренних процессов;
- внедрение информационной системы управления проектами;
- повышение эффективности труда;
- сокращение ИСЦ;
- сокращение логистических издержек.

2-й этап. Оценка весов и ранжирование факторов

На этом этапе эксперты осуществляют ранжирование факторов, их расстановку, например в убывающей позиции, в зависимости от веса фактора. Эксперты выбираются из числа специалистов, наиболее

вовлеченных в исследования производительности труда. Их количество должно превышать 4 [18], однако окончательное число может быть установлено по результатам эксперимента с учетом согласованности результатов.

Результаты экспертного опроса рассматриваются в два этапа [19]: оценивается согласованность экспертного мнения; выполняется проверка неслучайности согласия экспертов. Если признается согласованность мнений экспертов и подтверждается неслучайность их согласия, то строится априорная диаграмма рангов, рассчитываются удельные веса и определяются наиболее значимые факторы.

Согласованность мнений экспертов оценивается с помощью коэффициента конкордации Кэнделла (W), значение которого может быть от 0 до 1, а в случае согласованности должно быть больше 0,5. Для проверки гипотезы о неслучайности согласия экспертов используется критерий Пирсона (χ_p^2), значение которого сравнивается с табличными данными и в случае, если оно больше табличных, то подтверждается существенное сходство мнений экспертов:

$$\chi_p^2 > \chi_m^2. \quad (1)$$

Коэффициент конкордации Кендала вычисляется по формуле:

$$W = 12S/m^2 \cdot (k^3 - k), \quad (2)$$

где m — эксперты; S — сумма квадратов отклонений; k — факторы.

Критерий Пирсона определяется по формуле:

$$\chi_p^2 = W \cdot m \cdot (k - 1). \quad (3)$$

Таким образом, если значения коэффициента Кэнделла находятся в пределах от 0,5 до 1, а критерий Пирсона больше табличных значений, то результат значимый и можно переходить к оценке весов и представлению рангов факторов.

Вес i -го фактора g_i определяется по формуле:

$$g_i = N_i / \sum N, \quad (4)$$

где N_i — ранг i -го фактора; $\sum N$ — сумма рангов всех факторов.

3-й этап. Формирование параметров, влияющих на факторы

Каждый из перечисленных факторов характеризуется создающими его параметрами. Так же, как и факторы, параметры, их создающие, представляют открытую подсистему, наполнение которой является предметом настоящего исследования, и может быть дополнена экспертами. Рассмотрим представленные факторы и определим параметры, их создающие.

1. Развитие конкуренции на рынке строительства, параметры:

- механизмы конкуренции на рынке строительства;
- государственная мотивация конкурирующих структур на рынке строительства;

• финансовая мотивация конкурирующих структур на рынке строительства;

2. Развитие конкуренции на рынке производства строительных материалов, параметры:

- механизмы конкуренции на рынке строительных материалов;
- государственная мотивация конкурирующих структур на рынке строительных материалов;
- финансовая мотивация конкурирующих структур на рынке строительных материалов;
- система рейтингования на рынке строительных материалов;
- борьба с контрафактной продукцией.

3. Повышение скорости внедрения новых технологий и инноваций, параметры:

- получение информации о наличии новых технологий и инноваций;
- создание гибких нормативов для внедрения новых технологий и инноваций;
- допуск новых технологий и инноваций на рынок;
- практическое внедрение новых технологий и материалов.

4. Повышение скорости внедрения новых материалов, параметры:

- получение информации о наличии новых материалов;
- создание гибких нормативов для внедрения новых материалов;
- допуск новых материалов на рынок;
- практическое внедрение новых материалов на рынок.

5. Развитие кадрового потенциала, параметры:

- непрерывность профессионального образования и переподготовки;
- подготовка рабочих кадров;
- подготовка специалистов среднего звена;
- подготовка инженерно-технических работников (ИТР);
- переподготовка рабочих кадров;
- переподготовка специалистов среднего звена;
- переподготовка ИТР.

6. Цифровизация внешних и внутренних процессов, параметры:

- наличие соответствующего программного обеспечения (ПО);
- подготовка специалистов, реализующих цифровизацию в компаниях;
- скорость внедрения цифровизации внутренних и внешних процессов;
- цифровизация взаимоотношений с другими участниками строительной отрасли;
- мотивация внедрения цифровизации внутренних и внешних процессов.

7. Внедрение информационной системы управления проектами, параметры:

- наличие соответствующего ПО;

- наличие специалистов в области информационной системы управления проектами;
- мотивация внедрения системы управления проектами;

• наличие элементов системы управления проектами на всех этапах ЖЦ объектов строительства.

8. Повышение эффективности труда, параметры:

- типизация и унификация процессов;
- использование современных материалов;
- применение современных технологий;
- использование современного оборудования;
- заинтересованность подрядчиков в повышении эффективности труда;
- механизмы мотивации участников строительного рынка в повышении эффективности труда.

9. Сокращение ИСЦ, параметры:

- формирование структуры ИСЦ, направленной на преодоление административных барьеров;
- сокращение административных барьеров ИСЦ;
- обеспечение доступа к долгосрочному финансированию с оптимальной кредитной ставкой инвестиционно-строительных проектов;
- использование типизации и унификации организационно-технологических и проектных решений;
- реализация проектов с учетом принципов ЖЦ объекта строительства.

10. Сокращение логистических издержек:

- формирование логистических цепочек «производитель материалов и оборудования – строительная площадка»;
- программное обеспечение по формированию логистических цепочек «производитель материалов и оборудования – строительная площадка»;
- цифровизация логистических цепочек «производитель материалов и оборудования – строительная площадка»;
- оптимизация логистических цепочек «производитель материалов и оборудования – строительная площадка».

Таким образом, на этом этапе формируются параметры, оказывающие влияние на факторы производительности труда. Подсистема параметров не является закрытой и может дополняться как в процессе исследования, так и при проведении экспертного опроса.

4-й этап. Оценка весов и ранжирование параметров, влияющих на факторы

В процессе создания математической или аналитической модели производительности труда осуществляется экспертный опрос, позволяющий оценить значимость каждого параметра и его вес. Математический аппарат, используемый на этом этапе, аналогичен представленному на втором этапе. В соответствии с формулами (1)–(4) выполняется ранжирование всех исследуемых параметров, их вес, рассматривая их влияние на соответствующие факторы. То есть для каждого i -го фактора, ранг которого N_i и вес g_i уже известны, соответственно определяются

ранг N_{ij} и вес g_{ij} влияющих на данный фактор параметров. Такая детальная декомпозиция производительности труда позволит на следующих этапах построить модель, максимально учитывающую все элементы, ее формирующие — факторы и параметры.

5-й этап. Создание аналитической или математической модели производительности труда, учитывающей формирующие ее факторы и влияющие на них параметры

Полученные на предыдущем этапе результаты подлежат математической обработке. В этот момент трудно сказать, какой из операционных методов будет заложен в создание этой аналитической или математической модели.

Например, как один из вариантов может рассматриваться целевая функция. Как известно, целевая функция — это параметрическая функция многих переменных, подлежащая оптимизации в целях решения поставленной оптимизационной задачи.

В данном случае мы рассматриваем повышение производительности труда, а значит, перед нами стоит одна из задач оптимизации — максимизация, т.е. достижение максимальной производительности труда с учетом исходных данных, ее формирующих.

Как было показано ранее, на предыдущих этапах определяются характеристики каждого из факторов, формирующих производительность труда, и параметров, влияющих на них. Таким образом у j -го параметра i -го фактора производительности труда будет определен вес G_{ij} как произведение весов i -го фактора и j -го параметра:

$$G_{ij} = g_i \cdot g_{ij}. \quad (5)$$

Полученное значение, в определенной степени зависящее от его веса и вычисленное по формуле (5), характеризует влияние исследуемого параметра на производительность труда. В дальнейшем можно будет отбросить по оговоренному правилу наименее значимые факторы и параметры, чтобы было проще формировать значение конечного показателя, управляя наиболее значимыми факторами и параметрами.

6-й этап. Расчет производительности труда

Определив веса всех исследуемых факторов и параметров и имея математическое или аналитическое выражение производительности труда, можно осуществить расчет ее фактического значения (Π_{ϕ}) для последующего сравнения с нормальным значением производительности труда ($\Pi_{н}$).

Важным направлением в дальнейших исследованиях является получение нормального значения производительности труда — величины, позволяющей оценивать позитивную динамику в развитии экономических показателей строительства. Опираясь на знание о величине нормального значения, можно достаточно точно определять рост производительности труда применительно не только к строительству в целом, но и по исследуемым видам строительства — промышленному, гражданско-

му, дорожному, энергетическому и другим, а также при определенной корректировке факторов и параметров по комплексам объектов или даже производственным организациям. Как правило, рассматриваются действия, связанные только с повышением производительности труда, т.е. превышением фактического над нормальным значением производительности труда:

$$P_{\phi} > P_n. \quad (6)$$

Подобный подход рассмотрен в ряде исследований, хотя в них предлагаются другие терминологические определения [20]. Однако может возникнуть ситуация, когда фактическая производительность труда оказывается ниже нормальной, и тогда перед заинтересованным лицом стоит задача посредством воздействия на факторы и параметры производительности труда повысить фактическое значение до нормального, а затем в целях достижения глобального экономического эффекта превзойти его. В любом случае речь идет о создании механизма, позволяющего за счет изменения значений факторов и влияющих на них параметров в модели производительности труда достичь требуемой величины.

7-й этап. Корректировка факторов и параметров, направленная на повышение производительности труда

Корректировка факторов и параметров, направленная на достижение требуемых значений производительности труда, является системной задачей, связанной с инвестициями в инновации, трудовые ресурсы, ПО, технологии и оборудование, преодоление административных барьеров и многие другие факторы, описанные ранее.

Назовем это прямой задачей, которая возникает в случаях, когда требуется по результатам исследования текущих значений факторов и влияющих на них параметров определить фактическую величину производительности труда и сравнить ее с нормальной.

Довольно часто встречаются требования, называемые их обратной задачей, когда необходимо достичь

директивного значения производительности труда. Тогда необходимо за счет корректировки факторов и параметров получить требуемый результат.

В обоих случаях следует разработать вычислительную программу, позволяющую посредством корректировки факторов и параметров рассчитывать значение производительности труда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование представляет попытку решения задачи определения производительности труда и разработки метода ее повышения.

Представление производительности труда в виде сложной строительной системы, формирующейся исходя из положений системотехники в строительстве, позволяет создать декомпозицию ее составляющих в виде факторов и влияющих на них параметров.

Математическая модель производительности труда, сформированная из факторов и влияющих на них параметров, позволит определять фактическое значение производительности труда.

Фактическое значение производительности труда предлагается сравнивать с нормальным значением — величиной, обеспечивающей требуемую производительность труда в строительстве, его отдельном виде или даже производственной структуре.

Решение прямой задачи — определение фактической величины производительности труда на основе значения факторов и влияющих на них параметров может осуществляться для сравнения с нормальным значением производительности труда и определения фактического роста производительности труда.

Решение обратной задачи — достижение директивной продолжительности труда за счет присвоения факторам и влияющим на них параметрам значений, необходимых для решения поставленной задачи.

Все перечисленные выше направления исследований являются важной государственной задачей, целью которой — повышение производительности труда в строительстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сальников К.Е. Сокращение продолжительности строительства в результате роста производительности труда // Финансы и управление. 2021. № 4. С. 38–49. DOI: 10.25136/2409-7802.2021.4.34480. EDN XOEDDW.
2. Киевский Л.В., Сергеев А.С. Градостроительство и производительность труда // Жилищное строительство. 2015. № 9. С. 55–59. EDN VCLZRD.
3. Андреева Е.А. Анализ динамики производительности труда в строительной отрасли России // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 4 (63). С. 243–250.

DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-4-243-250. EDN YNZGKM.

4. Ключев В.Д., Щепанский С.Б., Панаева В.В., Зайцев Д.А. Производительность труда в строительной отрасли и методы ее измерения // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2022. № 1 (33). С. 89–94. EDN KYUABY.

5. Лапидус А.А. Организационно-технологическая платформа строительства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 4. С. 516–524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524. EDN BMHWDX.

6. Мищенко В.Я., Горбанева Е.П., Арчакова С.Ю., Добросоцких М.Г. Моделирование выполнения бригадами комплекса технологических процессов в организационно-технологическом проектировании // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2017. № 6. С. 37–43. EDN ZTMWAL.

7. Симачев Ю.В., Кузык М.Г., Федюнина А.А., Зайцев А.А., Юревич М.А. Производительность труда в несырьевых секторах российской экономики: факторы роста на уровне компаний // Вопросы экономики. 2021. № 3. С. 31–67. DOI: 10.32609/0042-8736-2021-3-31-67. EDN WSCOBД.

8. Симачев Ю.В., Кузык М.Г., Федюнина А.А., Юревич М.А., Зайцев А.А. Факторы роста производительности труда на предприятиях несырьевых секторов российской экономики // XXI Апрельская международная научная конференция по проблемам развития экономики и общества. 2020. 60 с.

9. Hanley A., Pérez J.M. Are newly exporting firms more innovative? Findings from matched Spanish innovators // Economics Letters. 2012. Vol. 116. Issue 2. Pp. 217–220. DOI: 10.1016/j.econlet.2012.03.006

10. Kanacs D., Siliverstovs B. R&D and non-linear productivity growth // Research Policy. 2016. Vol. 45. Issue 3. Pp. 634–646. DOI: 10.1016/j.respol.2015.12.001

11. Backman M. Human capital in firms and regions: Impact on firm productivity // Papers in Regional Science. 2014. Vol. 93. Issue 3. Pp. 557–576. DOI: 10.1111/pirs.12005

12. Лapidус А.А., Макаров А.Н. Применение риск-ориентированного подхода при выполнении функций строительного контроля технического заказчика // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 2. С. 232–241. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.232-241. EDN ARPPKP.

13. Wu X., Liu Q., Zhang L., Skibniewski M.J., Wang Y. Prospective safety performance evaluation on construction sites // Accident Analysis & Prevention. 2015. Vol. 78. Pp. 58–72. DOI: 10.1016/j.aap.2015.02.003

14. Сафарян Г.Б. Критический анализ обобщенной модели строительной системы // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. № 4. С. 41–47. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.4. EDN PFGTCK.

15. Гусаков А.А., Богомолов Ю.М., Брехман А.И., Ваганян Г.А., Вайнштейн М.С., Владимирский С.Р. и др. Системотехника строительства. М.: Изд-во АСВ, 2004. 320 с. EDN UBCQYB.

16. Glukhova M.G., Shilova N.N., Kiselica E.P. Adoption of the best available technology in terms of the enterprise life cycle // Espacios. 2017. Vol. 38. No. 33. P. 32. EDN XNSHUE.

17. Qian F., Zhong W., Du W. Fundamental theories and key technologies for smart and optimal manufacturing in the process industry // Engineering. 2017. Vol. 3. Issue 2. Pp. 154–160. DOI: 10.1016/j.eng.2017.02.011

18. Загорская А.В., Лapidус А.А. Применение методов экспертной оценки в научном исследовании. Необходимое количество экспертов // Строительное производство. 2020. № 3. С. 21–34. DOI: 10.54950/26585340_2020_3_21. EDN TKKKCO.

19. Кузнецов Е.С. Управление техническими системами: учебное пособие. М., 2003. 247 с.

20. Киселица Е.П., Шилова Н.Н., Шеломенцев А.Г. Повышение производительности труда строительных организаций в условиях инновационной экономики // Вопросы инновационной экономики. 2021. Т. 11. № 1. С. 225–238. DOI: 10.18334/vines.11.1.111807. EDN HQMMCT.

Поступила в редакцию 26 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 12 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 16 марта 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: Азарий Абрамович Лapidус — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий и организации строительного производства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; lapidus58@mail.ru.

REFERENCES

1. Salnikov K.E. Reduction of construction time as a result of increase of labor efficiency. *Finance and Management*. 2021; 4:38-49. DOI: 10.25136/2409-7802.2021.4.34480. EDN XOEDDW. (rus.).

2. Kievskiy L.V., Sergeev A.S. Urban development and labor performance. *Housing Construction*. 2015; 9:55-59. EDN VCLZRD. (rus.).

3. Andreeva E.A. Analysis of the labour productivity dynamics in construction industry in Russia. *Bulletin of Civil Engineers*. 2017; 4(63):243-250. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-4-243-250. EDN YNZGKM. (rus.).

4. Klyuev V.D., Shchepansky S.B., Panayetova V.V., Zaitsev D.A. Analysis of the results of the implementation of the programs of the centers of competence of the national technology initiative for the first stage of its implementation. *Innovatics and Expert Examination*. 2022; 1(33):89-94. EDN KYUABY. (rus.).

5. Klyuev V.D., Shchepansky S.B., Panayetova V.V., Zaitsev D.A. Analysis of the results of the implementation of the programs of the centers of competence of the national technology initiative for the first stage of its implementation. *Innovatics and Expert Examination*. 2022; 1(33):89-94. EDN KYUABY. (rus.).

5. Lapidus A.A. Organizational and technological platform of construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(4):516-524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524. EDN BMHWDX. (rus.).

6. Mishchenko V.Ya., Gorbaneva E.P., Archakova S.Yu., Dobrosotskikh M.G. Modeling the implementation by teams of a complex of technological processes in organizational and technological design. *FES: Finance. Economy. Strategy*. 2017; 6:37-43. EDN ZTMWAL. (rus.).

7. Simachev Yu.V., Kuzyk M.G., Fedyunina A.A., Zaytsev A.A., Yurevich M.A. Labor productivity in the non-resource sectors of the Russian economy: what determines firm-level growth? *Voprosy Ekonomiki*. 2021; 3:31-67. DOI: 10.32609/0042-8736-2021-3-31-67. EDN WSCOB. (rus.).

8. Simachev Yu.V., Kuzyk M.G., Fedyunina A.A., Yurevich M.A., Zaitsev A.A. Factors of labor productivity growth at enterprises in non-resource sectors of the Russian economy. *XXI April International Scientific Conference on Problems of Development of Economy and Society*. 2020; 60. (rus.).

9. Hanley A., Pérez J.M. Are newly exporting firms more innovative? Findings from matched Spanish innovators. *Economics Letters*. 2012; 116(2):217-220. DOI: 10.1016/j.econlet.2012.03.006

10. Kancs D., Siliverstovs B. R&D and non-linear productivity growth. *Research Policy*. 2016; 45(3):634-646. DOI: 10.1016/j.respol.2015.12.001

11. Backman M. Human capital in firms and regions: Impact on firm productivity. *Papers in Regional Science*. 2014; 93(3):557-576. DOI: 10.1111/pirs.12005

12. Lapidus A.A., Makarov A.N. A risk-based approach to construction control applied by a developer.

Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(2):232-241. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.232-241. EDN ARPPKP. (rus.).

13. Wu X., Liu Q., Zhang L., Skibniewski M.J., Wang Y. Prospective safety performance evaluation on construction sites. *Accident Analysis & Prevention*. 2015; 78:58-72. DOI: 10.1016/j.aap.2015.02.003

14. Safaryan G.B. A generalized model of a building system: a critical analysis. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(4):41-47. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.4. EDN PFGTCK. (rus.).

15. Gusakov A.A., Bogomolov Yu.M., Brekhman A.I., Vaganyan G.A., Vaynshteyn M.S., Vladimirskiy S.R. et al. *Construction systems engineering*. Moscow, ASV Publishing House, 2004; 320. EDN UBCQYB. (rus.).

16. Glukhova M.G., Shilova N.N., Kiselica E.P. Adoption of the best available technology in terms of the enterprise life cycle. *Espacios*. 2017; 38(33):32. EDN XNSHUE.

17. Qian F., Zhong W., Du W. Fundamental Theories and Key Technologies for Smart and Optimal Manufacturing in the Process Industry. *Engineering*. 2017; 3(2):154-160. DOI: 10.1016/j.eng.2017.02.011

18. Zagorskaya A.V., Lapidus A.A. Application of expert judgments methods in scientific research. Determination of the required number of experts. *Construction Production*. 2020; 3:21-34. DOI: 10.54950/26585340_2020_3_21. EDN TKKKCO. (rus.).

19. Kuznetsov E.S. *Management of technical systems : textbook*. Moscow, 2003; 247. (rus.).

20. Kiselitsa E.P., Shilova N.N., Shelomentsev A.G. Improving the labour productivity of construction organizations in an innovative economy. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2021; 11(1):225-238. DOI: 10.18334/vinec.11.1.111807. EDN HQMMCT. (rus.).

Received February 26, 2024.

Adopted in revised form on March 12, 2024.

Approved for publication on March 16, 2024.

B I O N O T E S : **Azariy A. Lapidus** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; SPIN-code: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; lapidus58@mail.ru.

Разделение водонефтяных эмульсий на поверхностно-модифицированных капиллярных ультрафильтрационных мембранах

Александр Сергеевич Ильиных, Евгений Васильевич Мигалатий,

Александр Валерьевич Корнеев

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ);

г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Накопление нефтесодержащих сточных вод в окружающей среде становится все более серьезной угрозой экосистеме и здоровью человека. Исследовали модификацию ультрафильтрационной PVDF мембраны с целью создания гидрофильного слоя на ее поверхности, повышения производительности и увеличения противообрастающих свойств при очистке водонефтяных эмульсий.

Материалы и методы. Использовались полволоконные капиллярные мембраны PVDF с порами диаметром 0,1 мкм. Мембраны были подвергнуты двухступенчатой модификации, которая включала обработку таниновой кислотой и последующее окисление перманганатом калия в различных буферных растворах. Для создания модельных водонефтяных эмульсий применялись масло моторное, керосин, дистиллированная вода и додецилсульфат натрия. Все эксперименты по разделению водонефтяных эмульсий проводили при поддержании постоянного давления фильтрации 1 бар на приготовленной фильтровальной ячейке в тупиковом режиме. Приготовленные модельные растворы выполнены с применением додецилсульфата натрия и содержали загрязняющие вещества — моторное масло или керосин. Фильтрат после мембраны отбирали для определения проницаемости и эффективности разделения растворов. Модификация поверхности оказала положительное влияние на эффективность задержания нефтепродуктов. При разделении эмульсии моторного масла эффективность достигала 99 %, содержание нефтепродуктов во всех пробах фильтрата было ниже 0,4 мг/л. В случае с разделением эмульсии керосина наблюдали незначительное снижение эффективности очистки до 95 %, содержание нефтепродуктов — ниже 1,15 мг/л.

Результаты. Полученные результаты показали значительное увеличение производительности и эффективности разделения. Удельная производительность мембраны увеличилась до 143 % при разделении моторного масла и до 67 % при разделении керосина.

Выводы. Модифицированные мембраны продемонстрировали высокую эффективность удаления нефтепродуктов, до 99 % для моторного масла и до 98 % для керосина, также обладали высокой степенью восстановления потока (FRR) до 91 %. Данные результаты могут быть перспективными для масштабирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ультрафильтрация, ультрафильтрационные капиллярные мембраны, модификация поверхности, гидрофилизация, разделение водонефтяных эмульсий, нефтесодержащие сточные воды, очистка сточных вод

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ильиных А.С., Мигалатий Е.В., Корнеев А.В. Разделение водонефтяных эмульсий на поверхностно-модифицированных капиллярных ультрафильтрационных мембранах // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1356–1364. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1356-1364

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Ильиных, as_ilinykh@mail.ru.

Oil-water emulsion separation on surface-modified capillary ultrafiltration membranes

Alexander S. Ilyinykh, Evgeny V. Migalatiy, Alexander V. Korneev

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU);

Ekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The accumulation of oily wastewater in the environment is becoming an increasing threat to the ecosystem and human health. The modification of ultrafiltration PVDF membrane was investigated in order to create a hydrophilic layer on its surface, to improve performance and increase antifouling properties in the purification of oil-water emulsions.

Materials and methods. PVDF hollow-fibre capillary membranes with 0.1 μm diameter pores were used. The membranes were subjected to two-step modification, which included treatment with tannic acid and subsequent oxidation with potassium permanganate in various buffer solutions. Motor oil, kerosene, distilled water and sodium dodecyl sulfate were used

to create model water-in-oil emulsions. All oil-water emulsion separation experiments were performed while maintaining a constant filtration pressure of 1 bar on a prepared filter cell, in dead-end mode. The prepared model solutions were made with sodium dodecyl sulfate and contained the pollutant motor oil or kerosene. The filtrate after the membrane was sampled to determine the permeability and separation efficiency of the solutions. Surface modification had a positive effect on the retention efficiency of petroleum products. In the case of motor oil emulsion separation, the efficiency reached 99 %, and the content of oil products in all filtrate samples was below 0.4 mg/l. In the case of separation of kerosene emulsion there was observed a slight decrease in the efficiency of purification up to 95 %, the content of oil products was below 1.15 mg/l.

Results. The results obtained showed a significant increase in throughput and separation efficiency. The specific membrane performance increased up to 143 % for motor oil separation and up to 67 % for kerosene separation.

Conclusions. The modified membranes showed high petroleum product removal efficiency, up to 99 % for motor oil and up to 98 % for kerosene, also had high flux recovery rate (FRR) up to 91 %. The results obtained may be promising for scaling up.

KEYWORDS: ultrafiltration, ultrafiltration capillary membranes, surface modification, hydrophilization, separation of oil-water emulsions, oily wastewater, wastewater treatment

FOR CITATION: Ilyinykh A.S., Migalatiy E.V., Korneev A.V. Oil-water emulsion separation on surface-modified capillary ultrafiltration membranes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1356-1364. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1356-1364 (rus.).

Corresponding author: Alexander S. Ilyinykh, as_ilyinykh@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием промышленности нефтесодержащие стоки продолжают накапливаться в поверхностных источниках и представляют все большую опасность для экосистемы и здоровья человека. Основным источником образования нефтесодержащих сточных вод (СВ) прежде всего является антропогенный фактор: промышленные сбросы, разливы нефти и другая деятельность человека. В связи с этим важна разработка технологий по удалению нефтепродуктов из воды для восстановления и рекультивации водных объектов. Традиционные методы очистки, такие как флотация [1], гравитационное отстаивание, адсорбция [2] и центрифугирование [3], могут обладать следующими недостатками: низкой эффективностью, высокими энергопотреблением или эксплуатационными затратами. Более того, вышеперечисленные методы обычно не обеспечивают надлежащее качество очистки СВ от эмульгированных нефтепродуктов из-за высокой стабильности эмульсии и сравнительно небольшого размера капель (0,1–10 мкм) [4]. Таким образом, разработка высокоэффективных и недорогих технологий разделения водонефтяных эмульсий остается актуальной задачей.

В последние годы мембранная технология была отмечена как одна из наиболее перспективных технологий разделения [5–8] благодаря ее преимуществам, таким как высокая эффективность, низкое энергопотребление, возможность масштабирования и низкие эксплуатационные расходы. Мембранная технология может быть применена для очистки различных водонефтяных эмульсий.

Несмотря на описанные выше преимущества, технология мембранного разделения обладает существенным недостатком — образованием необратимого загрязнения мембран, которое возникает в процессе фильтрации из-за взаимодействия между загрязняющими веществами и гидрофобным материалом мембраны. Загрязнение приводит к нежелательному снижению потока и сокращению срока

службы мембраны [9–11]. Когда речь идет о разделении водонефтяных эмульсий, капли нефтепродуктов имеют тенденцию к адгезии, деформации и распределению на поверхности мембраны [12], что приводит к закупориванию пор и резкому снижению проницаемости мембраны. Поэтому важно создать мембраны с противообрастающими свойствами для возможности длительного использования. За последние десятилетия во многих исследованиях показано, что повышение гидрофильности и подводной олеофобности мембран является эффективным методом достижения этой цели [13, 14]. К настоящему времени подготовлено большое количество гидрофильных мембран с помощью различных методов, включающих нанесение поверхностного покрытия [15], прививку (in situ) на поверхность [16], физическое смешивание [17], сегрегацию поверхности [18–20] и биоадгезию поверхности [21].

Среди указанных методов поверхностная биоадгезия выделяется как конкурентоспособная стратегия благодаря своей простоте, универсальности, низкой токсичности и высокой надежности [22]. В качестве наиболее часто используемого биоадгезивного вещества используется допамин (дигидроксифенилэтиламин $C_8H_{11}NO_2$). Допамин демонстрирует высокую адгезию к широкому ряду материалов через окислительную полимеризацию в щелочных растворах [23], широко применяется для защиты поверхности от обрастания. Кроме того, окисленный допамин способен вступать в реакцию с функциональными молекулами, содержащими аминные или тиоловые группы, по реакции Михаэля или реакции Шиффа [24], и служит универсальной платформой для дальнейшего повышения гидрофильности поверхности мембран.

В своей работе Ли и соавт. [25] модифицировали гидрофобные мембраны PVDF в гидрофильные путем поверхностного покрытия допamiном (дигидроксифенилэтиламин $C_8H_{11}NO_2$) и полиэтиленгликолем ($[-CH_2CH_2NH-]_n$). Группа исследователей Чена [26]

разработала PVDF мембрану с противообрастающими свойствами для разделения водонефтяных эмульсий путем нанесения полидопамина на поверхность мембраны. Тем не менее высокая стоимость допамина и нежелательный темный цвет, а также низкая однородность образующихся покрытий ограничивают его широкомасштабное использование [27–31].

Дубильная кислота — вид растительного полифенола, который может образовывать равномерное покрытие на различных подложках, рассматривается как биоклей нового поколения, обладающий рядом преимуществ: низкой стоимостью, не токсичностью, простотой хранения [4, 32]. Ченг и соавт. [33] сообщили о создании гидрофильной мембраны PVDF, полученной путем быстрого осаждения танина (далее — ТК) на поверхность мембраны с последующим погружением в раствор NaIO_4 . Являясь мощным окислителем, NaIO_4 может способствовать окислению катехоловых групп (1,2-Дигидроксibenзол, $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$) и привести к образованию гидрофильных карбоксильных групп ($-\text{COOH}$), образующихся на поверхности в кислых растворах ($\text{pH} = 5$) [34]. Несмотря на то что гидрофильность мембраны была хорошо улучшена в вышеуказанном двухэтапном процессе, поток фильтрата при разделении водонефтяных эмульсий оставался на невысоком уровне.

До настоящего времени мембрана, покрытая ТК, окисленная KMnO_4 , не изучалась для разделения водонефтяных эмульсий. В данном исследовании в качестве подложки выбрана ультрафильтрационная капиллярная мембрана PVDF благодаря ее высокой механической прочности, термической стабильности и химической стойкости. Модифицировали мембрану путем погружения в растворы ТК и KMnO_4 . Мембраны PVDF с нанесенным покрытием ТК были подготовлены для изучения влияния количества KMnO_4 на осаждение ТК. Провели двухэтапную модификацию мембраны PVDF с осаждением ТК и последующим окислением KMnO_4 , чтобы исследовать влияние количества KMnO_4 на производительность мембраны, противообрастающие свойства, а также эффективность очистки. Оптимизировали количество используемого KMnO_4 при установленном времени осаждения и дозе ТК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ультрафильтрационные мембраны из PVDF (UF, средний диаметр пор 0,1 мкм) приобретены у Hinada Water Treatment Tech Co., LTD (Китай). Экспериментальные мембраны площадью 53 см² изготовлены самостоятельно с использованием волокон ультрафильтрационных мембран Hinada. Применяли таниновую кислоту ($\text{C}_{76}\text{H}_{52}\text{O}_{46}$ танин CAS 1401-55-4); перманганат калия (далее — KMnO_4); ацетатный буферный раствор $\text{pH} = 5,5$, приготовленный самостоятельно; буферный раствор тетраборат натрия 10-водный ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) $\text{pH} = 9,2$

(ТУ 2642-004-033813273–2006, соответствует ГОСТ 4199–76); додецилсульфат натрия (SDS) компании Sigma-Aldrich Inc.; масло моторное (LUKOIL LUXE CN/CF 5W-40); керосин (ООО «Химпродукт-Балаша»). Во всех экспериментах использовали дистиллированную воду. Все химические вещества использовали в полученном виде без дополнительной очистки. Содержание нефтепродуктов определяли в соответствии с ПНД Ф 14.1:2.4.5–95.

Подготовка и модификация PVDF мембран. Подготовленные мембраны PVDF вымачивались в дистиллированной воде для тщательного вымывания из пор остатков консервационных растворов. Для выполнения двухступенчатой модификации подготовленные мембраны погружались сначала в щелочной буферный раствор с заданным содержанием ТК на установленное время, а затем переносились в кислый буферный раствор с различным содержанием окислителя KMnO_4 (перманганата калия). Полученные мембраны были обозначены MX, где X означало концентрацию KMnO_4 (0, X г), приготовленного в растворе для погружения. Не модифицированный образец мембран был назван M0. Время контакта мембраны с танином в щелочной среде составляло 1 ч. Все эксперименты проводились при комнатной температуре.

Проведение фильтрации. Эксперименты по разделению водонефтяных эмульсий выполняли при поддержании постоянного давления фильтрации 1 бар на приготовленной фильтровальной ячейке в тупиковом режиме. Эффективная площадь фильтрации исследуемых мембран из PVDF составила 53 см². В качестве образцов загрязнителя для создания эмульсий в эксперименте использовали моторное масло и керосин. Додецилсульфат натрия (SDS) применяли в качестве эмульгатора. Приготовление эмульсии, стабилизированной поверхностно-активными веществами (SDS), производили путем перемешивания смеси загрязнителя и воды с помощью электрической мешалки (IKA RW 11B), работающей при 2000 об/мин в течение 10 мин. Приготовление модельных растворов выполняли с содержанием загрязняющего вещества в количестве 1 г/л (моторное масло, керосин) и стабилизатора в количестве 0,1 г (SDS).

Для каждого эксперимента по разделению модельный раствор заливали в резервуар исходной воды, подготовленную ультрафильтрационную мембрану помещали в установку, запускали насос подачи исходного стока для создания и поддержания заданного давления. Фильтрат после мембраны отбирали для определения проницаемости и эффективности разделения.

Эффективность разделения. Тестирование каждой мембраны проводили в течение 5 циклов фильтрации/промывки, для восстановления фильтрационных характеристик мембран осуществляли обратные промывки фильтрованной водой.

Величины содержания нефтепродуктов получены из результатов одного измерения для каждого образца. Поток фильтрата J , эффективность удаления R и коэффициент восстановления потока (Flux recovery ratio, FRR) рассчитывали по следующим формулам.

Поток фильтрата:

$$J = \frac{V}{\Delta t \cdot A \cdot P}, \text{ л/(ч} \cdot \text{м}^2\text{)},$$

где V — объем исходного раствора, л; Δt — время фильтрации, ч; A — площадь поверхности мембраны, м²; P — давление фильтрации, бар.

Эффективность удаления:

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_2}{C_1}\right) \cdot 100\%,$$

где C_1 — содержание нефтепродуктов в исходной пробе, мг/л; C_2 — содержание масла в фильтрате, мг/л.

Коэффициент восстановления потока:

$$\text{FRR}(\%) = \frac{J_2}{J_1}, \text{ л/(ч} \cdot \text{м}^2\text{)},$$

где J_1 — средняя величина потока фильтрата после первого цикла фильтрации, л/(ч·м²·бар); J_2 — средняя величина потока фильтрата после заключительного цикла фильтрации л/(ч·м²·бар).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние KMnO_4 на окисление ТК. Многочисленные исследования показали, что применение определенного окислителя может ускорить осаждение полифенольных соединений на поверхности мембраны за счет быстрого окисления катехола (1,2-Дигидроксibenзол, $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$) в хиноновые группы (1,4-Бензохинон, $\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2$). Катехоловая группа образована бензольным кольцом с двумя гидроксильными группами ($-\text{C}-\text{OH}$) в 3 и 4 положениях, часто встречается в различных природных источниках, таких как фрукты, овощи и кофе. Хиноны имеют циклическую структуру, состоящую из бензольного кольца с двумя карбонильными группами ($-\text{C}=\text{O}$) в разных положениях. Хиноны обычно обладают желтым или оранжевым цветом и часто участвуют в различных биологических процессах.

Влияние времени нанесения покрытия на изменение удельной производительности мембран в работе не рассматривали. Величина времени была принята на основании обзора аналогичных исследований и составила 1 ч. В рассмотренных работах показано, что при фиксированной концентрации окислителя проницаемость мембраны значительно увеличивается с ростом времени нанесения покрытия и достигает плато через 1 ч.

Определение удельной производительности. Проведение модификации оказывает влияние на структуру поверхностного слоя. Об изменении поверхност-

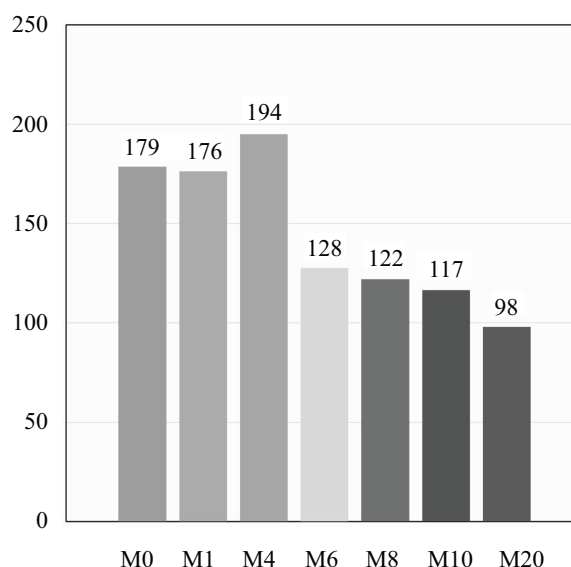


Рис. 1. Средний сьем с поверхности мембраны (л/(ч·м²·бар)) при фильтрации дистиллированной воды

Fig. 1. Permeability (LMH/bar) for distilled water filtration

ной пористости свидетельствуют данные по удельной производительности образцов рассматриваемых мембран. В работе оценивали влияние дозы окислителя KMnO_4 при проведении модификации мембраны на удельную производительность (рис. 1).

При фильтрации дистиллированной воды исходная мембрана M0 показала наиболее высокую удельную производительность 179 л/(ч·м²·бар). Образцы мембран после проведения двухэтапной модификации M1–M10 обладали более низкой удельной производительностью. Среди модифицированных мембран прослеживается зависимость снижения производительности с увеличением количества окислителя KMnO_4 в модифицирующем растворе за исключением образца M4, который немного выбивается из зависимости.

Образец M1 был обработан наименьшим количеством окислителя KMnO_4 (0,1 мг/мл), обладает наиболее высокой удельной производительностью 176 л/(ч·м²·бар); образец M10, обработанный наибольшим количеством KMnO_4 (1,0 мг/мл), показал самую низкую удельную производительность 117 л/(ч·м²·бар). Такие изменения производительности могут свидетельствовать о том, что в процессе модификации происходит блокирование адсорбционных центров поверхности полимерной мембраны молекулами хинона, изменение структуры поверхности и поверхностной пористости мембраны, в результате чего наблюдается снижение производительности. Установлено, что при увеличении дозы окислителя KMnO_4 снижается удельная производительность мембраны.

Помимо дистиллированной воды проведена фильтрация двух водонефтяных эмульсий с моторным маслом и керосином. Каждая из эмульсий была стабилизирована с помощью SDS. Изучено влия-

ние дозы окислителя KMnO_4 в модифицирующем растворе на величину удельной производительности мембран (рис. 2).

Выяснилось, что удельная производительность мембран при разделении водонефтяных эмульсий значительно меньше удельной производительности по воде. Основными источниками увеличения гидравлического сопротивления и, как следствие, уменьшения удельной производительности считаются: концентрационная поляризация, образование слоя осадка на мембране и сорбция. Последний процесс зависит в основном от химической природы загрязняющих веществ и полимера мембраны. Именно сорбция и последующее образование слоя осадка являются ключевой причиной уменьшения удельной производительности в случае фильтрации гидрофильных соединений.

При фильтрации эмульсий образец М0 обладал самой низкой удельной производительностью. Такое снижение производительности можно объяснить быстрым образованием необратимого загрязнения мембраны нефтепродуктами, которое вызвано адгезией нефтепродуктов, их распределением на поверхности мембран и закупориванием пор, ввиду высокой гидрофобности материала.

В то же время величина удельной производительности модифицированных мембран М1–М10 была значительно выше мембраны М0: на 13–143 % при разделении эмульсий с моторным маслом и на 2–67 % при разделении эмульсии с керосином. Кроме того, для образца М10 обнаружено увеличение среднего съема

ма при разделении эмульсии керосина относительно фильтрации дистиллированной воды на 21 %.

Такое изменение производительности может свидетельствовать о том, что в процессе модификации изменяется структура поверхности мембраны, образуется тонкий слой, обогащенный карбоксильными группами с гидратной оболочкой, который препятствует сорбции нефтепродуктов на поверхность мембраны.

Эффективность разделения. На основании полученных данных рассчитали эффективность задержания нефтепродуктов R по указанной формуле. Содержание нефтепродуктов определяли в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.5–95. Большинство нефтепродуктов были задержаны в процессе фильтрации. Как можно увидеть из рис. 3, а, модификация поверхности оказала положительное влияние на эффективность задержания нефтепродуктов при разделении эмульсии моторного масла, для образцов М1–М10 составила до 99,9 %.

Содержание нефтепродуктов во всех пробах фильтрата было ниже 0,4 мг/л. В случае с разделением эмульсии керосина (рис. 3, б) для образцов модифицированных мембран М1–М10 наблюдали незначительное снижение эффективности очистки с 99 до 95–98 %. Содержание нефтепродуктов во всех пробах фильтрата было ниже 1,15 мг/л.

Изображения водонефтяной эмульсии до и после фильтрации представлены на рис. 4, видно, что большинство капель масла было удалено.

Степень восстановления потока (FRR). Для проверки предположения, что проведение мо-

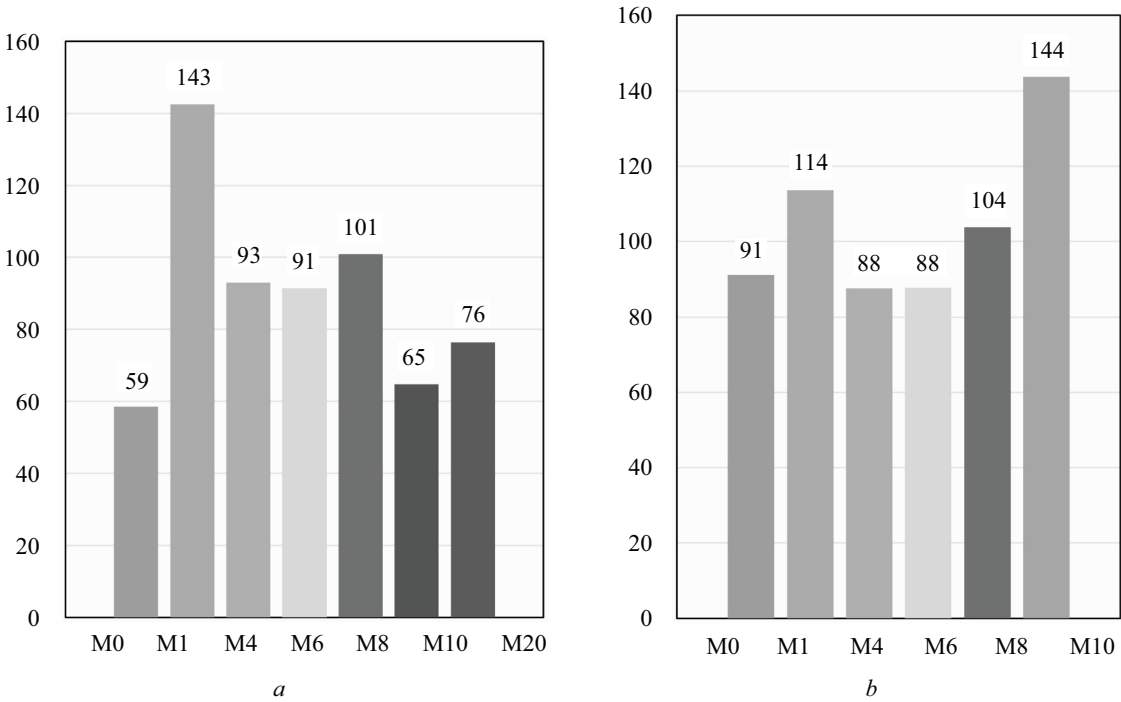


Рис. 2. Средний съем с поверхности мембраны (л/(ч·м²·бар)) при фильтрации водонефтяной эмульсии с использованием: а — машинного масла; б — керосина

Fig. 2. Permeability (LMH/bar) for oil-water emulsion filtration using: a — machine oil; b — kerosene

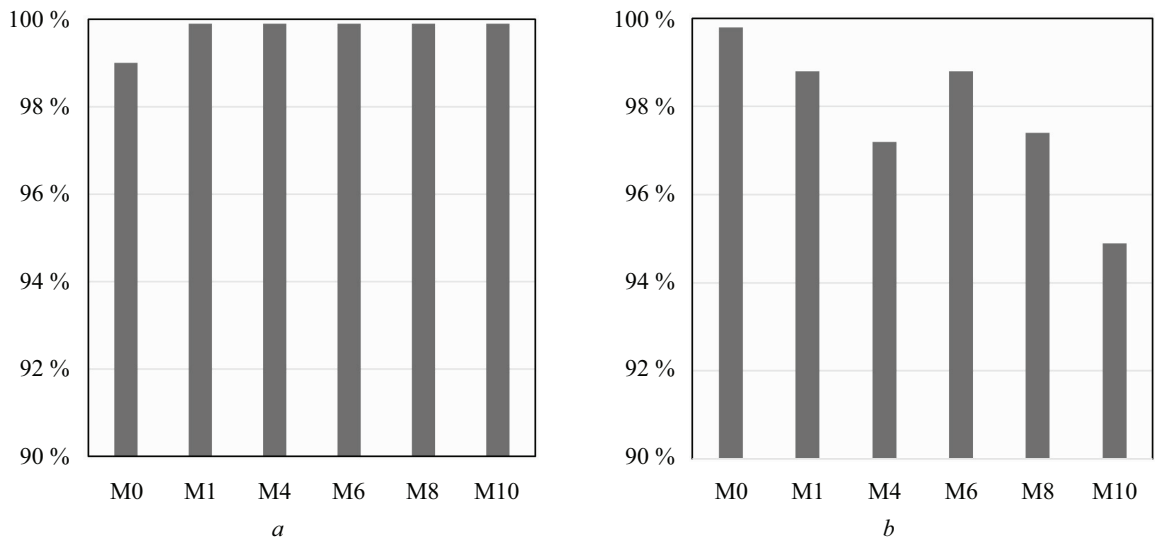


Рис. 3. Эффективность удаления нефтепродуктов, %: *a* — эмульсия с моторным маслом; *b* — эмульсия с керосином
Fig. 3. Oil product removal efficiency, %: *a* — emulsion with motor oil; *b* — emulsion with kerosene

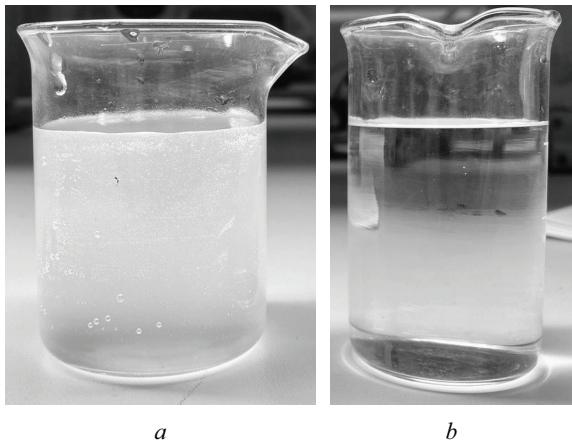


Рис. 4. Фото исходной эмульсии (*a*) и фильтрата (*b*)
Fig. 4. Photo of initial emulsion (*a*) and filtrate (*b*)

дификации ультрафильтрационной мембраны позволяет создать поверхностный гидрофильный слой, препятствующий сорбции нефтепродуктов, проведено сравнение степени восстановления потока после фильтрации эмульсий.

На основании полученных данных рассчитали коэффициент восстановления потока фильтрата FRR по формуле, представленной ранее. Величина коэффициента FRR позволяет определить устойчивость мембран к загрязнению нефтепродуктами в процессе фильтрации. На рис. 5 представлена информация по степени восстановления потока в режиме тупиковой фильтрации двух типов эмульсий.

Как видно из рис. 5, модифицированные мембраны продемонстрировали сравнительно высокие значения восстановления потока FRR: 73–91 %

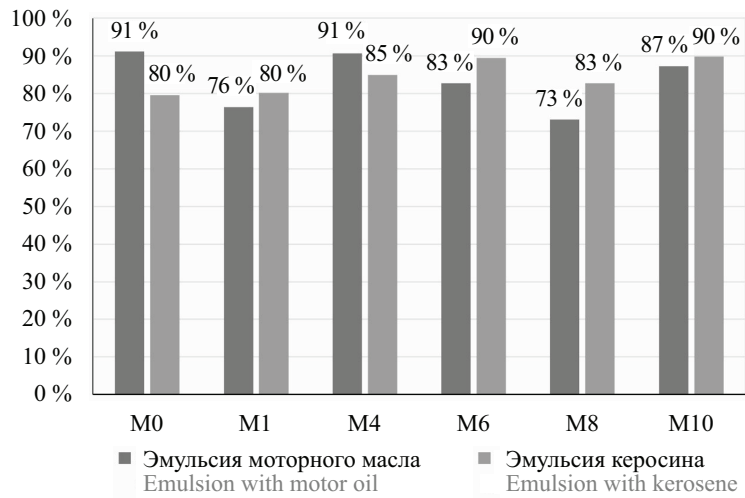


Рис. 5. Коэффициент восстановления потока фильтрата, %
Fig. 5. Flux recovery ratio FRR, %

при разделении эмульсии моторного масла; 80–91 % при разделении эмульсии керосина.

Для немодифицированной мембраны М0 удельная производительность восстанавливалась до высокого значения 91 и 80 % при разделении эмульсии моторного масла и керосина соответственно. В то же время удельная производительность немодифицированного образца М0 была значительно ниже, чем образцов М1–М10.

Удельная производительность модифицированных мембран снизилась лишь на 17–45 и 19–38 % при разделении эмульсии моторного масла и эмульсии керосина соответственно. Немодифицированный образец показал наибольшее снижение производительности со 179 до 59 л/(ч·м²·бар) (67 %) и со 179 до 89 л/(ч·м²·бар) (50 %) при разделении эмульсии моторного масла и эмульсии керосина соответственно.

Высокие значения степени восстановления потока для модифицированных мембран являются важной эксплуатационной характеристикой, которая может облегчить процесс очистки мембран, а также снизить периодичность их промывок.

Такое противообрастающее свойство и уменьшение склонности к образованию необратимых загрязнений модифицированных мембран объясняется гидратной оболочкой, образованной на поверхности мембраны, обогащенной карбоксильными группами. Результаты показывают, что производительность мембраны может быть восстановлена практически до первоначального значения с помо-

щью простого процесса обратной гидравлической промывки водой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе был опробован простой двухступенчатый метод для быстрого создания высокоэффективных гидрофильных мембран для разделения водонефтяных эмульсий. Этот метод включает осаждение ТК на поверхность мембраны PVDF путем окисления KMnO_4 .

Величина удельной производительности фильтра для модифицированных мембран увеличилась на 13–143 % при разделении эмульсий с моторным маслом, на 2–67 % при разделении эмульсии с керосином, до 143 л/(ч·м²·бар)). Также модификация поверхности оказала положительное влияние на эффективность очистки (%) для эмульсии моторного масла до 99,9 %; для эмульсии керосина в пределах 95–98 %.

Кроме того, карбоксильно обогащенная поверхность наделила мембрану противообрастающими свойствами FRR до 91 %. Такое противообрастающее свойство и уменьшение склонности к образованию необратимых загрязнений модифицированных мембран объясняется гидратной оболочкой, образованной на поверхности мембраны, обогащенной карбоксильными группами, имеет высокий потенциал для гидрофильной модификации, масштабирования и использования в крупномасштабных проектах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Bensadok K., Belkacem M., Nezzal G. Treatment of cutting oil/water emulsion by coupling coagulation and dissolved air flotation. *Desalination*. 2007; 206(1-3):440-448. DOI: 10.1016/j.desal.2006.02.070
2. Wang L., Zhang J., Wang S., Yu J., Hu W., Jiao F. Preparation of a polystyrene-based super-hydrophilic mesh and evaluation of its oil/water separation performance. *Journal of Membrane Science*. 2020; 597:117747. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.117747
3. Krebs T., Schroën C.G.P.H., Boom R.M. Separation kinetics of an oil-in-water emulsion under enhanced gravity. *Chemical Engineering Science*. 2012; 71:118-125. DOI: 10.1016/j.ces.2011.10.057
4. Sun Y., Zong Y., Yang N., Zhang N., Jiang B., Zhang L., Xiao X. Surface hydrophilic modification of PVDF membranes based on tannin and zwitterionic substance towards effective oil-in-water emulsion separation. *Separation and Purification Technology*. 2020; 234:116015. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116015
5. Nasrollahi N., Ghalamchi L., Vatanpour V., Khataee A., Yousefpour M. Novel polymeric additives in the preparation and modification of polymeric membranes : a comprehensive review. *Journal of Industrial*

- and Engineering Chemistry*. 2022; 109:100-124. DOI: 10.1016/j.jiec.2022.02.036
6. Deng Y., Zhang G., Bai R., Shen S., Zhou X., Wyman I. Fabrication of superhydrophilic and underwater superoleophobic membranes via an in situ crosslinking blend strategy for highly efficient oil/water emulsion separation. *Journal of Membrane Science*. 2019; 569:60-70. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.09.069
7. Sun Y., Lin Y., Fang L., Zhang L., Cheng L., Yoshioka T. et al. Facile development of poly(tetrafluoroethylene-r-vinylpyrrolidone) modified PVDF membrane with comprehensive antifouling property for highly-efficient challenging oil-in-water emulsions separation. *Journal of Membrane Science*. 2019; 584:161-172. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.04.071
8. Xu C., Yan F., Wang M., Yan H., Cui Z., Li J. et al. Fabrication of hyperbranched polyether demulsifier modified PVDF membrane for demulsification and separation of oil-in-water emulsion. *Journal of Membrane Science*. 2020; 602:117974. DOI: 10.1016/j.memsci.2020.117974
9. Tanudjaja H.J., Anantharaman A., Ng A.Q.Q., Ma Y., Tanis-Kanbur M.B., Zydny A.L. et al. A review

of membrane fouling by proteins in ultrafiltration and microfiltration. *Journal of Water Process Engineering*. 2022; 50:103294. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103294

10. Zhou Q., Zhao P., Xu R., Wang Z., Song W., Wang X. Porous graphene oxide surface-coated thin-film composite membrane for simultaneously increasing permeation performance and organic-fouling migration capacities. *Journal of Membrane Science*. 2022; 661:120942. DOI: 10.1016/j.memsci.2022.120942

11. El-badawy T., Othman M.H.D., Matsuura T., Bilad M.R., Adam M.R., Tai Z.S. et al. Progress in treatment of oilfield produced water using membrane distillation and potentials for beneficial re-use. *Separation and Purification Technology*. 2021; 278:119494. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119494

12. Valizadeh K., Heydarinasab A., Hosseini S.S., Bazgir S. Preparation of modified membrane of polyvinylidene fluoride (PVDF) and evaluation of anti-fouling features and high capability in water/oil emulsion separation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2021; 126:36-49. DOI: 10.1016/j.jtice.2021.07.018

13. Wang Z., Feng G., Yan Z., Li S., Xu M., Wang C. et al. Improving the hydrophilicity and antifouling performance of PVDF membranes via PEI amination and further poly (methyl vinyl ether-alt-maleic anhydride) modification. *Reactive and Functional Polymers*. 2023; 189:105610. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105610

14. Zhang X., He F., Yang Z., Xie M., Ren H., Wu D. et al. Engineering polyamide nanofiltration membrane with bifunctional terpolymer brushes for antifouling and antimicrobial properties. *Desalination*. 2023; 558:116642. DOI: 10.1016/j.desal.2023.116642

15. Wei C., Dai F., Lin L., An Z., He Y., Chen X. et al. Simplified and robust adhesive-free superhydrophobic SiO₂-decorated PVDF membranes for efficient oil/water separation. *Journal of Membrane Science*. 2018; 555:220-228. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.03.058

16. Zhu Y., Wang J., Zhang F., Gao S., Wang A., Fang W. et al. Zwitterionic Nanohydrogel Grafted PVDF Membranes with Comprehensive Antifouling Property and Superior Cycle Stability for Oil-in-Water Emulsion Separation. *Advanced Functional Materials*. 2018; 28(40). DOI: 10.1002/adfm.201804121

17. Yan L., Hong S., Li M.L., Li Y.S. Application of the Al₂O₃-PVDF nanocomposite tubular ultrafiltration (UF) membrane for oily wastewater treatment and its antifouling research. *Separation and Purification Technology*. 2009; 66(2):347-352. DOI: 10.1016/j.seppur.2008.12.015

18. Xu J., Xiong Q., Liu Q., Jiang Y., Yue X., Yang D. et al. Sustainable recycling of waste poly(vinylidene fluoride) and rational design of Janus membrane with superhydrophilic/hydrophobic asymmetric wettability for efficient separation of surfactant-stabilized water-in-

oil and oil-in-water emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024; 684:133237. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.133237

19. Wang D., Gao Y., Gao S., Huang H., Min F., Li Y. et al. Antifouling superhydrophilic porous glass membrane based on sulfobetaine prepared by thiol-ene click chemistry for high-efficiency oil/water separation. *Journal of Membrane Science*. 2023; 670:121336. DOI: 10.1016/j.memsci.2022.121336

20. Meng J., Zhang J., Shen X., Xie J., Liao Q., He F. et al. Bio-inspired surface engineering of hydrophobic membranes with nano-structured hydrogel toward viscous oil-in-water emulsion separation. *Chemical Engineering Journal*. 2023; 473:145519. DOI: 10.1016/j.cej.2023.145519

21. Abuhasheesh Y.H., Hegab H.M., Wadi V.S., Marzooqi F., Banat F., Aljundi I.H. et al. Phase inverted hydrophobic polyethersulfone/iron oxide-oleylamine ultrafiltration membranes for efficient water-in-oil emulsion separation. *Chemosphere*. 2023; 337:139431. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139431

22. Zhao X., Zhang R., Liu Y., He M., Su Y., Gao C. et al. Antifouling membrane surface construction: Chemistry plays a critical role. *Journal of Membrane Science*. 2018; 551:145-171. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.01.039

23. Lee H., Dellatore S., Miller W., Messersmith P. Mussel-Inspired Surface Chemistry for Multifunctional Coatings. *Science*. 2007; 318(5849):426-430. DOI: 10.1126/science.1147241

24. Ryu J.H., Messersmith P.B., Lee H. Polydopamine surface chemistry: A decade of discovery. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018; 10(9):7523-7540. DOI: 10.1021/acsami.7b19865

25. Li S., Wang X., Guo Y., Hu J., Lin S., Tu Y. et al. Recent advances on cellulose-based nanofiltration membranes and their applications in drinking water purification : a review. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 333:130171. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130171

26. Zhao J., Li D., Han H., Lin J., Yang J., Wang Q. et al. Hyperbranched zwitterionic polymer-functionalized underwater superoleophobic microfiltration membranes for oil-in-water emulsion separation. *Langmuir*. 2019; 35(7):2630-2638. DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b03231

27. Zhang X., Ma J., Zheng J., Dai R., Wang X., Wang Z. Recent advances in nature-inspired antifouling membranes for water purification. *Chemical Engineering Journal*. 2022; 432:134425 DOI: 10.1016/j.cej.2021.134425

28. Xia L., Hao Z., Vemuri B., Zhao S., Gadhamshetty V., Kilduff J.E. Improving antifouling properties of poly (ether sulfone) UF membranes with hydrophilic coatings of dopamine and poly(2-dimethylamino) ethyl methacrylate salt to enable water reuse. *Separation and Purification Technology*. 2022; 285:120300. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.120300

29. Pandya A.K., Vora L.K., Umeyor C., Surve D., Patel A., Biswas S. et al. Polymeric in situ forming depots for long-acting drug delivery systems. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2023; 200:115003. DOI: 10.1016/j.addr.2023.115003

30. Xu Y., Hu J., Hu J., Cheng Y., Chen X., Gu Z. et al. Bioinspired polydopamine hydrogels: Strategies and applications. *Progress in Polymer Science*. 2023; 146:101740. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2023.101740

31. Sileika T.S., Barrett D.G., Zhang R., Lau K.H.A., Messersmith P.B. Colorless multifunctional coatings inspired by polyphenols found in tea, chocolate, and wine. *Angewandte Chemie International Edition*. 2013; 52(41):10766-10770. DOI: 10.1002/anie.201304922

32. Kana N., Olivier-Archambaud S., Devic T., Lestriez B. Tannic acid as a binder and electronic

conductor precursor in silicon electrodes for Li-ion batteries. *Electrochemistry Communications*. 2023; 151:107495. DOI: 10.1016/j.elecom.2023.107495

33. Ong C., Shi Y., Chang J., Alduraiei F., Wehbe N., Ahmed Z. et al. Tannin-inspired robust fabrication of superwettability membranes for highly efficient separation of oil-in-water emulsions and immiscible oil/water mixtures. *Separation and Purification Technology*. 2019; 227:115657. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.05.099

34. Luo C., Liu Q. Oxidant-induced high-efficient mussel-inspired modification on pvdf membrane with superhydrophilicity and underwater superoleophobicity characteristics for oil/water separation. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017; 9(9):8297-8307. DOI: 10.1021/acsami.6b16206

Поступила в редакцию 10 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 19 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 21 мая 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Сергеевич Ильиных — ассистент, Институт строительства и архитектуры; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; Scopus: 57194202027; as_ilinykh@mail.ru;

Евгений Васильевич Мигалатий — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водного хозяйства и технологии воды, Институт строительства и архитектуры; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; Scopus: 57205164456; e.v.migalatiy@urfu.ru;

Александр Валерьевич Корнеев — магистрант, кафедра водного хозяйства и технологии воды, Институт строительства и архитектуры; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; korneev1998@gmail.com.

Вклад авторов:

Ильиных А.С. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, участие в разработке учебных программ и их реализации, написание исходного текста, итоговые выводы.

Мигалатий Е.В. — научное руководство, доработка текста, итоговые выводы.

Корнеев А.В. — участие в лабораторных испытаниях, развитие методологии, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Received February 10, 2024.

Adopted in revised form on February 19, 2024.

Approved for publication on May 21, 2024.

B I O N O T E S : Alexander S. Ilyinykh — assistant, Institute of Construction and Architecture; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU); 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; Scopus: 57194202027; as_ilinykh@mail.ru;

Evgeny V. Migalatiy — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Water Management and Water Technology, Institute of Construction and Architecture; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU); 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; Scopus: 57205164456; e.v.migalatiy@urfu.ru;

Alexander V. Korneev — master's student, Department of Water Management and Water Technology, Institute of Construction and Architecture; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU); 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; korneev1998@gmail.com.

Authors' contributions:

Alexander S. Ilyinykh — scientific guidance, research concept, development of methodology, participation in curriculum development and implementation, writing the original text, final conclusions.

Evgeny V. Migalatiy — scientific guidance, finalization of the text, final conclusions.

Alexander V. Korneev — participation in laboratory tests, development of methodology, finalization of the text.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05:004

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1373-1389

Методы проектирования рабочих операций в условиях внедрения цифровых технологий в строительстве

Ирина Викторовна Каракозова¹, Илья Михайлович Лисицын²,
Константин Владимирович Болдышев³

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

² ГСС Плюс; г. Москва, Россия;

³ Управляющая компания «Большая Шатура»; г. Шатура, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Техническое нормирование рабочих процессов заключается в хронометрировании рабочих операций и процессов в разбивке по фиксажным точкам и последующее проектирование оптимальных рабочих операций и процессов. Требуется проведение ряда сопоставимых по результирующей продукции и составу бригад замеров для различных строительных площадок и организаций. Крайне затруднена организация выездов специалистов на производственные площадки по причине незаинтересованности организаций и несогласованности действий по формированию целенаправленно организованных трудовых процессов. Проблема заключается в невозможности массовой фиксации процессов и актуализации норм. В современных реалиях создать стандартизированную государственную систему производственного нормирования для массового применения возможно только при коренном изменении процесса сбора и анализа информации. Предлагается создание центров моделирования, анализа и апробации моделей рабочих операций и процессов для производственной сферы.

Материалы и методы. Применены системный подход, общетеоретические методы познания (анализ, синтез, аналогия, обобщение, сопоставление, трансформация и др.).

Результаты. Для сбора и обработки данных рабочих операций в строительстве целесообразно использовать современные технологии, основанные на системах захвата движений и переноса сцены, в результате чего не требуется проводить несколько замеров, так как получаемая модель может быть отредактирована и дополнена в соответствии с оптимальным расположением людей, средств и предметов труда. Предложена концепция формирования автоматизированной технологической линии проектирования рабочих операций и процессов.

Выводы. Внедрение предлагаемого комплекса мер по созданию, ведению и сопровождению массовой системы производственного нормирования в строительстве будет способствовать формированию единого государственного стандарта системы производственного нормирования, сохранению технологий производства работ, ускорению процесса обучения приемам труда, созданию основы для роботизации производства и применения искусственного интеллекта в моделировании оптимальных технологических процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нормирование, нормативные наблюдения, захват движений, моделирование, организация рабочих мест, биомеханика, электронные технологические карты, строительная анимация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Каракозова И.В., Лисицын И.М., Болдышев К.В. Методы проектирования рабочих операций в условиях внедрения цифровых технологий в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1373–1389. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1373-1389

Автор, ответственный за переписку: Ирина Викторовна Каракозова, i.kar@inbox.ru.

Methods of designing work operations in the conditions of digital technologies implementation in the construction industry

Irina V. Karakozova¹, Ilya M. Lisitsyn², Konstantin V. Boldyshev³

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

² GSS Plus; Moscow, Russian Federation;

³ Management Company "Bolshaya Shatura"; Shatura, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Technical standardization of work processes consists of motion time study and processes by fixation points and subsequent design of optimal work operations and processes. It is required to carry out a number of measurements comparable in terms of the resulting products and the composition of the measurement teams for various construction sites and organizations. It is extremely difficult to organize visits of specialists to production sites due to the disinterest of organizations and inconsistency of actions to form purposefully organized labour processes. The problem is the impossibility

of mass recording of processes and updating of standards. In modern realities, creating a standardized state system of production regulation for mass application is possible only with a radical change in the process of collecting and analyzing information. It is proposed to create centres for modelling, analysis and testing of models of work operations and processes for the production sector.

Materials and methods. The system approach, general theoretical methods of cognition (analysis, synthesis, analogy, generalization, comparison, transformation and others) were applied.

Results. To collect and process data of work operations in construction, it is expedient to use modern technologies based on motion capture and scene transfer systems, as a result of which several measurements are not required, since the resulting model can be edited and supplemented in accordance with the optimal location of people and work equipment, objects of labour. The concept of forming an automated technological line for designing work operations and processes is proposed.

Conclusions. The introduction of the proposed set of measures for the creation, maintenance and support of the mass system of production norming in construction will contribute to the formation of a unified state standard of the system of production norming, preservation of work production technologies, acceleration of the process of training in labour techniques, creation of a basis for robotization of production and application of artificial intelligence in the modelling of optimal technological processes.

KEYWORDS: standardization, regulatory observations, motion capture, modelling, workplace organization, biomechanics, electronic technological maps, construction animation

FOR CITATION: Karakozova I.V., Lisitsyn I.M., Boldyshev K.V. Methods of designing work operations in the conditions of digital technologies implementation in the construction industry. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1373-1389. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1373-1389 (rus.).

Corresponding author: Irina V. Karakozova, i.kar@inbox.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Нормирование, предусматривающее установление плановой нормы потребления ресурсов, стало ключевым методом в планировании и учете затрат на производство. Имея ряд достоинств, и не лишенная недостатков, данная область деятельности естественно требуется в условиях ограниченных ресурсов и мобилизации производственных мощностей. Основная проблема заключается в постоянном поиске баланса между необходимыми или желаемыми затратами ресурсов и возможностями человека (человеческого организма и психики), как основного участника всех производительных процессов.

Предлагаемая в данной работе антропоцентрическая концепция нормирования подразумевает, в первую очередь, потребность сохранения технологий ручного труда, как вида деятельности в условиях ограниченных ресурсов, так как человек является универсальным производительным ресурсом. За рамками исследования остается решение вопроса о критерии выбора оптимальных норм, так как эта область — самостоятельная и зависит от целевого применения норм.

Объект исследования — процесс наблюдения, фиксации и нормализации рабочих приемов и операций с учетом достигнутого в настоящее время уровня развития техники и технологий.

Как было показано в работах [1–5] и приведено в Методике по разработке и применению усредненных производственных норм для города Москвы¹, первичные производственные нормы, а также разрабатываемые с их использованием местные, отраслевые и единые нормы и расценки, являются теми «кирпичиками», из которых проектируются смет-

ные нормы (элементные и укрупненные). Обслуживание государственной системы управления стоимостью массовых строительных программ невозможно без создания фундамента в виде территориально распределенной системы сбора и анализа результатов нормативных наблюдений и проектирования первичных производственных норм.

Назначение базы первичных производственных норм заключается в:

- подготовке к проведению новых нормативных наблюдений;
- анализе сопоставимых нормативных наблюдений по нескольким объектам и формировании обобщенных (типовых, местных, отраслевых, единых) производственных норм;
- обеспечении основы разработки и актуализации сметных норм и расценок в строительстве.

Электронная база первичных производственных норм необходима для аналитической работы при организации системы сбора нормативной информации, проведения новых нормативных наблюдений, а также обеспечения хранения и оперативного анализа полученных результатов при последующей разработке норм, рациональной организации технологического процесса расчета норм затрат труда и времени эксплуатации машин на отдельные виды (комплексы) работ и создания актуальной системы сметного нормирования ресурсов в строительстве. Сегодня компьютерные технологии позволяют оперативно накапливать результаты, полученные в период проведения нормативных наблюдений и формировать первичные производственные нормы, причем существует ряд современных технических и технологических решений, которые дают возможность делать это массово.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В современной технической литературе хронометраж (фр. *chronometrage*, от греч. *chronos* — время

¹ Методика по разработке и применению усредненных производственных норм для города Москвы МОС.04.01-002.2021 : утв. приказом Москомэкспертизы от 24.12.2021 № МКЭ-ОД/21-104.

и metreo — измеряю) определяют как метод технического нормирования для изучения затрат времени с помощью фиксации состава, последовательности и замеров продолжительности выполняемых действий. Проведение нормативных наблюдений заключается в хронометрировании рабочих операций в разбивке по фиксационным точкам.

Начало применения хронометража относится ко второй половине XIX в. и описано в работах Фредерика Уинслоу Тейлора, Генри Форда, Генри Лоуренса Ганта, Морриса Л. Кука, Карла Еарта, Фрэнка и Лилиан Гилбрет.

Изучение рабочего времени наблюдением составляет основу нормирования. Хронометраж стал мощным инструментом для установления выработки и контроля выполнения работ; он превратился в метод нормирования, но представляет собой метод наблюдения (фиксации процесса). Хронометраж отождествляется с техническим нормированием, но по своей сути, он зависит от существующей постановки рабочего процесса в производстве и от добротности этой постановки будет зависеть и качество реконструируемой рабочей операции [6]. Также фотоучет и фотография рабочего дня определяются в литературе, как методы, но представляют собой форму записи информации, получаемой при наблюдении за производственным процессом, в том числе с помощью хронометража. В любом случае для выполнения наблюдений и замеров необходимы специально подготовленная площадка и организованный процесс. Требуется проведение нескольких замеров на различных площадках для получения усредненных данных.

В табл. 1 на основе руководящих документов по проектированию трудовых процессов^{2, 3, 4, 5} приведены достоинства и недостатки форм фиксации трудовых процессов.

Вопросы теории и методологии нормирования труда представлены в трудах отечественных ученых: А.К. Гастева, А.Г. Спаха, Н.А. Бернштейна, С.В. Башинского, О.А. Ерманского, А.А. Богданова, В.М. Иоффе, Б.М. Генкина, И.А. Либермана, А.И. Рофе, Ю.Г. Одегова, К.В. Антонова, В.Б. Бычина, В.И. Фильева, А.П. Павленко, В.П. Пашу-

то, А.Ф. Зубковой, О.Н. Кузиной, А.С. Павлова, Н.В. Лазаревой, Р.П. Миусковой и др.

К общим недостаткам форм фиксации трудовых (рабочих) процессов следует отнести:

- потребность в предварительном изучении процесса и последующем создании сценарного плана;
- потребность в организации процесса, рабочих на площадке и построении «идеального» процесса;
- отсутствие возможности оперативно исключать нерациональные приемы труда;
- необходимость ручного распознавания фиксационных точек;
- потребность наблюдения нескольких сопоставимых процессов.

Целью технического нормирования является установление технически обоснованных производственных норм на основе рационально построенных технологических процессов в определенных производственных условиях, что возможно путем исследования существующей организации труда, технологических процессов и проведения мероприятий, устраняющих недостатки производства и потери рабочего времени.

Основная формула технического нормирования заключается в следующей последовательности «фиксация – анализ – синтез – апробация». Задача такой модели технического нормирования — конструирование рабочего процесса. В этом случае под *техническим нормированием* следует понимать *изучение, проектирование и установление нормального состава и содержания рабочего процесса во времени и пространстве* [6–8].

При проектировании нормалей процессов применяются расчетно-аналитические методы, основанные на обработке опытно-статистической информации. На основе методических материалов^{6, 7}, а также по данным публикаций [9–12] настоящим прорывом можно было бы считать появление микроэлементного нормирования — проектирование рабочих процессов на основе разработанных микроэлементов (норм времени рабочих движений и приемов). Тем не менее это направление имеет ряд недостатков, к которым следует отнести трудоемкость процесса, необходимость владения системами микроэлементного нормирования, обязательную видеофиксацию, использование идеальной площадки и др.

Опытно-экспериментальная постановка рациональных операций заключается в проверке в производственных условиях этих операций, установлении необходимых дополнений или изменений в процесс. Для внедрения в производство вновь спроектиро-

² Руководство по проектированию высокопроизводительных трудовых процессов строительного производства. Выпуск 1. Основные положения. М. : Стройиздат, 1978. 32 с.

³ Руководство по проектированию высокопроизводительных трудовых процессов строительного производства. Выпуск 2. Проектирование и организация рабочих мест. М. : Стройиздат, 1982. 26 с.

⁴ Руководство по проектированию высокопроизводительных трудовых процессов строительного производства. Выпуск 3. Проектирование приемов труда. М. : Стройиздат, 1981. 41 с.

⁵ Рекомендации по составлению карт трудовых процессов строительного производства. М. : Стройиздат, 1983, 22 с.

⁶ Базовая система микроэлементных нормативов времени (БСМ-1) : методические и нормативные материалы. М. : НИИ труда. 1982. С. 2–5.

⁷ Базовая система микроэлементных нормативов времени (БСМ-1) : методические и нормативные материалы. М. : Экономика, 1989. С. 129.

Табл. 1. Достоинства и недостатки форм фиксации трудовых процессов

Table. 1. Advantages and disadvantages of forms of recording labour processes

Форма записи (фиксации) Record type (fixation)	Достоинства Advantages	Недостатки Disadvantages
Фотоучет Photo accounting	Фиксируется состав, время и продолжительность приемов и операций The composition, time and duration of appointments and operations are recorded.	Отсутствует наглядное представление процесса, возможны ошибки в записи информации, сложность распознавания данных There is no visual representation of the process, errors in recording information are possible, difficulty in recognizing data
Фотосъемка Photography	Фиксируется расположение объектов процесса The location of process objects is fixed	Отсутствуют данные по времени производства работ No data on work completion time
Видеосъемка (ранее киносъемка) Videography (formerly filming)	Запись продолжительности процесса, наглядное представление процесса Recording process duration, visualizing the process	Сложность установки аппаратуры, присутствуют скрытые от наблюдения зоны, сложность формирования данных для анализа Difficulty in installing equipment, there are areas hidden from observation, difficulty in generating data for analysis

ванных процессов разрабатывались и применялись различные документы и наглядные пособия — технологические карты, типовые проекты рабочих мест, инструкции, плакаты и др.

В период массового внедрения в производство передовых методов и приемов труда с середины 1950-х до начала 1990-х гг. активно разрабатывались и внедрялись карты трудовых процессов и нормокомплекты инструментов, предназначенные для обеспечения производителей работ инструментом и наглядными пособиями по производству работ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существует ряд проблемных вопросов при организации нормирования на производстве в настоящее время (табл. 2), которые раньше решались с помощью установления сети центров нормирования (ранее — научно-исследовательские станции

(НИС)) и директивными указаниями и приказами профильных министерств и ведомств.

Ввиду сложности организации сетевой структуры, подобной ранее существующей, в современных условиях с учетом развития средств автоматизации возможно создать централизованную площадку сбора, анализа и моделирования данных — системную лабораторию технического нормирования. То, что раньше решалось сетевыми структурами и коллективами сейчас может осуществляться техническими средствами и алгоритмами обработки данных. Предлагается создание центров моделирования, анализа и апробации моделей рабочих операций и процессов для любой производственной сферы, состоящих из специализированных лабораторий, постоянно действующих площадок производственного нормирования (полигонов) и применения современных технологий фиксации

Табл. 2. Современные проблемы проведения нормативных наблюдений на производстве

Table. 2. Modern problems of conducting regulatory observations in production

Организационные проблемы Organizational problems	Субъективные проблемы Subjective problems	Юридические проблемы Legal problems
Отсутствие у заказчика (заявителя) действующих объектов для проведения хронометражных наблюдений с целью разработки расценок. Особенно это характерно для инновационных материалов и технологий The customer (applicant) does not have the ability to develop prices for existing facilities to conduct time-lapse observations for developing prices. This is especially true for innovative materials and technologies	Увеличение технологичности ведет к уменьшению затрат труда, что способствует уменьшению заработной платы и соответственно величины накладных расходов и сметной прибыли, что в целом приводит к уменьшению сметной стоимости объекта строительства, что негативно сказывается на желании заказчиков (заявителей) The increase in manufacturability leads to a reduction in labour costs, which contributes to a reduction in wages and, accordingly, the amount of overhead costs and estimated profit, which generally leads to a reduction in the estimated cost of the construction project, which negatively affects the desire of customers (applicants)	Незаинтересованность производителей работ Lack of interest from work producers

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Организационные проблемы Organizational problems	Субъективные проблемы Subjective problems	Юридические проблемы Legal problems
Сложность учета при хронометражных наблюдениях мелких или поточных операций, на которых рабочие, выполняющие такие операции, не готовы останавливаться для правильной фиксации работ The difficulty of accounting for time-keeping observations of small or continuous operations, in which the workers performing these operations are not ready to stop to record the work correctly	Нежелание заказчика показывать стройплощадку по причине имеющихся место нарушений по технике безопасности, нарушений организации площадки, наличие низкоквалифицированного персонала и др. Reluctance of the customer to show the construction site due to existing safety violations, violations of site organization, the presence of low-skilled personnel, etc.	Боязнь ответственности Fear of responsibility
Многопоточная организация труда, при которой физически невозможно правильно зафиксировать все нюансы технологии, например, сверление отверстий, резку конструкций, подготовку технических растворов и работу с ними и др. Multi-threaded organization of work, in which it is physically impossible to record all the nuances of the technology correctly, for example, drilling holes, cutting structures, preparing technical solutions and working with them, etc.	Непонимание необходимости проведения наблюдений Lack of understanding of the need to conduct observations	Отсутствие материального стимулирования проведения нормативной работы Lack of financial incentives for regulatory work
Отсутствие рационально организованных процессов работ Lack of rationally organized work processes	Боязнь видеофиксации процесса Fear of video recording of the process	Отсутствие законодательной базы в области производственного нормирования процессов и внедрения передовых норм труда Lack of a legislative framework in the field of industrial standardization of processes and the introduction of advanced labour standards

и моделирования рабочих процессов, оснащенных необходимыми техническими средствами фиксации строительных процессов и специализированным программным обеспечением (ПО) для моделирования отдельных операций и процессов, сложных или трудоемких для натурного наблюдения.

Концепция современной системы нормирования расхода ресурсов в строительстве заключается в адаптации всех видов обеспечения процесса проектирования норм расхода ресурсов для создания технологической линии автоматизированного проектирования норм затрат строительных ресурсов (трудовых, технических, материальных). Цели, задачи, а также предполагаемые результаты внедрения такой системы нормирования приведены в табл. 3.

Технологическая линия проектирования затрат ресурсов (ТЛПЗр) — неразрывная проектно-технологическая последовательность (фаза) обработки данных в процессе проектирования затрат ресурсов с применением прикладных программ и вспомогательных средств с обеспечением возможности контроля и изменения данных (рис. 1).

Актуальная концепция нормирования затрат труда и расхода ресурсов состоит в том, чтобы заменить проект сметного норматива на анимированную информационную модель процесса на основе технологии переноса сцены. Основная задача — переход к современным методам наблюдения, фиксации и проектирования трудовых процессов с целью повышения производительности труда и формирования опытной базы трудовых приемов для обучения сотрудников.

В результате построения ТЛПЗр реализуется применение новейших технологий сбора и обработки данных, основанных на системах захвата движений и переноса сцены, в результате чего не требуется проводить несколько замеров, так как получаемая модель может быть отредактирована и дополнена в соответствии с оптимальным расположением людей, инструмента, предметов труда.

Проблема фиксации технологических операций и процессов посредством видеозахвата и воспроизведение движений с целью последующего обучения работников была предметом изучения на-

Табл. 3. Описание современной системы нормирования расхода ресурсов в строительстве
Table. 3. Description of the modern system of rationing resource consumption in construction

Компоненты системы System components	Описание Description
Цели системы The goals of the system	- Ускорение процесса нормирования рабочих операций; - обезличивание нормативных наблюдений технологического процесса; - обеспечение объективности нормирования; - хранение банка данных технологий производства работ; - тиражирование технологии производства работ; - ускорение процесса обучения приемам труда (внедрению технологий); - создание основы для роботизации производства; - повышение уровня безопасности труда - Speeding up the process of rationing work operations; - depersonalization of regulatory observations of the technological process; - ensuring the objectivity of rationing; - storage of the data bank of work production technologies; - replication of work production technology; - acceleration of the learning process of labour techniques (technology implementation); - creating the basis for the robotization of production; - improving the level of occupational safety
Задачи системы Tasks of the system	- Одномоментная фиксация процесса в цифровом виде; - исключение дискретности замеров по процессу; - многоканальная фиксация данных; - обеспечение моделирования всей сцены (системы, площадки); - оптимизация процесса - Simultaneous recording of the process in digital form; - exclusion of discreteness of measurements in the process; - multi — channel data capture; - providing simulation of the entire scene (system, site); - process optimization
Принципы работы Principles of operation	- Скорость, адаптивность, многоканальность, достаточность - Speed, adaptability, multi-channel, sufficiency
Методы работы Working methods	- Фиксация, анализ, расчет, моделирование - Fixation, analysis, calculation, modelling
Результаты Results	- Снижение себестоимости продукции или услуг; - создание цифровых технологических карт; - сохранение полученных знаний и опыта работы — создание виртуальных инструкций; - создание внутренней экспертной среды предприятий по применению и тиражированию инструментов бережливого производства; - создание единого стандарта системы производственного нормирования - Reduction of the cost of products or services; - creation of digital technological maps; - preservation of acquired knowledge and work experience — creation of virtual instructions; - creation of an internal expert environment of enterprises for the application and replication of lean production tools; - creation of a single standard for the production rationing system

учной организации труда, разрабатываемой в СССР в середине XX в. Требовалось изучить рабочие движения лучших представителей пролетариата, чтобы в последующем массово внедрить их в практическое применение на производстве. Эта тематика разрабатывалась в Москве Центральным институтом труда (ЦИТ) под руководством Н.А. Бернштейна, основателя научного направления биомеханики, в том числе с разработкой и применением средств захвата движений: маркерных костюмов и рапидной (ускоренной) киносъемки для построения и анализа циклограммы движений [13, 14].

Захват движения (англ. motion capture) — это метод анимации персонажей и объектов, при котором анимация создается не вручную, а путем оцифровки (видеозаписи с помощью специальных датчиков) движений реального объекта (прежде всего, человека) и последующего переноса их на трехмерную модель. Модель сцены редактируема в отличие от видеозаписи. Такая модель позволяет решать задачи:

- определения сложности работ;
- учета факторов влияния;
- анализа графика (циклограммы) движений частей тела;

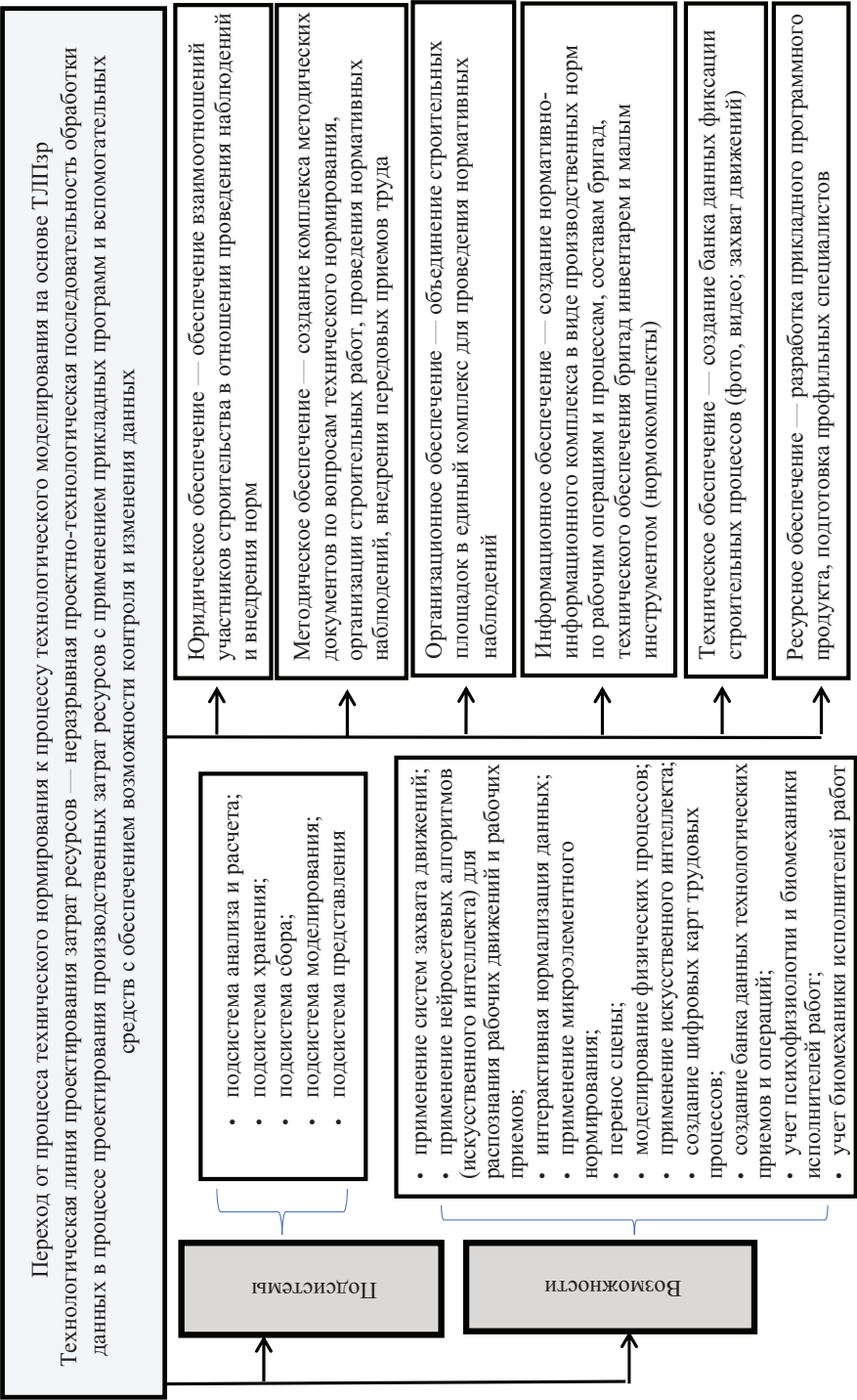
- фиксации навыков конкретных рабочих;
- нормирования расхода ресурсов;
- оптимизации производственных процессов;
- сохранения и оптимизации технологии производства работ;
- формирования базы микроэлементного нормирования;
- применения искусственного интеллекта (ИИ) для оптимизации рабочих приемов.

К результатам при создании технологической линии автоматизированного проектирования затрат строительных ресурсов следует также отнести соз-

дание внутренней экспертной среды предприятий по применению и тиражированию инструментов бережливого производства.

С начала 2010-х гг. происходит динамичное развитие систем захвата движений. Ускоренное развитие подобных систем осуществляется с 2017 г., когда были отработаны алгоритмы обработки данных и устранены основные помехи датчиков. Основное направление — анализ эргономики рабочих мест, медицина, спорт, охранные системы, робототехника [15, 16].

В настоящее время существуют следующие виды систем захвата движений: маркерные, без-



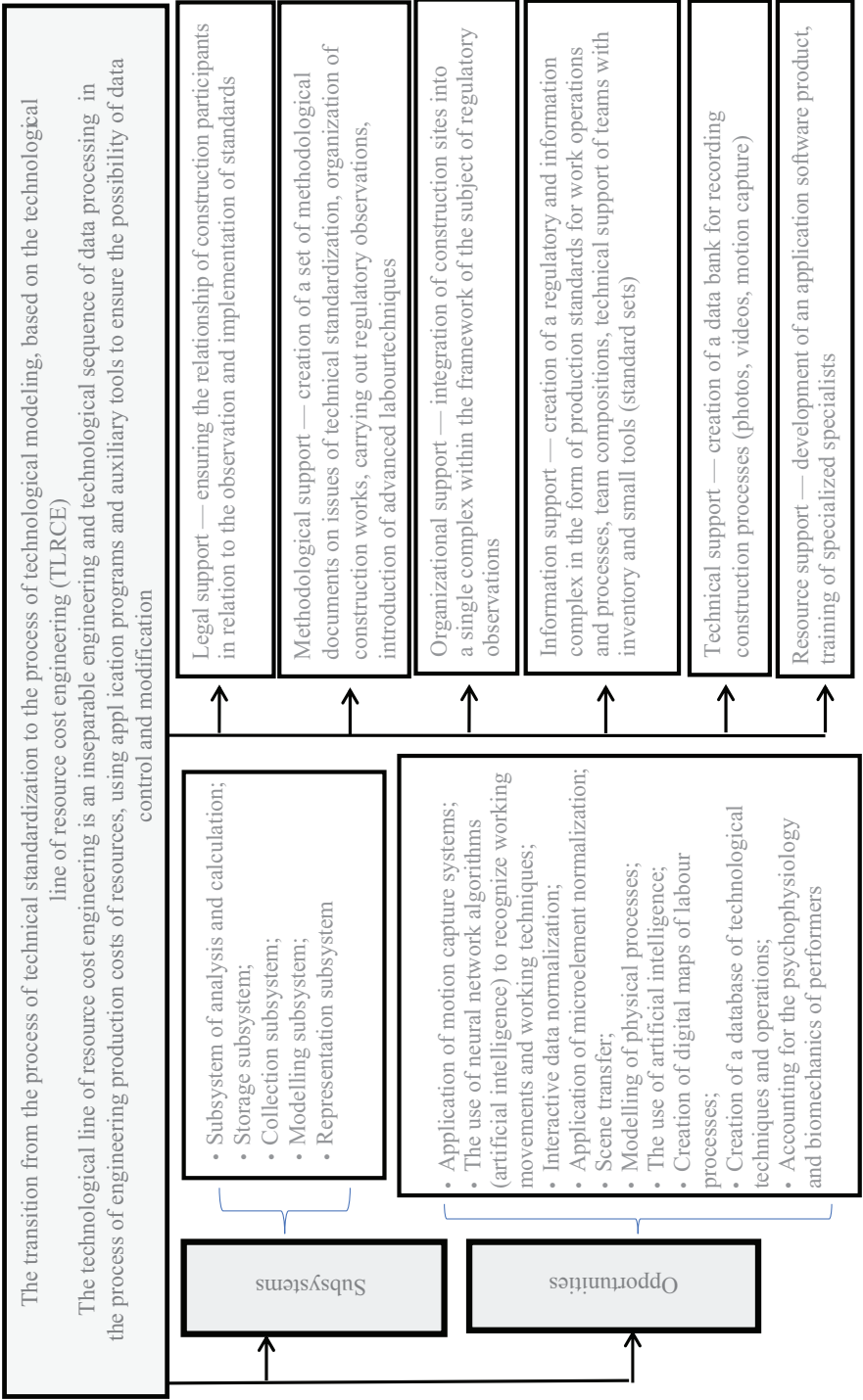


Рис. 1. Концепция создания технологической линии автоматизированного проектирования затрат строительных ресурсов
Fig. 1. The concept of creating a technological line for computer-aided design of construction resource costs

маркерные, оптические, магнитные, механические, гироскопические/инерциальные.

Оптимальным выбором для фиксации и последующей обработки данных нормативных наблюдений в строительном производстве являются гироскопические/инерциальные системы, которые для сбора информации о движении используют миниатюрные гироскопы и инерциальные сенсоры, расположенные на теле человека — также, как и маркеры или магниты в других системах. Данные с гироскопов и сенсо-

ров передаются в компьютер, где происходит их обработка и запись. Система определяет не только положение сенсора, но также угол его наклона.

В 2010–2015 гг. происходит революционное развитие в создании компактных IMU-датчиков для различных целей применения. Инерциальные измерительные модули (Inertial Measurement Unit — IMU) основаны на многоосевой комбинации высокостабильных гироскопов, акселерометров, магнетометров и датчиков давления.



Рис. 2. Схема размещения датчиков и пример работы системы Perception Neuron^{8,9}
Fig. 2. The layout of the sensors and an example of the Perception Neuron system^{8,9}

Каждый сенсор — автономный портативный прибор, который включает в себя три вида пространственных датчиков движения (акселерометр, гироскоп и магнитометр). Датчики позволяют регистрировать различные параметры движения (кинематические, временные, пространственные, комбинированные) в любых сегментах тела человека. IMU обеспечивают возможность переноса в виртуальную среду движений человека (животных), предметов в пространстве, рабочих органов машин и механизмов.

Инерциальный костюм захвата движений (mo-cap suit) — это носимое устройство, которое записывает движения тела пользователя. Используя миниатюрные IMU-датчики, можно с высокой точностью считывать положение каждой точки на теле человека (рис. 2).

Инерциальный костюм захвата движений служит единой платформой для создания разнообразных естественных интерфейсов по причине модульности

системы. Получая весь объем данных, возможно выявлять зависимости отдельно на каждой руке или ноге, зависимости между друг другом или во всем «каркасе» тела человека в целом^{10, 11} [15, 16].

К достоинствам применения такого костюма относятся легкость применения, мобильность, отсутствие стесненности движений, передача движения в пространстве. Однако при его использовании возникает воздействие магнитных полей, что следует отнести к недостаткам. Наиболее известными фирмами-производителями инерциальных систем (костюмов) захвата движений являются Noitom, Xsens, Rokoko, Manus. Последовательность действий в процессе записи движений приведена в табл. 4.

⁸ URL: <https://noitom.com/>

⁹ URL: <https://neuronmocap.com/>

¹⁰ Комплекс Биомеханика // Neurocor. URL: <https://neurocor.ru/products/sport/biomexanika-biokinekt>

¹¹ Обзор возможностей Perception Neuron. 2016. URL: <https://spark.ru/startup/finch-vr/blog/14996/obzor-vozmozhnostej-perception-neuron>

Табл. 4. Последовательность и продолжительность действий в процессе записи
Table. 4. The sequence and duration of labour actions during the recording process

Наименование процесса Process name	Продолжительность выполнения Execution duration	Примечание Note
Надевание костюма или крепление датчиков Putting on a suit or attaching sensors	10–15 мин 10–15 min	—
Подключение костюма Connecting the suit	1 мин 1 min	—
Калибровка датчиков Sensor calibration	30 с 30 s	—
Начало записи Start recording	Запись может производиться длительное время, зависит от мощности компьютера Recording can take a long time, depending on the power of the computer	Записи различных операций производятся последовательно. Возможность подключения нескольких костюмов (систем) одновременно Records of various transactions are made sequentially. Ability to connect several suits (systems) simultaneously
Окончание записи End of recording	Сохранение данных в зависимости от объема 10–40 с Saving data depending on the volume of 10–40 s	

Эти устройства в совокупности с ПО позволяют получать полную функциональную информацию в виде графического отчета. Технология захвата движений, основанная на применении IMU-датчиков, позволяет исследователям получать данные дистанционно, производить измерения при работе на высоте, в условиях ограниченного пространства или в опасных условиях труда, значительно улучшая эргономический анализ рабочего места и, в частности, оценку тяжести труда¹² [17, 18].

Достоинства и недостатки технологии захвата движений для задач технического нормирования приведены в табл. 5.

Такой подход помогает расширить сферу применения технологии захвата движений со стационарных подготовленных мест с видеокамерами

¹² Система Perception Neuron сделает процесс motion capture намного проще и дешевле. URL: <https://overclockers.ru/blog/letsplay/show/85009/sistema-perception-neuron-sdelaet-process-motion-capture-namnogo-prosche-i-deshevle>

к захвату движений конкретных людей без привязки к их местоположению. Так же это позволяет снизить хранимый поток информации, так как оцифровка каркаса движения производится датчиками на местах без передачи видеопотока.

Движение каждого датчика в пространстве фиксируется отдельно путем записи его угловых перемещений в пространстве. С помощью датчиков производится формирование кинематической схемы (модели) и определение графиков движения элементов тела человека. Каждый датчик привязан к элементу тела человека. Движение датчика представляется графиком (в графической форме). График поддается редактированию, сглаживанию вершин (экстремумов), что дает возможность убирать спонтанные движения, неточности замеров (артефакты) или лишние действия.

В процессе записи движений человека формируется трехмерная (пространственная) модель перемещения тела человека в пространстве (в отличие от видеозаписи данная модель поддается ре-

Табл. 5. Достоинства и недостатки применения инерциальных костюмов захвата движений

Table. 5. Advantages and disadvantages of using inertial motion capture suits

Достоинства Advantages	Недостатки Disadvantages
Оперативный хронометраж и разбивка фиксажных точек Operational timing and breakdown of fixing points	Ресурсоемко в отношении компьютерных мощностей и объема хранения данных Resource-intensive in terms of computer power and data storage capacity
Возможность склейки движений Possibility of stitching movements	Требует освоения специалистами-разработчиками Requires mastering by specialist developers
Возможность применения микроэлементного нормирования Possibility of using microelement rationing	Требуются датчики с электромагнитной защитой Requires sensors with electromagnetic protection
Достаточность проведения фиксации одного процесса с последующей оптимизацией данных Sufficiency of recording one process with subsequent data optimization	Относительно дорого, требуется специальное оборудование Relatively expensive, requires special equipment
Пространственная модель движений Spatial movement pattern	—
Редактирование движений и их оптимизация Editing and optimizing movements	—
Моделирование инструментов и предметов труда Modelling of tools and work items	—
Анализ биомеханики движений Analysis of biomechanics of movements	—
Учет антропометрических параметров исполнителей работ Accounting for anthropometric parameters of work performers	—
Фиксация и анализ биоритмов и физического состояния исполнителей Recording and analysis of biorhythms and physical condition of performers	—
Создание виртуальных инструкций Creating virtual instructions	—
Многовариантная проработка процесса Multivariate process development	—
Создание базы данных для обеспечения роботизированного производства Creation of a database to support robotic production	—

дактированию во времени и пространстве). В полученную модель в зависимости от фиксажных точек возможно добавление предметов и средств труда в привязке к элементам тела человека по времени, а также можно производить склейку нескольких ранее записанных приемов труда для получения полноценной рабочей операции (рис. 3).

Формат файлов движения и жестов сегодня широко используется во многих приложениях, которые работают с сигналами движения и жестов. Это касается таких областей, как захват движения, анимация персонажей, анализ жестов, биомеханика, интерфейсы музыкальных жестов, виртуальная хирургия. Эти форматы являются низкоуровневыми форматами, т.е. форматами, близкими к сигналу, производимому системой захвата: XML, BVH, ASK/SDL, MNM, MVNX, RAW, AOA, ASF/AMC, BRD, GRC, HTR и GTR, FBX.

Обсуждая вопрос моделирования движений человека, необходимо провести четкую дифференциацию между понятиями о расчетных моделях анализа и моделях синтеза движений и приемов. Перспективное расширение возможностей цифровых (компьютерных) технологий позволяет на основе математических моделей синтеза движений конструировать технику рабочих приемов и операций с заранее заданными свойствами. В процессе выполнения рабочих приемов изменяется биомеханическое состояние опорно-двигательного аппарата тела человека. Для количественной оценки этих изменений используют биомеханические характеристики движений, заключающиеся в двух больших группах показателей движения: кинематические и динамические. Кинематические характеристики описывают геометрический рисунок действий в пространстве и времени, основываясь на котором осуществляют кинематический анализ техники ра-

бочих движений, состоящий в определении положений звеньев тела человека в процессе выполнения движений, включая определенные траектории отдельных точек тела, скоростей и ускорений звеньев тела и его отдельных точек, времени проведения отдельных фаз и всех движений или приемов в целом. Но кинематический анализ не объясняет причин возникновения и изменений движений, для этого производится динамический анализ техники движений с учетом внешних факторов, который заключается в определении силовых, инерционных и энергетических характеристиках рабочих приемов с объяснением причин возникновения и изменений движений¹³ [13, 19–25]. Поэтому, помимо фиксации рабочих действий, современная форма фиксации наблюдаемого процесса должна предусматривать также автоматическую фиксацию всех доступных факторов влияния на рабочий процесс, прежде всего, на труд непосредственных исполнителей процесса. Такой подход подразумевает необходимость фиксации психофизиологических факторов влияния на труд людей, что требует определенного подхода к классификации функций труда. Предлагается следующая функциональная классификация труда для его нормирования с позиций многофакторного анализа при моделировании, приведенная в табл. 6.

Только при такой классификации труда [26–28] и с применением современных технических средств фиксации процессов возможно добиться получения модели, максимально идентичной реальному трудовому процессу (цифровой двойник). В процессе обработки сцены, полученной с помощью техно-

¹³ Разработано дешевое устройство для изучения мозговой активности // ТАСС. 2022. URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/13469495>

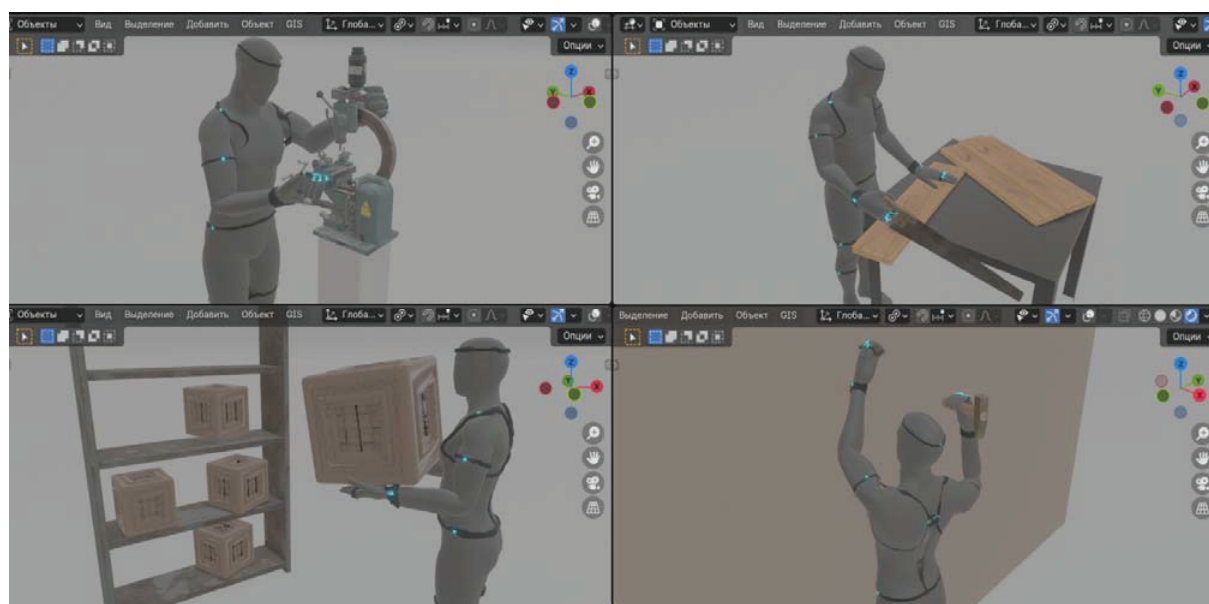


Рис. 3. Пример анимационной сцены, выполненной в Blender

Fig. 3. An example of an animated scene made in Blender

Табл. 6 Функциональная классификация труда

Table. 6. Functional classification of labour

Вид труда Type of labour	Описание Description	Тип фиксации Fixation type
Действительный Valid	Труд, связанный с изменением положения тела человека в пространстве Labour associated with changing the position of the human body in space	Фотоучет, фотофиксация, видеофиксация, захват движений, перенос сцены Photo recording, photo recording, video recording, motion capture, scene transfer
Мыслительный Thoughtful	Труд, связанный с мыслительным процессом центральной нервной системы Labour associated with the thinking process of the central nervous system	Электроэнцефалограмма мозговой активности Electroencephalogram of brain activity
Вербальный Verbal	Труд, связанный с передачей информации посредством речи Work related to the transmission of information through speech	Запись рабочих переговоров Recording work negotiations
Перцептивный Perceptual	Труд, связанный с восприятием органов чувств человека (в первую очередь, зрение и слух) различных раздражителей Work associated with the perception of human sensory organs (primarily vision and hearing) of various stimuli	Запись данных с датчиков: шум, освещенность, окружающая температура, влажность, загрязненность воздуха, а также с носимых датчиков: сердечный ритм, давление, температура тела, тонус, потеря калорий и т.д. Recording data from sensors: noise, light, ambient temperature, humidity, air pollution, as well as from wearable sensors: heart rate, pressure, body temperature, tone, caloric loss, etc.

логий переноса сцены при человеко-машинном взаимодействии, лицо, принимающее решения (ЛПР), решает задачу построения оптимального процесса на основе имеющейся записи некоего реального процесса, а также с помощью банка данных вспомогательных моделей и справочной информации. Требуется изменение методологии нормирования. Новая методология нормирования трудовых про-

цессов базируется не на обработке и усреднении статистических данных, а на моделировании и экспертном принятии решений. Также предлагается изменение подхода к хранению информации по рабочим приемам, операциям, процессам таким образом, чтобы представлялось возможным сформировать структуру данных цифровой технологической карты рабочей операции или процесса (табл. 7).

Табл. 7. Примерная структура данных цифровой технологической карты рабочей операции или процесса

Table. 7. Approximate data structure of a digital flow sheet for a work operation or process

Категория Category	Тип данных и их описание Data type and description
Объект Object	Работа (операция, процесс) (вид, наименование) Work (operation, process) (type, name)
	Продукция (вид, наименование (результат), требования к качеству, допуски)) Products (type, name (result), quality requirements, tolerances))
	Работы предшествующие (перечень, степень готовности, требования к качеству (допуски)) Previous works (list, degree of readiness, quality requirements (tolerances))
	Работы сопутствующие (перечень, требования к качеству (допуски)) Related works (list, quality requirements (tolerances))
	Работы последующие (перечень, требования к качеству (допуски)) Subsequent works (list, quality requirements (tolerances))
	Условия производства работ (район, адрес, сезон, время суток, уровень естественного освещения, температура воздуха, влажность, атмосферное давление, сила ветра, осадки, шум, загрязненность воздуха, инсоляция и др.) Conditions of work (region, address, season, time of day, level of natural light, air temperature, humidity, atmospheric pressure, wind force, precipitation, noise, air pollution, insolation, etc.)
Ресурсы Resources	Характеристика исполнителей (количество, возраст, уровень образования, квалификация, физическое состояние и др.) Characteristics of performers (number, age, level of education, qualifications, physical condition, etc.)

Окончание табл. 7 / End of the Table 7

Категория Category	Тип данных и их описание Data type and description
Ресурсы Resources	Безопасность производства работ (одежда, средства индивидуальной защиты, страховочные приспособления и др.) Work safety (clothing, personal protective equipment, safety devices, etc.)
	Инструмент, инвентарь (перечень, описание состояния и др.) Tools, inventory (list, description of condition, etc.)
	Приспособления (перечень, описание состояния и др.) Devices (list, description of condition, etc.)
	Машины и механизмы (перечень, технические характеристики, подтверждающие документы (паспорта и др.), степень готовности к работе)) Machines and mechanisms (list, technical characteristics, supporting documents (passports, etc.), degree of readiness for work))
	Материалы, изделия и конструкции (перечень, технические характеристики, подтверждающие документы (паспорта, сертификаты и др.), показатель потребности в ресурсе (нормативный, проектный и др.)) Materials, products and structures (list, technical specifications, supporting documents (passports, certificates, etc.), resource requirement indicator (normative, design, etc.))
	Оборудование (перечень, технические характеристики, подтверждающие документы (паспорта, сертификаты и др.)) Equipment list (technical specifications, supporting documents (passports, certificates, etc.))
Процесс Process	Данные записи процесса (видеофиксация; запись сцены, переговоров, мозговой активности; физиологические показатели исполнителей (сердечный ритм, давление, тонус, потеря калорий и др.); контроль выполнения технологической активности; режим труда (чередование работы и регламентирующих перерывов); время эксплуатации машин и механизмов; данные о расходе материальных ресурсов и оборудования Process recording data (video recording; recording of a scene, negotiations, brain activity; physiological indicators of performers (heart rate, pressure, tone, calorie loss, etc.); control of technological performance; labour mode (alternating work and regulatory breaks); operating time of machines and mechanisms; data on the consumption of material resources and equipment
	Модель процесса Process model

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Область строительного анимационного моделирования обозначена достаточно длительный период времени, но еще не раскрыта в качестве инструмента нормирования и внедрения технологических процессов. Строительное анимационное моделирование — это создание нормализованной информационной динамической модели со всеми параметрами и атрибутами процесса, причем моделироваться может не только строительная продукция, но и люди и их процесс работы. Цель строительной анимации — симуляция строительного процесса с точностью, приближенной к реальному процессу.

Выделение области строительной анимации, как самостоятельного научного направления в проектировании, связано с развитием вычислительных мощностей и программных средств, особенно за последние 20–25 лет. Методологический аппарат, естественно, отстает от развития вышеуказанных направлений, хотя его первостепенная значимость трудно оспорима, так как именно область методологии разработки и применения норм для задач управления строительством является основой для законодательного регулирования и организации массовых

строительных программ. Необходимость корректировки и изменения законодательства сказывается также сильно, потребуется внесение изменений в градостроительный кодекс, трудовой кодекс, методики разработки технологических карт и сметных норм.

По своей сути строительная анимация весьма примитивна, представляет собой четырехмерное позиционирование элементов объекта строительства в трехмерном пространстве и времени. По исполнению задача — трудоемкая, поскольку связана с пространственно-временным моделированием, обеспечиваемым определенным уровнем техническими средствами, программными средствами, распределенной организацией работ над проектом, информационным наполнением и установленными правилами работ наполнения совокупной информационной модели проекта в рамках принятого методического обеспечения.

Развитие системы нормирования трудовых процессов при построении модели (прототипа) процесса (цифрового двойника) на основе технологии захвата движений и переноса сцены целесообразно планировать по следующим направлениям:

- создание библиотеки динамических (анимационных) микроэлементов, из которых возможна склейка любых рабочих операций;

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 8, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 8, 2024

- применение физических симуляций для определения времени работы с материалами, а в дальнейшем для установления расхода материальных ресурсов;
- развитие отечественного программного и аппаратного обеспечения для моделирования сцены — места производства работ или стройплощадки полнотью;
- создание виртуальных инструкций для рабочих различных специальностей, обучения студентов, внедрения передовых методов и приемов труда;
- анализ движений человека в зависимости от его антропометрических характеристик (длина шага, моторика движений, длина рук, масса тела, положение центра тяжести и проч.) и физиологических параметров (раса, пол, возраст, вес, рост и т.п.);
- обеспечение оценки биоритмов человека;
- обеспечение возможности оценивать вредное воздействие среды, установление требований к безопасности производства работ и нормированию рабочего процесса с учетом факторов влияния.

Последующее применение технологии захвата движений и моделирования сцены, фактически, переводит техническое нормирование в строительстве в область дополненной виртуальности, и обеспечивает сопоставимость реальных и смоделированных объектов и сцен.

Проведенная апробация возможности использования технологии захвата движений для моделирова-

ния рабочей операции показала даже на начальном этапе допустимость такого подхода к фиксации данных по наблюдаемому процессу. Доступными средствами возможно снять данные по всем рабочим движениям в процессе наблюдения рабочей операции, а также с применением доступного ПО (например, Blender¹⁴) выявить непроизводительные действия, удалить их и сформировать процесс с чистым оперативным временем работы. При этом формируется цифровой след процесса, который может быть проанализирован различными способами. Неоспоримым достоинством является обезличенность модели сцены рабочей операции, т.е. не привязанность к личностям исполнителей работ. Сцена может быть смоделирована на основе банка данных рабочих движений и приемов, полученных из различных источников, — склейка данных. Такой подход позволяет наблюдать недостаточно подготовленные на производстве процессы с последующим их анализом и нормализацией модели, а соответственно, установлением норм затрат труда и времени выполнения оперативной работы. Перспективным является применение микроэлементного нормирования в сочетании с искусственным интеллектом, позволяющим сопоставлять данные о рабочих движениях модели с микроэлементами и в итоге оперативно устанавливать обоснованные нормы затрат труда [29–33].

¹⁴ URL: <https://www.blender.org/>

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Каракозова И.В., Лисицын И.М., Болдышев К.В. Создание электронной базы нормативных наблюдений в условиях цифровизации в строительстве // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 8. С. 1306–1317. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1306-1317
2. Каракозова И.В., Лисицын И.М. Особенности отечественного опыта разработки и применения производственных и сметных норм в строительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 4. С. 104–109. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-4-104-109. EDN BPAIGF.
3. Савенков А.Н. Методические подходы к развитию технического нормирования в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 7. С. 51–57. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.07.51-57. EDN FTEEXA.
4. Калюжнюк М.М., Калюжнюк А.В. Упорядочение рабочих операций простых технологических процессов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7 (25). С. 87–99. EDN OIYPUN.
5. Волхонский А.Н. Модели данных при проектировании баз данных автоматизированных систем // Международный студенческий научный вестник. 2021. № 6. С. 38. EDN YEMXQY.
6. Спах А.Г. Основы нормирования рабочих процессов. Харьков, 1932. 84 с.
7. Башинский С.В. Основы технического нормирования в строительстве. М., 1954. 342 с.
8. Ступникова Е.А., Шаталова Е.П. Анализ состояния технического нормирования в строительстве в России и за рубежом // Транспортное дело России. 2016. № 1. С. 100–103. EDN VUDRRV.
9. Позолотина Е.И. Сравнение методов нормирования труда // Human Progress. 2015. Т. 1. № 1.
10. Одегов Ю.Г., Малинин С.В. Основные тенденции развития нормирования труда в странах с развитой рыночной экономикой // Экономика и труд. 2005. № 5. С. 71–78.
11. Куликов А. Микроэлементное нормирование и повышение производительности труда. 2015.
12. Кожевникова Е.О., Букалова А.Ю. Нормирование труда в условиях современного производства // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2019. Т. 1. С. 149–155. EDN VCXUYU.
13. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активность. М.: Наука, 1990. 496 с.
14. Бернштейн Н.А. О построении движений. М.: Медгиз, 1947. 254 с.

15. Гайниязов И.М., Обабков И.Н., Хлебников Н.А. Метод захвата движений как средство естественного интерфейса. Пермь, 2017. С. 193–196.
16. Вабищевич А.Н., Восков Л.С. Беспроводная система захвата движения на основе платформы беспроводной сенсорной сети и инерциальных датчиков // Научные труды (Вестник МАТИ). 2013. № 20 (92). С. 200–210.
17. Бондарук Е.В., Меркулова А.Г., Калинина С.А. Возможность применения инерционных систем захвата движений для решения задач физиологии труда // Медицина труда и промышленная экология. 2020. Т. 60. № 11. С. 734–737. DOI: 10.31089/1026-9428-2020-60-11-734-737
18. Бузуев И.И., Сумарченко И.А., Сорокина Л.В. Оценка тяжести и напряженности трудового процесса при проведении специальной оценки условий труда : лабор. практ. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2016. 96 с.
19. Скворцов Д.В. Клинический анализ движений. Анализ походки. Иваново : Издательство НППЦ – «Стимул», 1996. 344 с.
20. Скворцов Д.В., Поляев Б.А., Стаховская Л.В., Иванова Г.Е. Диагностика и тестирование двигательной патологии инструментальными средствами // Вестник восстановительной медицины. 2013. № 5 (57). С. 74–78. EDN RRYRQN.
21. Иванова Г.Е., Скворцов Д.В., Климов Л.В. Виртуальная реальность в восстановлении двигательной функции // Вестник восстановительной медицины. 2014. № 2 (60). С. 46–51. EDN SPMRJB.
22. Badler N., Phillips C.B., Webber B.L. Simulating humans-computer graphics animation and control. Oxford University Press, 1999.
23. Кокарева В.В., Смелов В.Г., Шитарев И.Л. Имитационное моделирование производственных процессов в рамках концепции «бережливого производства» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. 2012. № 3–3. (34). С. 131–136. EDN PWTGHF.
24. Крышень Е.В., Лаврусъ О.Е. Моделирование производственных процессов // Механика и машиностроение. 2012.
25. Загrevский В.И. Модели анализа движений биомеханических систем. Томск : Издательство Томского университета, 1990. 124 с. EDN YUFGJL.
26. Звегинцев В.А. Теоретико-лингвистические предпосылки гипотезы Сепира – Уорфа // Новое в лингвистике. Вып. I, М., 1960.
27. Звегинцев В.А. Очерки по общему языкознанию (раздел «Роль языка в процессах познания»), М., 1962.
28. Денисова Е.Н., Махров С.С. Анализ современных методов регистрации сигналов мозговой активности посредством нейрокомпьютерного интерфейса // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 12. С. 14–17. EDN ZXLRBR.
29. Кашипов Р.З. Влияние автоматизации и цифровизации на развитие системы нормирования труда // Экономика. Наука. Бизнес : сб. науч. тр. II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 2021. С. 223–230. EDN HTVVCL.
30. Кашипов Р.З. Развитие системы нормирования труда на нефтегазодобывающем предприятии в условиях автоматизации : дис. ...канд. экон. наук. Омск, 2021. EDN HJDGOW.
31. Демидов В.В., Кашипов Р.З. Совершенствование микроэлементного нормирования за счет применения инновационных технологий // Организация и нормирование труда: наука, образование, практика : сб. науч. тр. 2018. С. 68–74. EDN YUYDQL.
32. Матвеев М.Ю., Сборщикова М.Н., Сборщиков С.Б. Развитие системы нормирования труда за рубежом // Вестник МГСУ. 2011. № 3–2. С. 68. EDN OWCDHL.
33. Максимов Д.Г. Возникновение и развитие микроэлементного нормирования труда // Вестник Удмуртского университета. Серия: Экономика и право. 2014. № 1. С. 68–71. EDN SBNLYR.

Поступила в редакцию 5 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 11 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 24 июня 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ирина Викторовна Каракозова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инновации; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ID RSCI: 655795, Scopus: 57190864252, ResearcherID: AAD-4118-2022, ORCID: 0000-0002-7913-919X; i.kar@inbox.ru;

Илья Михайлович Лисицын — кандидат технических наук, директор департамента методологии ценообразования в строительстве; **ГСС Плюс;** 107113, г. Москва, ул. Лобачика, д. 11, 6-й этаж; limmoscow@mail.ru;

Константин Владимирович Болдышев — заместитель генерального директора; **Управляющая компания «Большая Шатура»;** 140700, Московская область, г. Шатура, ул. Савушкина, д. 3; BoldyshevKV@mosreg.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Karakozova I.V., Lisitsyn I.M., Boldyshev K.V. Electronic database of regulatory observations as a tool of public administration in the context of digitalization in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(8):1306-1317. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1306-1317 (rus.).
2. Karakozova I.V., Lisitsyn I.M. Features of the domestic experience in the development and application of production and estimated standards in construction. *Academia. Architecture and Construction*. 2019; 4:104-109. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-4-104-109. EDN BPAIGF. (rus.).
3. Savenkov A.N. Methodological approaches to the development of technical regulation in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 7:51-57. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.07.51-57. EDN FTEEXA. (rus.).
4. Kalyuzhnyuk M.M., Kalyuzhnyuk A.V. Streamlining of work operations of simple technological processes in construction. *Civil Engineering Magazine*. 2011; 7(25):87-99. EDN OIYPUN. (rus.).
5. Volkhonsky A.N. Data models in the design of databases of automated systems. *International Student Scientific Bulletin*. 2021; 6:38. EDN YEMXQY. (rus.).
6. Spakh A.G. *Fundamentals of standardization of work processes*. Kharkov, 1932; 84. (rus.).
7. Bashinsky S.V. *Fundamentals of technical rationing in construction*. Moscow, 1954; 342. (rus.).
8. Stupnikova E.A., Shatalova E.P. Analysis of the state of technical regulation in construction in Russia and abroad. *Transport Business of Russia*. 2016; 1:100-103. EDN VUDRRV. (rus.).
9. Zolotina E.I. Comparison of methods of labor rationing. *Human Progress*. 2015; 1(1). (rus.).
10. Odegov Yu.G., Malinin S.V. The main trends in the development of labor rationing in countries with developed market economies. *Economics and Labor*. 2005; 5:71-78. (rus.).
11. Kulikov A. *Microelement rationing and labor productivity improvement*. 2015. (rus.).
12. Kozhevnikova E.O., Bukalova A.Yu. Labor rationing in construction in conditions of modern production. *Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2019; 1:149-155. EDN VCXUYU. (rus.).
13. Bernstein N.A. *Physiology of movements and activity*. Moscow, Nauka, 1990; 496. (rus.).
14. Bernstein N.A. *On the construction of movements*. Moscow, Medgiz, 1947; 254. (rus.).
15. Gainiyarov I.M., Obabkov I.N., Khlebnikov N.A. *Motion capture method as a means of natural interface*. Perm, 2017; 193-196. (rus.).
16. Vabishevich A.N., Voskov L.S. Wireless motion capture system based on a wireless sensor network platform and inertial sensors. *Scientific papers (Bulletin of the Institute of Physics and Technology)*. 2013; 20(92):200-210. (rus.).
17. Bondaruk E.V., Merkulova A.G., Kalinina S.A. The possibility of using inertial motion capture systems to solve problems of labor physiology. *Occupational Medicine and Industrial Ecology*. 2020; 60(11):734-737. DOI: 10.31089/1026-9428-2020-60-11-734-737 (rus.).
18. Buzuev I.I., Sumarchenkova I.A., Sorokina L.V. *Assessment of the severity and intensity of the labor process during a special assessment of working conditions*. Samara, Samara State Technical University, 2016; 96. (rus.).
19. Skvortsov D.V. *Clinical analysis of movements. Gait analysis*. Ivanovo, NPTS – Stimul Publishing House, 1996; 344. (rus.).
20. Skvortsov D.V., Poljaev B.A., Stahovskaja L.V., Ivanova G.E. Diagnostics and testing of motive pathology by tools. *Journal of Restorative Medicine and Rehabilitation*. 2013; 5(57):74-78. EDN RRYRQN. (rus.).
21. Ivanova G.E., Skvortsov D.V., Klimov L.V. Virtual reality at recovery of motion. *Journal of Restorative Medicine and Rehabilitation*. 2014; 2(60):46-51. EDN SPMRJJ. (rus.).
22. Badler N., Phillips C.B., Webber B.L. *Simulating Humans-Computer Graphics Animation and Control*. Oxford University Press, 1999.
23. Kokareva V.V., Smelov V.G., Shitarev I.L. Simulation of manufacturing processes within the concept of “Lean production”. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012; 3-3(34):131-136. EDN PWTGHF. (rus.).
24. Kryshen E.V., Lavrus O.E. Modeling of production processes. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2012. (rus.).
25. Zagrevsky V.I. *Models for analyzing the movements of biomechanical systems*. Tomsk, Tomsk University Press, 1990; 124. EDN YUFGJL. (rus.).
26. Zvegintsev V.A. Theoretical and linguistic prerequisites of the Sepir-Whorf hypothesis. *New in linguistics*. vol. I, M., 1960.
27. Zvegintsev V.A. Essays on general linguistics (section “The role of language in the processes of cognition”), M., 1962.
28. Denisova E.N., Makhrov S.S. Analysis of modern methods for registering brain activity signals through a neurocomputer interface. *T-Comm*. 2017; 11(12):14-17. EDN ZXLRBR. (rus.).
29. Kashapov R.Z. Automation and digitalization impact on the development of the labor rationing system. *Economy. Science. Business*. 2021; 223-230. EDN HTVVCL. (rus.).
30. Kashapov R.Z. *Development of a labor standardization system at an oil and gas production enterprise in conditions of automation*. Omsk, 2021. EDN HJDGOW. (rus.).
31. Demidov V.V., Kashapov R.Z. Development of microelement regulation using innovation technologies. *Organization and rationing of labor: science, education, practice*. 2018; 68-74. EDN YUYDQL. (rus.).
32. Matveev M.Y., Sborshikova M.N., Sborshi

kov S.B. Development of normalization of work quota setting abroad. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 3-2:68. EDN OWCDHL. (rus.).

33. Maksimov D.G. The emergence and development of microelement work measurement. Bulletin of Udmurt University. *Series Economics and Law*. 2014; 1:68-71. EDN SBNLYR. (rus.).

Received March 5, 2023.

Adopted in revised form on March 11, 2024.

Approved for publication on June 24, 2024.

B I O N O T E S: **Irina V. Karakozova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 655795, Scopus: 57190864252, ResearcherID: AAD-4118-2022, ORCID: 0000-0002-7913-919X; i.kar@inbox.ru;

Ilya M. Lisitsyn — Candidate of Technical Sciences, Director of the Department of Pricing Methodology in Construction; **GSS Plus**; 6th floor 11 Lobachika st., Moscow, 107113, Russian Federation; limmoscow@mail.ru;

Konstantin V. Boldyshev — Deputy General Director; **Management Company “Bolshaya Shatura”**; 3 Savushkina st., Moscow region, Shatura, 140700, Russian Federation; BoldyshevKV@mosreg.ru.

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

Реинжиниринг бизнес-процессов в условиях применения новых организационных схем управления строительством

Сергей Борисович Сборщиков^{1,2}, Наталья Валериевна Лазарева^{1,2}

¹ Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»); г. Москва, Россия;

² НИТУ МИСИС; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Современное состояние инвестиционно-строительной деятельности (ИСД) на корпоративном уровне определяется не только усложнением применяемых инженерных решений объектов капитального строительства, но также изменениями в аналогичном тренде внешней и внутренней среды хозяйствующих субъектов, участвующих в возведении здания или сооружения. Подобное усложнение обусловлено перманентным нарастанием научно-технического прогресса и проявлением соответствующих ему экономических явлений, которые влияют на запросы потребителей и регуляторные регламенты государства. Как следствие этого, нарастание и обострение противоречий между условиями реализации ИСД и организацией управления строительством, что является причиной появления новых вариантов реализации бизнес-процессов, их сложения и интеграции с производственными и обеспечительными процессами, т.е. возникновения новых организационных схем управления строительством. Одной из таких схем можно принять управление строительством на основе производственно-инжинирингового центра (ПИЦ). Ключевым направлением повышения эффективности в этом организационном построении служит трансформация управленческих процессов, т.е. их реинжиниринг.

Материалы и методы. В основе исследования лежат постулаты кибернетики, логики регулируемых воздействий, организации производственных систем, структурно-функционального анализа. Использовался научный задел авторов, который нашел отражение в их публикациях по данной проблематике. Дополнительными источниками послужили научные труды отечественных и зарубежных ученых в данной предметной области.

Результаты. Обоснованы структура и состав ПИЦ, выполнено распределение основных групп функций, определено место подобного организационного построения в корпоративной системе управления ИСД, установлены направления реинжиниринга бизнес-процессов.

Выводы. Формирование новых, современных организационных структур — перспективное направление реинжиниринга бизнес-процессов для увеличения эффективности строительства, повышения качества строительной продукции, а также взаимодействия участников инвестиционно-строительной деятельности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: реинжиниринг, реинжиниринг бизнес-процессов, реинжиниринг организационной структуры, строительные организации, строительная отрасль, организационная структура, инвестиционно-строительная деятельность, производственно-инжиниринговый центр, логистический центр, логистика регулируемых воздействий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Реинжиниринг бизнес-процессов в условиях применения новых организационных схем управления строительством // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1390–1400. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1390-1400

Автор, ответственный за переписку: Наталья Валериевна Лазарева, tous2004@mail.ru.

Reengineering of business processes in the context of application of new organizational schemes of construction management

Sergey B. Sborschikov^{1,2}, Natalia V. Lazareva^{1,2}

¹ Research Center of Construction; Moscow, Russian Federation;

² NUST MISIS; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The current state of investment and construction activities at the corporate level is determined not only by the complexity of applied engineering solutions of capital construction facilities, but also by changes in a similar trend of external and internal environments of economic entities involved in the construction of a building or structure. Such complication is caused by the permanent increase of scientific and technological progress and the manifestation of economic phenomena corresponding to it, which affect the demands of consumers and regulatory rules of the state. As a result, there is an increase in contradictions between the conditions for the implementation of investment and construction activities and the organization of construction management, which is the reason for the emergence of new options for the implementation of business processes, their addition and integration with production and security processes, i.e. the emergence of new organizational schemes for construction management. One of these schemes can be used to manage construction on the basis of production and engineering centre. As noted in the paper, the main direction of increasing efficiency in this organizational structure is the transformation of management processes, i.e. their reengineering.

Materials and methods. The research is based on the postulates of cybernetics, the logistics of regulatory influences, the organization of production systems, and structural and functional analysis. The scientific background of the authors was used, which was reflected in their publications on this problem. Additional sources were scientific works of domestic and foreign scientists in this subject area.

Results. The structure and composition of the production and engineering centre are substantiated, the distribution of the main groups of functions is performed, the place of such an organizational structure in the corporate management system of investment and construction activities is determined, and the directions of business process reengineering are established.

Conclusions. The formation of new, modern organizational structures is a promising direction of business process reengineering to increase the efficiency of construction, improve the quality of construction products, as well as the interaction of participants of investment and construction activities.

KEYWORDS: reengineering, business process reengineering, organizational structure reengineering, construction organizations, construction industry, organizational structure, investment and construction activities, production and engineering centre, logistics centre, logistics of regulatory actions

FOR CITATION: Sborschikov S.B., Lazareva N.V. Reengineering of business processes in the context of application of new organizational schemes of construction management. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1390-1400. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1390-1400 (rus.).

Corresponding author: Natalia V. Lazareva, tous2004@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Усложнение задач и процессов строительства в сочетании с необходимостью сокращения затрат, продолжительности периода «проектирование – строительство», увеличения производительности диктуют повышенные требования к организации производительных сил, участвующих в возведении здания или сооружения. Эти факторы служат побудительными мотивами появления новых организационных схем управления строительством, одна из которых связана с широким применением методологии и практики инжиниринга. Данный факт обусловил ее название — инжиниринговая схема управления строительством. Она является разновидностью подрядного способа производства работ, но в отличие от генподрядной схемы допускает отделение управленческих процессов от производственных, выполнение которых целиком делегируется подрядным организациям [1–8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе исследования лежат постулаты кибернетики, логики регулирующих воздействий, организации производственных систем, структурно-функционального анализа, а также научный задел авторов, который нашел отражение в их публикациях по данной тематике [1–8]. Дополнительными источниками послужили научные труды отечественных и зарубежных ученых в данной предметной области [9–35].

Цель исследования — формирование теоретического фундамента применения новых организационных схем управления (например, на основе производственно-инжинирингового центра) и определение направления трансформации бизнес-процессов инвестиционно-строительной деятельности (ИСД). В этой связи можно сформулировать задачи исследования: установить состав производственно-инжинирингового центра, идентифицировать его

основные функции, определить взаимодействие производственно-инжинирингового центра с контрагентами — участниками ИСД.

Объект исследования — система корпоративного регулирования ИСД, предмет — производственно-инжиниринговый центр (ПИЦ).

Практическая ценность функционирования ПИЦ обусловлена увеличением эффективности строительства за счет оптимизации использования материально-технических ресурсов (МТР), повышения качества строительной продукции, а также результативного взаимодействия участников ИСД в рамках подобных структур.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Инжиниринговая схема управления строительством связана с функционированием такого структурного и субъектного элемента ИСД как организатор строительства, координирующего работу основных производственных, подрядных подразделений и подразделений, занятых обеспечением строительства [9–11].

В качестве организатора строительства может выступать как инжиниринговая компания, так и специализированное инжиниринговое подразделение крупной компании, которая является застройщиком или финансирует подобные инвестиционные проекты и программы. Так или иначе, реализация подобных функций требует соответствующей организационной структуры. Такой структурой может стать ПИЦ, который охватывает и интегрирует несколько предметных областей, связанных с управлением материально-техническим обеспечением, механизацией, строительным производством, информацией (рис. 1).

Интерпретируя указанные предметные области в контексте организации строительства, можно установить традиционно принимаемые для них составляющие, а именно:

1. Управление МТО.

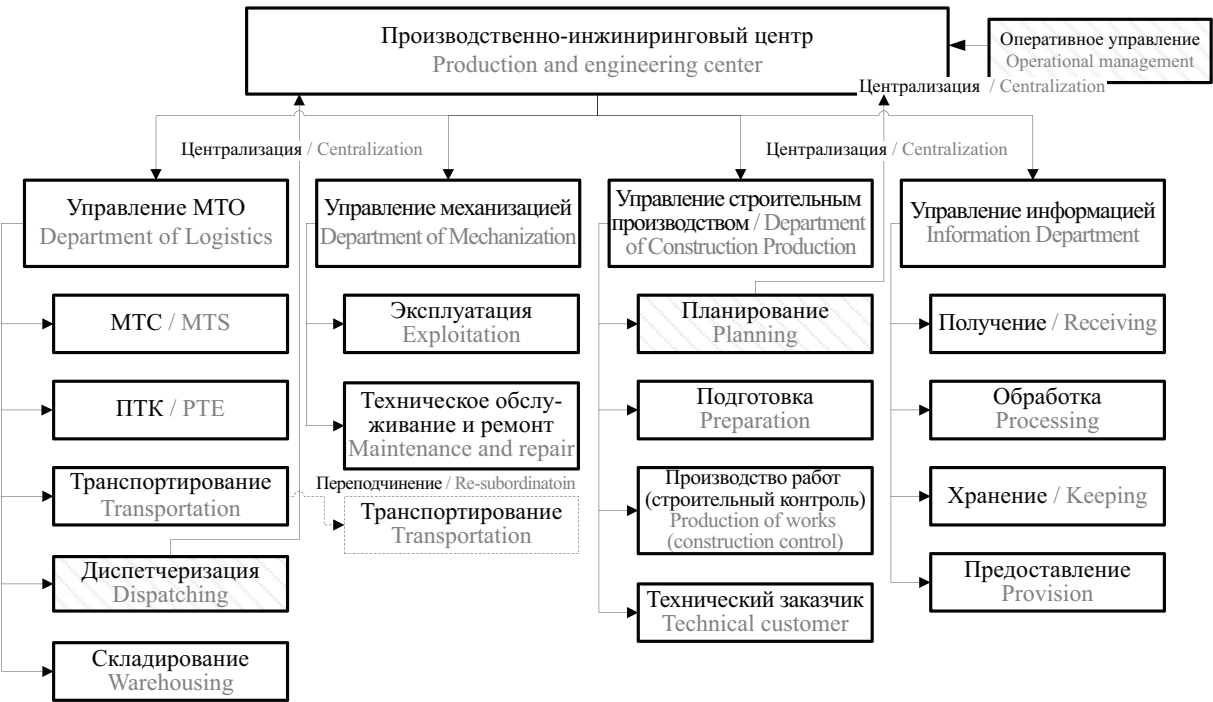


Рис. 1. Состав производственно-инжинирингового центра: МТО — материально-техническое обеспечение; МТС — материально-техническое снабжение; ПТК — производственно-технологическая комплектация

Fig. 1. The composition of the production and engineering centre: LS — logistical support; MTS — material and technical supply; PTE — production and technological equipment

- 1.1. МТС.
- 1.2. ПТК.
- 1.3. Транспортирование.
- 1.4. Диспетчеризация.
- 1.5. Складирование.
- 2. Управление механизацией.
- 2.1. Эксплуатация машин, механизмов, оборудования.
- 2.2. Техническое обслуживание и ремонт машин, механизмов, оборудования.
- 3. Управление строительным производством.
- 3.1. Планирование строительства.
- 3.2. Подготовка строительства.
- 3.3. Производство работ, в том числе выполнение функций строительного контроля.
- 3.4. Реализация функций технического заказчика.
- 4. Управление информацией.
- 4.1. Получение информации.
- 4.2. Обработка информации.
- 4.3. Хранение информации.
- 4.4. Предоставление информации, достаточной для принятия решений (технических и управленческих).

Интеграция указанных элементов вызовет перераспределение их подчиненности (например, транспортирования), а также централизацию некоторых из них:

- оперативное управление;
- планирование;
- диспетчеризация.

Как было установлено ранее в исследованиях авторов [2], управление МТО и механизацией могут быть структурированы исходя из возможностей управления потоками МТР в единый блок логистики. Его главная задача — эффективное распределение материально-технических ресурсов, исключение срывов в их поставках на рабочие места, снижение стоимости транспортирования и заготовительно-складских работ, увеличение загрузки машин и механизмов как по времени, так и по мощности.

Основным элементом данного организационного построения служит управление строительным производством, которое реализуют подразделения, напрямую взаимодействующие с подрядными проектными и строительными организациями. Ключевая задача — эффективное строительное производство, в результате решения которой достигается цель — ввод объекта в эксплуатацию в установленные сроки и необходимым качеством. Однако стоит указать, что в соответствии с идеологией инжиниринговой схемы это подразделение не выполняет собственными силами работы по возведению здания или сооружения, а реализует функции, связанные с управлением, а именно с координацией, планированием, подготовкой и контролем строительного производства.

Управление информацией осуществляет одноименное подразделение, которое занимается получением, обработкой, хранением и предостав-

лением информации для всех остальных звеньев ПИЦ, а также для его контрагентов — подрядных организаций, поставщиков МТР, заказчика [12–15]. В современной обстановке данное подразделение является инициатором и движущей силой в рамках производственно-инжинирингового центра применения BIM- и VR-технологий и т.д.

Таким образом, интеграция основана как на организационных, так и технических мероприятиях, что вызовет трансформации в бизнес-процессах обозначенных выше предметных областей. Подобные преобразования носят не столько количественный, сколько качественный характер, и поэтому их можно отнести к реинжинирингу.

Централизация функций планирования, оперативного управления и диспетчеризации связана с необходимостью единого вектора функционирования элементов ПИЦ (рис. 2). Отправной точкой формирования скоординированной деятельности служит планирование, которое выполняет увязку

функционирования элементов во времени и пространстве.

Планирование реализуется путем разработки документации формата ППР (проекты производства работ) и ПОР (проекты организации работ). Особое значение приобретают качество и реальность проекта организации работ, который увязывает программу работ на достаточно длительный период, а также планы механизации и графики МТО. Современным трендом, который должен быть учтен в процессах и документах планирования, является информационное моделирование строительства (BIM) [16–20].

Контроль за исполнением планов строительного производства, графиков движения машин и механизмов, а также потребности МТР, поставки их комплектов на строительную площадку осуществляет структурный элемент «оперативное управление», который принимает решение о корректировке указанных выше планов и впоследствии контролирует их исполнение. Реализация функции контроля не-

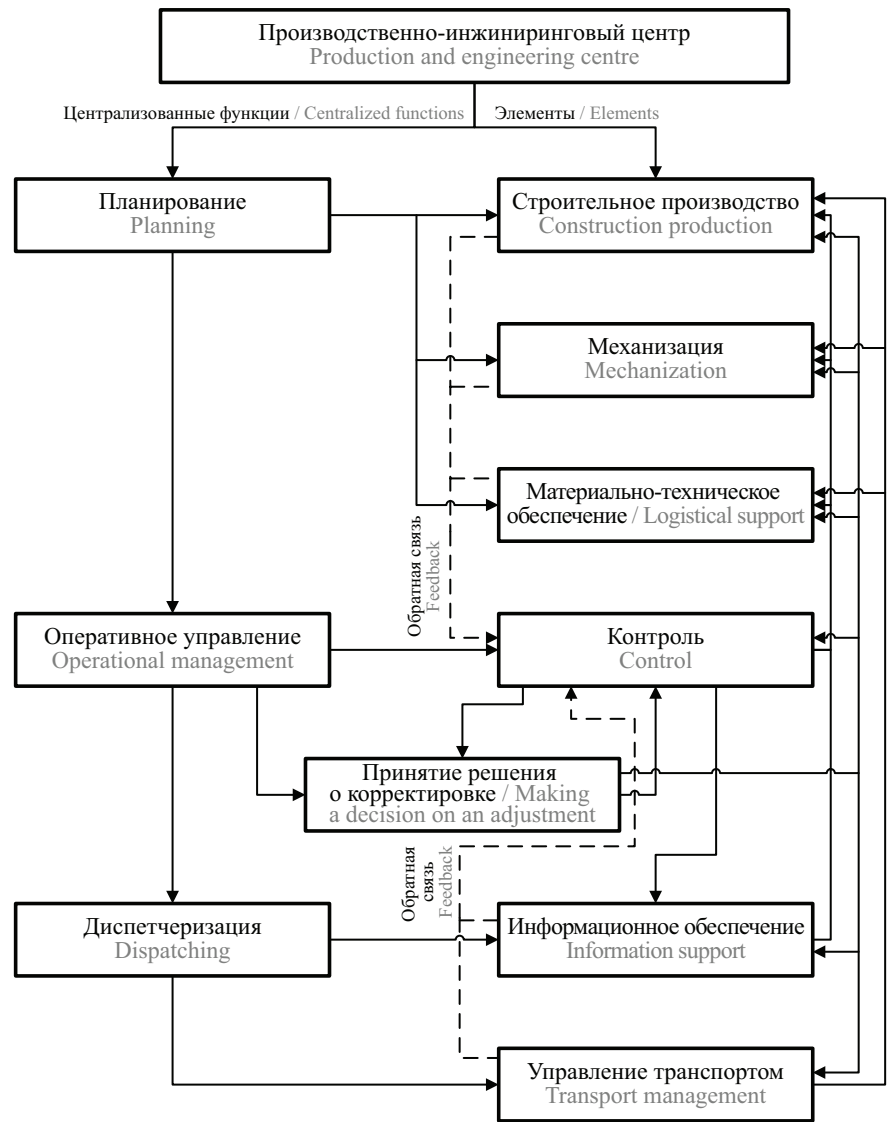


Рис. 2. Схема реализации основных функций производственно-инжиниринговым центром

Fig. 2. The scheme of implementation of the main functions of the production and engineering centre

возможна без наличия достоверной, своевременной и достаточной информации как о ходе реализации инвестиционного проекта, так и об условиях его выполнения, присутствия несоответствий и возможности их возникновения в том или ином сценарии развития событий. Подобное информационное обеспечение служит базой для другого структурного звена «диспетчеризация», который можно рассматривать как подчиненный элементу «оперативное управление», его основное назначение — реализация обеспечительных мероприятий строительного производства, соблюдение их соответствия по объему, времени и объекту. Для этого структурный элемент «диспетчеризация» выполняет управление транспортом, т.е. контролирует интенсивность потоков МТР в рамках производственно-инжинирингового центра [21–26].

Централизация указанных выше укрупненных групп функций приводит к концентрации внимания в данном организационном построении на определенных видах управленческой деятельности по организации строительства (рис. 3).

Так, направление деятельности структурного элемента «планирование», исходя из круга решаемых им задач, может быть конкретизировано как оперативно-производственное планирование (ОПП). Совместную работу пары структурных элементов «оперативное управление» и «диспетчеризация» можно охарактеризовать как оперативно-диспетчерское управление (ОДУ). Частичное наложение задач «планирование» и «оперативное управление» приводит к формирова-

нию такого вида деятельности, как оперативно-производственный контроллинг (ОПК).

Можно отметить, что реализуемые основные виды деятельности производственно-инжиниринговым центром нацелены на решение оперативных задач строительного производства. Однако выделение данных видов деятельности как основных справедливо только для аппарата управления и не принижает остальных видов деятельности, связанных с производственными и обеспечительными процессами [27–30].

В функции оперативного управления входят реализация воздействий (мероприятий, процедур), предусмотренных планом, а также при необходимости принятие решений по корректировке хода строительства и обеспечительных процессов. Следовательно, основой оперативного управления является планирование, функции которого — составление расписания работ, графиков движения и потребности в рабочей силе, МТР и привязка их к календарю. Реализация графиков мероприятий обеспечения необходимыми ресурсами — это функционал «диспетчеризации».

Таким образом, никаких кардинальных изменений функций не происходит, их набор и распределение достаточно стандартны и полностью вписываются в традиционные практики управления строительным производством. Единственным отличием может считаться наличие тесной обратной связи между производством и планированием, что позволяет в сочетании с близостью к месту возникновения несоответствий максимально сократить время отклика на проблему, а также увеличить адек-



Рис. 3. Основные виды деятельности производственно-инжинирингового центра и их функциональное наполнение
Fig. 3. The main activities of the production and engineering centre and their functional content

ватность координирующих мероприятий в оперативно-производственном планировании и в дальнейшем в оперативно-диспетчерском управлении данный факт составляет суть оперативно-производственного контроллинга.

Взаимодействия ПИЦ с контрагентами — участниками ИСД осуществляется по четырем контурам (рис. 4):

- 1) с заказчиком (застройщиком);
- 2) с подрядчиками;
- 3) с проектировщиком;
- 4) с поставщиками материально-технических ресурсов.

Взаимодействие по указанным контурам имеет два направления, характеризующие определенные воздействия:

- 1. Регулирующее воздействие (исходящий поток).
- 2. Обратная связь (входящий поток).

По отношению к ПИЦ исходящие потоки будут организованы к проектировщику, подрядчику, поставщику МТР, соответственно от них должна быть налажена обратная связь [31–35]. Взаимодействия с заказчиком (застройщиком) будут иметь обратные векторы: от заказчика ПИЦ испытывает регулирующие воздействия и как реакция на них в противоположном направлении осуществляется обратная связь (от ПИЦ к заказчику).

Регулирующее воздействие связано с проведением предусмотренных планом мероприятий, процедур, работ, процессов, контроля за их исполнением, установления несоответствий, принятия решений

о корректировке, а также координацией взаимодействий; обратная связь — это информационный поток с результатами выполнения плановых работ или корректирующих мероприятий.

Эффективность указанных контуров взаимодействия напрямую связана с качеством ОПП, ОДУ и ОПК.

Также необходимо отметить важность отправной точки подобных взаимодействий, а именно определения инжиниринговой компании, реализующей указанную схему управления строительством, и подрядчиков — исполнителей в ней. Это может быть реализовано в форме проведения установленных действующим законодательством конкурсных процедур. Их результатом является отбор наиболее выгодных предложений, которые могут оказать влияние на снижение стоимости, продолжительности строительства, повышение качества продукции. В сочетании с приращением эффективности от непосредственного функционирования ПИЦ это образует действенный стимул применения данного организационного построения в строительстве, особенно при возведении крупных технологически сложных и уникальных объектов.

Характер взаимодействий внутри ПИЦ и с внешними контрагентами определяется во многом схемой, приведенной на рис. 5.

Выбор той или иной схемы зависит от вида строительства, типа объекта, его характеристик, условий возведения. В этой связи можно примерно установить области приложения данных схем.

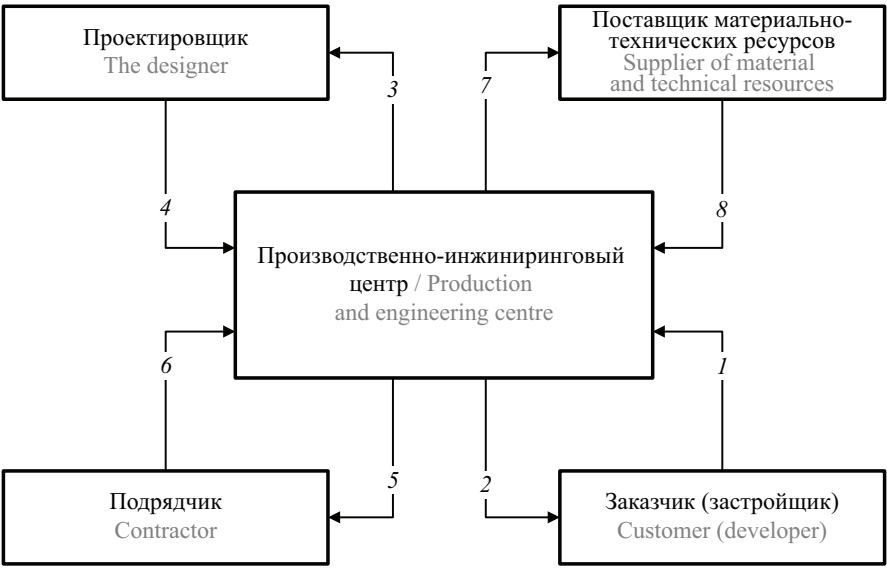


Рис. 4. Взаимодействие производственно-инжинирингового центра с контрагентами — участниками ИСД: 1 — заказчик — ПИЦ; 2 — ПИЦ — заказчик; 3 — ПИЦ — проектировщик; 4 — проектировщик — ПИЦ; 5 — ПИЦ — подрядчик; 6 — подрядчик — ПИЦ; 7 — ПИЦ — поставщик МТР; 8 — поставщик МТР — ПИЦ

Fig. 4. Interaction of the production and engineering centre with contractors participating in investment and construction activities: 1 — customer — production and engineering centre; 2 — production and engineering centre — customer; 3 — production and engineering centre — designer; 4 — designer — production and engineering centre; 5 — production and engineering centre — contractor; 6 — contractor — production and engineering centre; 7 — production and engineering centre — supplier of material and technical resources (MTR supplier); 8 — MTR supplier — production and engineering centre

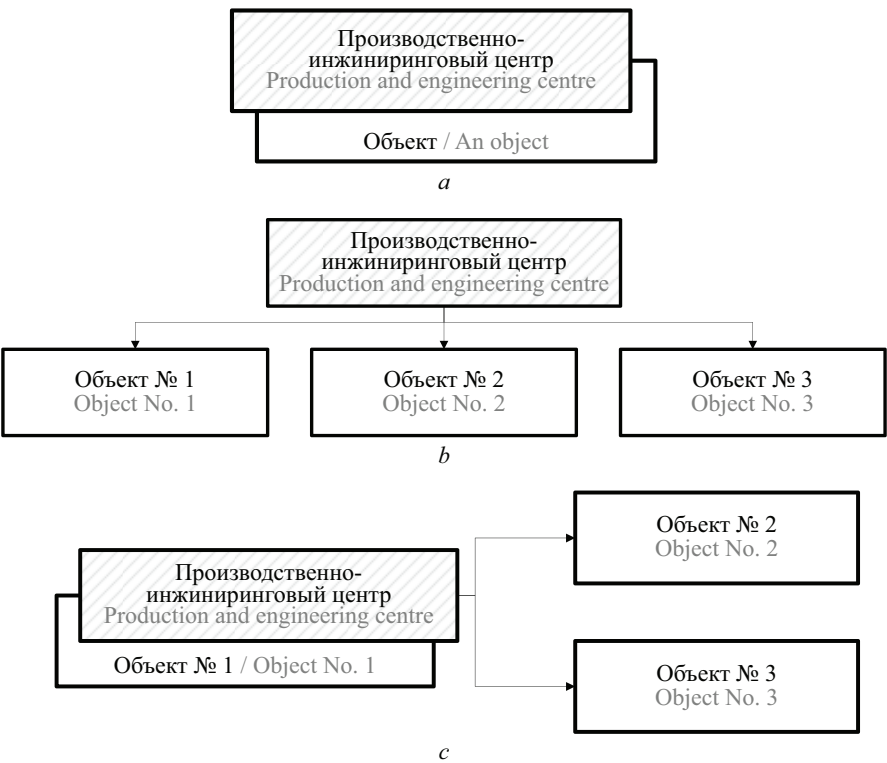


Рис. 5. Схемы функционирования производственно-инжинирингового центра: *a* — концентрированная схема; *b* — централизованная схема; *c* — концентрированно-централизованная схема

Fig. 5. Schemes of operation of the production and engineering centre: *a* — concentrated scheme; *b* — centralized scheme; *c* — concentrated-centralized scheme

Концентрированная схема функционирования ПИЦ целесообразна при строительстве крупного промышленного объекта, состоящего из нескольких зданий и сооружений, компактно расположенных на определенной территории. К таким объектам можно отнести АЭС, ТЭС, ГЭС и другие подобные здания и сооружения.

Централизованная схема предполагает обслуживание нескольких объектов одной инвестиционной программы, распределенных на обширной территории, к их числу можно отнести линейные объекты.

Концентрированно-централизованная схема возможна в том случае, если предполагается строительство одного главного объекта и нескольких вспомогательных на некотором удалении от него.

Важно отметить, что приведенная типология не конечна и может быть дополнена, а также может содержать модификации уже отмеченных автором схем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая все вышеприведенное, можно констатировать, что перспективно формирование новых, современных организационных структур за счет реинжиниринга бизнес-процессов, а также использования организационной конвергенции. Данное утверждение связано с обозначенной авторами возможностью увеличения эффективности строительства за счет оптимизации использования МТР, повышения качества строительной продукции, а также результативного взаимодействия участников ИСД в рамках ПИЦ. Вместе с тем следует отметить и ограниченность использования подобных структур рамками инвестиционного периода и необходимостью поиска новых организационных схем управления объектами капитального строительства в период их эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сборщиков С.Б. Логистика регулирующих воздействий в инвестиционно-строительной сфере (теория, методология, практика) : дис. ... д-ра экон. наук. М., 2012. 361 с. EDN QGBVJV.

2. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Реинжиниринг процессов материально-технического обе-

спечения 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

3. Сборщиков С.Б. Проектное управление. Инжиниринг и реинжиниринг в строительстве // Меж-

дународный строительный конгресс. Наука. Инновации. Цели. Строительство : сб. тез. докл. М., 2023. С. 136–139. DOI: 10.37538/2949-219X-2023-136-139. EDN LRMRF A.

4. *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.

5. *Сборщиков С., Лазарева Н.* Реинжиниринг строительных организаций и реинжиниринг строительной отрасли // Русский инженер. 2022. № 3 (76). С. 45–47. EDN XWACRC.

6. *Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В.* Формирование дополнительного эффекта при управлении стоимостью инвестиционного проекта за счет мероприятий реинжиниринга // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 2 (79). С. 252–263. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-252-263. EDN HNTEUT.

7. *Sborshikov S., Vvedenskiy R., Markova I.* Development of methods of operational and production management of construction of nuclear facilities // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 02047. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302047

8. *Lazareva N.* Innovative components of sustainable development in construction // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. P. 04001. DOI: 10.1051/matecconf/201819604001

9. *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.

10. *Шинкарева Г.Н.* Интенсификация строительного производства за счет применения комплексного инжиниринга // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2017. № 7. С. 43–46. EDN RAOOYW.

11. *Шинкарева Г.Н.* Модель инжиниринговой схемы организации строительства для контрактов жизненного цикла : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 172 с. EDN XJZLZQ.

12. *Хрипко Т.В.* Исследование применения технологий информационного моделирования в строительной отрасли КНР // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 2. С. 50–52. EDN OWZZEX.

13. *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

14. *Leybman D., Khripko T.* Quality assurance program of a nuclear facility // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703015

15. *Жаров Я.В.* Информационное моделирование строительства на основе блочно-кластерной структуры // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2019. № 11. С. 10–14. EDN XTWNSE.

16. *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.

17. *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.

18. *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 национ. науч. конф. 2023. С. 583–587. EDN BYPLIE.

19. *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.

20. *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.

21. *Силка Д.Н., Ермолаев Е.Е.* Методологические аспекты новой модели развития строительного комплекса // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 1 (20). С. 34. EDN QIGNGG.

22. *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.

23. *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.

24. *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.

25. *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

26. *Zhuravlev P., Bachus E., Markova I.* Directions of modernization of systems for ensuring the qual-

ity of construction of nuclear power facilities // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 05039. DOI: 10.1051/mateconf/201825105039

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. Язлев И.К., Попков А.Г., Белогурова О.А. Проблемы нормативно-правового обеспечения внедрения ресурсо-, энергосберегающих технологий в градо-

строительной деятельности // Экономика и предпринимательство. 2020. № 3 (116). С. 1000–1002. DOI: 10.34925/ЕІР.2020.116.3.212. EDN AJSLCW.

31. Шумейко Н.М. Понятия стоимости в строительстве // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 11 (1011). С. 42–45. EDN YMXDRJ.

32. Ключев В.Д., Зайцев Д.А., Журавлев П.А. Нормативная база для стоимостной оценки капитального ремонта многоквартирных домов // Управление многоквартирным домом. 2015. № 1.

33. 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.

34. Попков А.Г. Кадровое обеспечение строительного производства. Новые подходы к формированию, функционированию, регулированию // Техническое регулирование. Строительство, проектирование и изыскания. 2011. № 8. С. 29–33. EDN ODWQKJ.

35. Журавлёв П.А. Инженерная защита. Требуемые изменения строительных нормативов и регламентов // Русский инженер. 2022. № 4 (77). С. 44–48. EDN NAFYWT.

Поступила в редакцию 4 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 11 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 24 июня 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; профессор кафедры промышленного менеджмента; **НИТУ МИСИС;** 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1; РИНЦ ID: 431022; tous2004@mail.ru;

Наталья Валериевна Лазарева — кандидат технических наук, доцент, руководитель проектов, дирекция научно-технических проектов и экспертиз; **Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»);** 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д.6, доцент кафедры промышленного менеджмента; **НИТУ МИСИС;** 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1; 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 формирование выводов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Sborshchikov S.B. *Logistics of regulatory impacts in the investment and construction sector (theory, methodology, practice) : dis. ... doctor of economic sciences.* Moscow, 2012; 361. EDN QGBVJV. (rus.).

2. Sborshchikov 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 Con-

struction and Architecture]. 2023; 18(1):102-115. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.102-115 (rus.).

3. Sborshchikov S.B. Project management. Engineering and reengineering in construction. International Construction Congress. Science. *Innovation. Purposes. Construction. Collection of abstracts.* Moscow, 2023; 136-139. DOI: 10.37538/2949-219X-2023-136-139. EDN LMRFA. (rus.).

4. 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.).
5. 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.).
6. Sborshchikov S.B., Lazareva N.V. Formation of additional effect at management of the investment project cost at the expense of reengineering measures. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 2(79):252-263 DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-252-263. EDN HNTEUT. (rus.).
7. Sborshikov S., Vvedenskiy R., Markova I. Development of methods of operational and production management of construction of nuclear facilities. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:02047. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302047
8. Lazareva N. Innovative components of sustainable development in construction. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:04001. DOI: 10.1051/matec-conf/201819604001
9. 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.).
10. 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.).
11. 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.).
12. 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.).
13. 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
14. Leybman D., Khripko T. Quality assurance program of a nuclear facility. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703015
15. 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.).
16. 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.).
17. 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.).
18. 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.).
19. 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.).
20. Burenin V.S., Ezersky V.A., Monastirev 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.).
21. Silka D., Ermolaev E. Methodological aspects of the new model of building complex. *Online journal of Science Studies*. 2014; 1(20):34. EDN QIGNGG. (rus.).
22. 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.).
23. Ermolayev E.E. Foreign and domestic experience in the use of elements of engineering, outsourcing and out staffing in the construction industry. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2019; 4:49-67. EDN LNBLOC. (rus.).
24. 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 URUYR. (rus.).
25. 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
26. 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/matecconf/201825105039
27. Monastirev 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.).

28. 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.).

29. 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.).

30. 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. *Economics and Entrepreneurship*. 2020;

3(116):1000-1002. DOI: 10.34925/EIP.2020.116.3.212. EDN AJSLCW. (rus.).

31. Shumeyko N.M. Concepts of the construction cost estimate. *BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2018; 11(1011):42-45. EDN YMXDRJ. (rus.).

32. 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.).

33. 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.).

34. Popkov A.G. Staffing of construction production. New approaches to the formation, functioning, regulation. Technical Regulation. *Construction, Design and Surveys*. 2011; 8:29-33. EDN ODWQKJ. (rus.).

35. Zhuravlev P. Engineering protection. Required changes in building regulations and regulations. *Russian Engineer*. 2022; 4(77):44-48. EDN NAFYWT. (rus.).

Received March 4, 2024.

Adopted in revised form on March 11, 2024.

Approved for publication on June 24, 2024.

B I O N O T E S : **Sergey B. Sborschikov** — 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; Professor of the Department of Industrial Management; **NUST MISIS**; p. 1, 4 Leninsky Prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation;; ID RSCI: 431022; tous2004@mail.ru;

Natalia V. Lazareva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Project Manager; Directorate of Scientific and Technical Projects and Expertise; **Research Center of Construction**; 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; Associate Professor of the Professor of the Department of Industrial Management; **NUST MISIS**; p. 1, 4 Leninsky Prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation;; tous2004@mail.ru.

Contribution of the authors:

Sergey B. Sborschikov — scientific guidance, research concept, methodology development, writing the source text, scientific editing, final conclusions.

Natalia 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.

**Практика тестирования светопрозрачных фасадов
на воздухо- и водопроницаемость на опыте работы
в Канаде и США и применимость этого опыта
к реалиям Российской Федерации**

Михайленко С.П.

P. Eng., Consulting Engineer, Канада

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье обобщается опыт тестирования светопрозрачных фасадов и оконных систем на выполнение таких работ в Северной Америке и проводится сравнение с подходами в этом вопросе на территории Российской Федерации.

Материалы и методы. Анализируются история тестирования фасадных систем и оконной продукции в Канаде и США, учитывая их богатый опыт в возведении и испытаниях таких конструкций. Проводится сравнительный анализ с существующими методами тестирования в Российской Федерации, конкретно на основе недавно изданного ГОСТа 70941–2023 «Конструкции Фасадные Светопрозрачные. Методы определения водопроницаемости в натуральных условиях». Приводятся примеры используемого оборудования для тестирования на строительной площадке и лаборатории.

Результаты. Определяется порядок проведения таких тестов, используемое оборудование и правила техники безопасности при проведении работ по тестированию на строительной площадке.

Выводы. Отсутствие единого стандарта на проведение испытаний светопрозрачных фасадов в Российской Федерации на строительной площадке может привести к ситуации, которая в свое время возникла в канадском Ванкувере, когда фасады множества зданий не справлялись со своей основной функцией — отделения наружной окружающей среды от внутреннего пространства и создания благоприятных условий пребывания людей внутри здания. Вновь принятый ГОСТ 70941–2023, к сожалению, напоминает описание методов мытья фасадов перед сдачей здания в эксплуатацию, и не описывает адекватные инженерные подходы к тестированию светопрозрачных фасадов для определения их устойчивости к природным воздействиям (ветра и дождя). Назрела необходимость создания единого стандарта тестирования для всех участников строительства светопрозрачных фасадов и выработки показателей, которые будут характеризовать такие конструкции по типам и способности предотвращать проникновения дождя или воздуха во внутренние помещения.

**The practice of testing translucent facades for air
and water permeability based on experience in Canada
and the USA and the applicability of this experience
to the realities of the Russian Federation**

ANNOTATION

Introduction. Current article summarizes North American practices of standard test methods for exterior glazing applications, such as curtain walls, windows and compare these methods with practices exists in Russian Federation.

Materials and methods. It was assumed analysis of the testing principles for curtain walls and windows in Canada and USA, based on the long-term experience of these works and their tests. This article also contains comparison with the existing testing methods in Russian Federation, based on the recently published GOST 70941–2023 “Translucent facade construction. Methods of determination of water permeability under natural conditions”. There is a description of the recommended equipment for testing in a lab and construction site.

Results. The article describes required methods of testing, used equipment, safety rules during test development on construction site.

Conclusions. The absence of the uniform construction site testing standard for the curtain wall and windows in the Russian Federation can create a situation very similar to that once arose in Vancouver, Canada in the beginning of 90th last century, when a lot of building facades starts leaking (leaky condo in Vancouver) and do not comply with the main purpose of the exterior skin of building — to separate exterior environment from interior and provide to public favorable conditions for living in the building. Unfortunately newly developed GOST 70941–2023 more looks like the description of the facades washing before occupancy, than provides engineering approaches for testing facades and determine resistance to withstand with applicable environmental loads on buildings (wind and rain). It is time, when it is necessary to develop uniform standard for all contractors, who builds curtain wall and windows and how these building skin structures suppose to prevent air or water leakage to the interior of the buildings.

Представляемая работа имеет цель ознакомить Архитекторов, Инженеров, слушателей факультетов Архитектуры и Промышленного и гражданского строительства с подходами к вопросам тестирования смонтированной в здании оконной системы и подтверждения того, что установленные светопрозрачные конструкции будут адекватно противостоять проникновению воды через оконную систему внутрь помещения.

Данная работа вызвана появлением в стандартах Российской Федерации ГОСТ 70941–2023 «Конструкции Фасадные Светопрозрачные. Методы определения водопроницаемости в натурных условиях», который, по мнению автора, является неким повторением устаревшего стандарта, действовавшего на территории США и Канады достаточно долгий период, но в настоящий момент используемого только для предварительного тестирования смонтированной системы. Подрядчиком, но не для серьезного анализа смонтированной системы.

Автор данной работы имеет богатый практический более чем 30-летний опыт в области возведения и проектирования светопрозрачных фасадов в России и за рубежом и делится своим практическим опытом в этой области.

Предисловие

С появлением на строительном рынке значительного количества разнообразных светопрозрачных и просто фасадных компонентов возникла необходимость создать и систематизировать принципы и подходы к защите внутреннего пространства здания или сооружения от воздействия атмосферных осадков и упорядочить подходы к тестированию такой продукции с целью одинаковой оценки стойкости фасада к атмосферным воздействиям. К сожалению, на текущий момент в вопросах тестирования светопрозрачных конструкций в Российской Федерации присутствует некая анархия и отсутствие четкой классификации продуктов светопрозрачных элементов фасада. Каждый Институт или Подрядчик, практикующий в этой области, использует свои собственные подходы к вопросам тестирования, а нормативной базы для таких проверок пока нет или есть то, что в принципе сомнительно применять для определения реальных цифр по стойкости фасада к проникновению воздуха или воды. Трудно сказать, чем вызвана эта ситуация, возможно, тем, что ГОССТРОЙ РФ в нынешнем своем облике утратил позиции ведущего государственного учреждения, контролирующего процессы стандартизации и управления профильными институтами в различных строительных процессах с точки зрения разработки и рассмотрения требуемых ГОСТов, Сводов правил, и СНиПов, регулирующих вопросы качественного строительства в РФ. Отсюда и произрастают всевозможные документы различных институтов, которые имеют малый или вообще

не имеют опыта работы с такими фасадными конструкциями.

Это общеизвестный факт, что конструкции светопрозрачных фасадов из алюминия появились на строительном рынке в начале 50-х годов XX в. по окончании Второй мировой войны, когда высвободившийся объем алюминия из авиационной промышленности направлен в строительство. Появились витражи и остекление значительных площадей фасадов здания на основе алюминиевых стоечно-ригельных систем, которые требовали проверки в ходе и по окончании строительства на соответствие поставленной задачи — отделения наружного пространства от внутреннего и создания комфортной среды пребывания внутри здания. Для этого нужно было убедиться, что такой остекленный фасад адекватно воспринимает воздушные массы, действующие на фасад, и противостоит проникновению дождевой воды внутрь помещения. Это можно было сделать только при тестировании системы на возможные природные нагрузки в соответствии с районом строительства.

Начало изучению вопросов тестирования оконной продукции в строительной индустрии положил Норвежский Исследовательский институт в сфере строительства (*Norwegian Building Research Institute, NBRI*), в 1949 году и первые его изыскания в 1950 г. были посвящены вопросам изучения работы оконных систем под воздействием атмосферных и природных явлений. Первые испытания небольших по размеру окон были довольно примитивны и работали по принципу статического воздействия водной завесы на окно в течение 5 часов под различным давлением. Такой статический метод испытаний окон на водопроницаемость просуществовал до 1975 года в США и Канаде.

Мы не будем долго рассматривать различные прошлые, более чем 50-летней давности, способы тестирования оконных конструкций, в основном напоминающие пожаротушение из брандсбойта, в связи с тем, что большинство из них уже изжило себя и практически вся индустрия светопрозрачных фасадов Северной Америки, Европы и Азии перешла на ту методику, которая действует и по сей день. Преимущественно, это однокамерная система тестирования статическим или динамическим методом. Ссылки на действующие на сегодняшний день стандарты ASTM и рекомендации AAMA даны в Списке Стандартов... (см. стр. 1411).

Тесты делятся на лабораторные и на те, которые производятся на строительной площадке. На практике используются два метода тестирования — это статический, который может производиться как в лаборатории, так и на строительной площадке, и динамический, который производится, как правило, только в лаборатории во избежание проблем с техникой безопасности во время исполнения теста, которые могут возникнуть при прове-

дении теста на стройплощадке. В США и Канаде тестирование регламентируется двумя агентствами и одним общим американско-канадским стандартом, указанном ниже:

- ASTM — *American Society for Testing and Materials* Американская национальная система стандартов для материалов используемая в США (в некоторых случаях в Канаде) для стандартизации используемых материалов в промышленности, строительстве и других отраслях, включая методики тестирования материалов или конструкций из них;

- AAMA — *American Architectural Manufacturers Association* (Американская Ассоциация Производителей Архитектурных Компонентов);

- AAMA/WDMA/CSA 101/I. S.2/A440-11 NAFS® — North American Fenestration Standard/Specification for windows, doors, and skylights (существует уже версия 2022 года, но она пока не принята к действию).

Последний стандарт был выработан совместно AAMA и CSA (Canadian Standards Association) для того, чтобы и Канада и США имели единый подход к определению соответствующего класса выпускаемых окон, дверей, стеклянных крыш и т.п. светопрозрачных конструкций и имели похожую методику тестирования и оценки. Это в основном связано с тем, что между Канадой и США присутствует значительный товарооборот в области поставок светопрозрачных конструкций и, естественно, что Заказчики в США заинтересованы в получении продукции, отвечающей требованиям стандартов США.

На основании данного стандарта были выработаны четыре класса соответствия, или возможно стоит назвать их еще классами качества. Эти классы обозначены соответственно **R**, **LC**, **CW** и **AW** и относятся к окнам и дверям. Стеклянные кровли, окна на кровле, а также некоторые другие светопрозрачные конструкции, такие как пластиковые фонари не попадают под эти классификации.

Нижеперечисленные классы светопрозрачной продукции это:

R — оконные блоки обычно используемые в индивидуальных домах;

LC — оконные изделия, используемые в малоэтажных, а также в зданиях высотой до 60 метров (до 20 этажей), это как правило многоквартирные жилые дома, где возможны значительные размеры окон и действуют более высокие нагрузки и требования к прогибам элементов окон, чем на малоэтажных зданиях;

CW — оконные изделия, используемые в малоэтажных, а также в зданиях высотой до 60 метров, где возможны значительные размеры окон и действуют более высокие нагрузки и требования к прогибам элементов окон, чем на малоэтажных зданиях, и более тяжелые условия эксплуатации (больше относится к коммерческим зданиям, нежели к жилым);

AW — оконные изделия, используемые в высотных зданиях и зданиях средней этажности от 20

до 60 этажей в высоту и выше, где действуют значительные нагрузки, предъявляются высокие требования к прогибам элементов окон, а также окна, предназначенные для использования в зданиях с интенсивным их использованием. Такие здания в Северо-американской индустрии относятся к зданиям высотным (*high-rise buildings*).

Для каждого из этих классов определены следующие требования:

PG — Класс (*Performance Grade*);

DP — Проектное давление (*Design Pressure*);

STP — Требования по способности противостоять определенным нагрузкам, конструктивные требования (*Structural Test Pressures*).

Также для каждого класса определены минимальные требования, такие как:

- максимальное давление, при котором не происходит проникновение воды;
- разрешенный объем проникающего через систему воздуха;
- допустимые прогибы элементов светопрозрачной конструкции;
- сопротивление к принудительному проникновению;
- усилие для открытия двери или окна (как правило, используется для скользящих или складывающихся дверей) а также некоторые другие параметры, которые могут быть определены Архитектором и которые необходимо учитывать при тестировании светопрозрачной продукции.

Эти требования должны быть отражены в проектной документации здания или сооружения, где Подрядчику даются четкие указания по методике тестирования смонтированной им фасадной системы, какой стандарт будет использован и какая процедура тестирования будет применена к испытываемому фасаду или его части. Это должно быть отражено или в архитектурных спецификациях к проекту или же в тендерной документации, которая должна по-прежнему быть в силе и после подписания контракта между Заказчиком и Подрядчиком. Также Подрядчик должен учитывать нагрузки, действующие на фасад, которые определены Инженером, проектирующим фасадные конструкции. Это может быть связано с ветровыми нагрузками как негативными, так и позитивными, местонахождением проектируемого здания (либо это здание находится в плотной городской застройке, либо на открытом пространстве, либо в смешанной застройке), с его высотой, конфигурацией здания, расположением оконных изделий в угловых зонах здания и т.д.

Необходимо реально представлять, что проникновение воды через фасадную конструкцию возможно при наличии трех основных факторов, которые влияют на появление воды, это:

- откуда вода поступает (источник воды);
- наличие каких-либо пространств или отверстий, через которые вода может проходить;

- сила, которая как бы толкает эту воду через отверстие.

Что касается сил, способных «проталкивать» воду через фасадную конструкцию, то это могут быть следующие:

- сила тяжести;
- капиллярное воздействие, как правило, вызываемое взаимодействием молекул воды;
- сила поверхностного натяжения воды;
- сила, возникающая в результате разницы давления снаружи и внутри помещения.

Обычно одно или два из вышеперечисленных воздействий заставляет воду проходить через конструкцию фасада, однако при значительной ветровой нагрузке во время дождя возможно участие всех вышеперечисленных сил в продвижении воды через фасадную конструкцию. В частности, в Канаде применяется термин *driving rain wind pressure* (DRWP), что означает дождь, движимый давлением ветра, который основывается на климатических изысканиях окружающей среды, проводимых соответствующими службами министерства окружающей среды и природных ресурсов Канады и рассчитывается для региона проектирования при необходимости. Скажем, если для центральных районов Канады величина DRWP не превышает 150–200 Па, то для Западного побережья Канады, региона Ванкувера эта величина достигает 500 Па, что естественно влияет на требования, предъявляемые к оконной продукции и фасадным конструкциям.

Подготовка к тестированию светопрозрачной конструкции фасада на водонепроницаемость на строительной площадке

В соответствии с действующими стандартами Канады и США на тестирование оконных конструкций на строительной площадке основополагающими документами являются ASTM E1105⁽⁹⁾, в котором подробно расписан порядок ведения теста и представление его результатов и ААМА 503⁽¹⁰⁾, который описывает методику проведения теста, принципы оценки качества тестируемой части фасада или окна, составление отчета о результатах теста. Оба эти стандарта дополняют друг друга и должны использоваться в процессе подготовки и исполнения теста для руководства.

Эти стандарты распространяются на тестирование на строительной площадке на следующие светопрозрачные конструкции фасада здания на водонепроницаемость:

- наружные окна (*punch windows*);
- навесные светопрозрачные конструкции фасада (*curtain wall*);
- самонесущие оконные блоки (*window wall*);
- светопрозрачные кровли (*skylights*);
- двери (*doors*).

Обычно при использовании однокамерного метода статического испытания наружная плоскость тестируемого светопрозрачного фасада обращена

наружу. Такая конфигурация дает полный доступ к обследованию любого из компонентов тестируемого оконного компонента и при необходимости позволяет проводить необходимый ремонт отдельных компонентов. При такой конфигурации возможно проводить тест как на проникновение воздуха, так и на проникновение воды.

Архитектор или Фасадный Консультант выбирают место проведения теста в строящемся здании. Имеет смысл проведения теста на тех этажах, где есть доступ к фасадной конструкции, как правило, это нижние этажи или оконные конструкции, расположенные на балконах, террасах, но в практике случались и случаи, когда рамка с форсунками располагалась на наружной навесной платформе с ограждением (*swingstage*). Рекомендуемая площадь тестируемой поверхности должна быть не менее 10,0 м² ^(12, 9).

Установленная оконная или остекленная фасадная конструкция должна быть полностью укомплектована, остеклена, все уплотнительные резинки и герметики (*gaskets, caulking rods, sealants*) установлены, проинспектированы перед тестированием. Тестирующий должен убедиться в том, что собранная оконная конструкция выполнена в строгом соответствии с утвержденными рабочими чертежами и не имеет никаких повреждений, которые могут повлиять на ход или результаты теста.

В тестируемое пространство должны быть включены:

- швы примыкания фасадной конструкции к смежным стенам (для США, но не для Канады, где швы примыкания к смежным конструкциям не входят в тестирование);
- типовые узлы и соединения;
- соединения компонентов каркаса или рамы;
- как минимум два остекленных элемента фасада;
- как минимум два непрозрачных (алюминиевые панели или непрозрачное стекло (*spandrel glass*)) компонента фасада, имеющих вертикальные стойки и горизонтальные ригеля);
- открывающиеся компоненты фасада необходимо изолировать, исключить из данного теста, так как они тестируются отдельно.

Тестирование на строительной площадке должно проходить до установки гипсокартона или каких-либо других строительных конструкций, которые могут закрыть от обозрения тестируемые швы и компоненты фасада. Если все-таки какие-то компоненты, мешающие обзору, уже установлены, они должны быть демонтированы и убраны с тем чтобы иметь адекватный доступ ко всем частям тестируемого фасада специалистам, проводящими тестирование. В случае, если производится тестирование части фасада, которая имеет в своем составе конструктивное остекление (*structural glazing*), тестирующая компания должна убедиться, что силикон,

использованный при конструктивном остеклении, включая герметики (*sealants*), которые обеспечивают герметизацию от проникновения воды и воздуха, приобрели достаточную прочность (*are properly cured*).

С целью снижения зависимости процедуры тестирования от возможной ветреной погоды или резкого изменения атмосферного давления во время проведения теста, очень часто используется альтернативный метод создания давления на конструкцию светопрозрачного фасада с помощью создания камеры разрежения на внутренней поверхности светопрозрачного фасада. Откачивая воздух из этой камеры создается пониженное давление на конструкцию фасада, которое как бы симулирует внешнее давление на фасад. Такой способ в настоящий момент является наиболее часто применяемым. Нижеперечисленное оборудование и материалы используемые для тестирования должны соответствовать требованиям, предъявляемым к методике проводимого теста.

Необходимое оборудование для проведения теста на водопроницаемость на строительной площадке

Следующее оборудование необходимо для проведения теста на водопроницаемость фасадной конструкции. Следует иметь ввиду, что возможно использование подобного оборудования с аналогичными характеристиками, но других производителей.

Порядок проведения теста

Данный тест может проводиться двумя путями:

1. Подача воздуха в наружную камеру для создания внешнего давления на конструкцию;
2. Откачка воздуха из внутренней камеры тестируемой конструкции для создания разницы в давлении на наружной стороне конструкции и внутренней путем создания необходимого давления во внутренней камере.

При первом варианте есть некоторые сложности по установке камеры и герметизации ее в стыке с тестируемым фасадом. Надо также учитывать, что в наружной камере должна стоять рамка с форсунками для подачи воды на фасад, а также подаваться

Номер	Наименование изделия
1	Бронзовые форсунки под шланги или трубы диаметром 1/2 дюйма (12,7 мм). В-25 форсунки — это двухкомпонентное изделие с большой поверхностью распыления. Подобные форсунки широко используются в промышленности. Угол разбрызгивания должен быть 80°, а давление подаваемой воды 30–35 psi (2,47 атмосфер). Форсунки устанавливаются в раме для создания водяной завесы перед тестируемой светопрозрачной конструкцией на расстоянии друг от друга 600 мм по горизонтали и вертикали. Рама монтируется на расстоянии 300 мм от тестируемой конструкции.  GS Nozzles SPRAY CHARACTERISTICS Full cone spray pattern with uniform distribution throughout the cone. CONSTRUCTION Two-piece body + removable insert. Available in male and female threads. The nozzle contains a patented insert with larger flow passages than older styles, and is less susceptible to clogging. TYPICAL APPLICATIONS ▶ Chemical Processing ▶ Cooling Sprays ▶ Foam Breaking ▶ Continuous Casting STANDARD MATERIALS ● Brass ● 303SS ● 316SS https://bex.com/products/7075
2	Поливочный шланг рекомендуемым диаметром 19 мм (3/4 дюйма) для подачи воды  https://www.homedepot.ca/product/swan-3-4-inch-x-75-ft-contractor-farm-hose/1000820817

Номер	Наименование изделия
3	Рама из труб диаметром 1/2 дюйма для устройства водяной завесы перед оконной системой с форсунками. Размер 10 × 10 фут (3,3 × 3,3 м) для создания водяной завесы проверяемого оконного заполнения площадью не менее 10 м². Вертикальные и горизонтальные размеры между форсунками, как правило, 2 фута или 610 мм  https://www.sprayrack.com/products/spray-rack-calibration-test-how-to-video
4	ААМА КИТ (кран с манометром, необходимый для подключения к раме водяной завесой и осуществлению контроля давления воды, подаваемой на тестируемую часть фасада)  https://shop.alabastersupply.com/aama-water-products/aama-kit/
5	Пленка полиэтиленовая толщиной порядка 0,15 мм для закрытия внутренней поверхности тестируемого фасада или окна. При проведении теста на воздухопроницаемость используется аналогичная пленка только несколько меньшей толщины, и она наклеивается на наружную поверхность тестируемого фасада
6	VEVOR Shallow Well Pump, 1.1 HP 115V, 978 GPH 131 ft Height, 69.6psi Max Pressure, Portable Stainless Steel Sprinkler Booster Jet Pumps Насос для создания дополнительного давления при подаче воды на распылительные форсунки при необходимости  VEVOR Shallow Well Pump, 1.1 HP 115V, 978 GPH 131 ft Height, 69.6psi Max Pressure, Portable Stainless Steel Sprinkler Booster Jet Pumps for Garden Lawn Irrigation system, Lake Fountain, Water Transfer Flow Rate: 16.4 GPM Product Videos  https://www.vevor.ca/jet-pump-c_11098/vevor-shallow-well-pump-portable-garden-water-jet-pump-1-1hp-978-gph-131-ft-head-p_010302030567?adp=gmc&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_id=20168407105&utm_term=&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAzoeuBhDqARIsAMdH14GtM5o-T-ZcZIUZ26RW2xu0BnmnZH3CB01aPAOVucC2pWBeUF6jlbMaAnWvEALw_wcB

Номер	Наименование изделия
7	Клейкая лента шириной 60 мм для контроля стыков полиэтиленовой пленки и примыкания ее к конструкциям светопрозрачного фасада или к смежным фасаду конструкциям 
8	AW-3000 (Automates Testing Solutions) Эта модель портативного оборудования для теста на проникновение воды и воздуха через фасадную систему. Данная модель имеет все характеристики, необходимые для проведения как теста в лабораторных условиях, так и на строительной площадке. Соответствует стандартам, предъявляемым для тестирования согласно ASTM, AAMA, CSA & NAFS  https://www.ats-equipment.com/?page_id=126
9	<i>LYCEBELL Manometer; Professional Air Pressure Meter</i> Манометр для измерения давления воздуха. 12 возможных единиц измерения (mmHg, inHg, ftH₂O, cmH₂O, inH₂O, Pa, KPa, mbar, bar, psi, Kgcm² and ozin²) три измерительные опции (Max, Min, разница давления DIF) Цифровой измерительный прибор с возможностью измерения давления ±2,999psi или ±20,68 KPa с точностью ±0,29 % FSO и разрешением до 0,001, рабочие температуры −40 °F~176 °F (−40 °C ~ 80 °C)  https://www.amazon.ca/dp/B0BVB36DGH?psc=1&ref=ppx_yo2ov_dt_b_product_details

воздух для создания давления воздушных масс на фасаде. Все это довольно сложно загерметизировать.

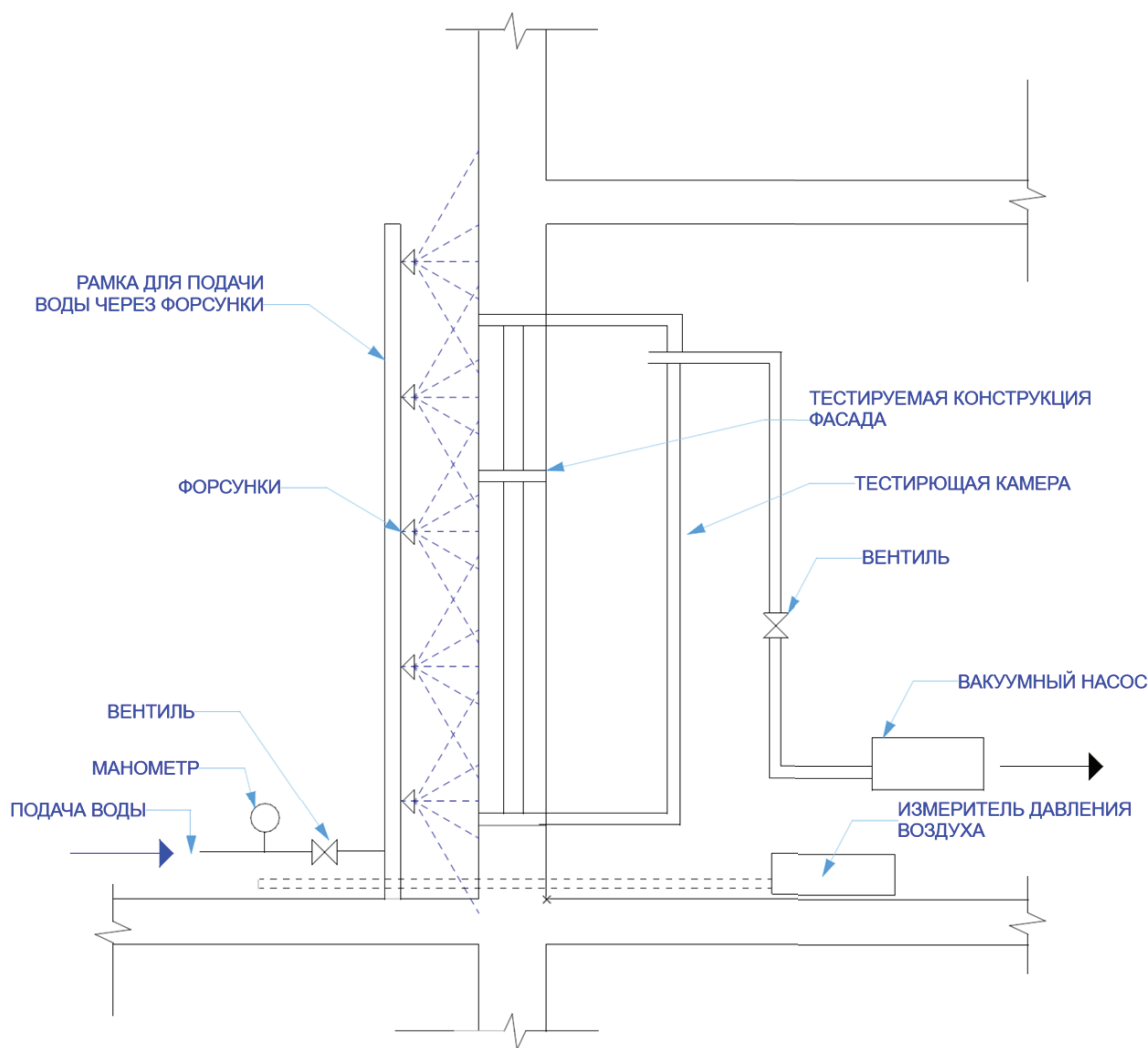
Во втором случае при устройстве внутренней камеры все несколько проще и влияние наружных погодных условий сводится к минимуму, что позволяет проводить тест в более «комфортных» для результатов теста условиях, так как при наружном устройстве камеры существует риск влияния наружных погодных условий на замеры разницы давления между наружным и внутренним воздухом при создании статического воздушного давления. При порывах ветра, которые вызывают колебания давления $\pm 10\%$, следует прекратить тест и проводить его в другое время, когда ветра нет.

По этим причинам все же более целесообразно проводить тест, используя камеру для создания давления с внутренней стороны фасадной конструкции, путем откачки воздуха из камеры и тем самым создавая внутреннее требуемое давление.

Используя вышеуказанное оборудование, техник подготавливает фрагмент фасада или окно к тесту (рис.).

Согласно ASTM E 1105⁽⁹⁾, снаружи фасада на расстоянии порядка 300 мм (± 25 мм) устанавливается рамка с форсунками, которая подключается к линии водоснабжения. Как правило, обычного давления в водопроводной сети достаточно для подачи воды к фасаду через форсунки. При недостаточном давлении используется насос, повышающий давление, указанный выше. Согласно ААМА 503⁽¹⁰⁾, давление воды, подаваемое на форсунки должно быть в пределах 30–35 psi или 2,0–2,4 атм (205–240 кПа), хотя допускается проводить тест при более низком давлении как 25 psi (170 кПа), но в этом случае в письменных результатах тестирования указывается такой факт. Обычно так происходит, когда нет возможности получить достаточное для теста давление в системе водоснабжения.

Создаваемая водяная завеса перед фасадом должна подавать минимально $3,4 \text{ L/m}^2 \cdot \text{min}$. Согласно ASTM E 1105⁽⁹⁾, подача воды в таком объеме соответствует дождевому напору 20,3 см в час. (Для информации — в 48 штатах из 51 максимальный уровень напора дождя составляет менее 12,7 см в час. Вы-



Общая схема установки оборудования по тестированию фасада на водопроницаемость

бранный напор согласно ASTM E 1105⁽⁹⁾ относится в основном к прибрежным районам Тихого и южных штатов у Атлантического океанов).

На обратной стороне фасадной конструкции устанавливается полиэтиленовая пленка, закрепленная к примыкающим конструкциям с помощью клейкой ленты, и укрепленная обрезками гипсокартона или деревянными рейками с целью предотвращения излишней деформации пленки под негативным давлением внутрь помещения. Все соединения и прохождения труб, датчиков и т.п. должны быть тщательно загерметизированы. Как на линии подачи воды, так и на линии забора воздуха должны стоять измерительные манометры для контроля давления воды и воздуха. Пленка может устанавливаться только на рамку фасадной конструкции, в этом случае швы примыкания исключаются из тестирования. Но для полноты картины установки рекомендуется делать тест вместе со швами примыкания (только для США).

Калибровка форсунок, манометров должна производиться один раз в полгода как минимум. До начала теста техник и контролирующие специалисты должны убедиться, что все поверхности тестируемой фасадной конструкции сухие, все соединения герметичны, аппаратура настроена на рабочее состояние и т.д.

Большинство светопрозрачных конструкций, описанных выше, требуют тестирования на давление 700 Паскаль. Так, например, практически все типы светопрозрачных конструкций типа R, LC, CW и должны проходить тестирование на 700 Па. Иногда окна типа R проходят тестирование на 300 или 400 Па, но это определяется чаще всего Архитектором или на основании калькулятора, которым можно пользоваться онлайн на следующем веб-сайте — <https://www.fenestrationcanada.ca/calculator>

Для высотных зданий 100 и более этажей расчетное давление определяется Инженером, проектирующим фасад совместно с Фасад Консультантом и Архитектором. В случае отсутствия в архитектурных спецификациях требований по проведению теста и используемому давлению, допускается проводить тест в соответствии с давлением, определенным по формуле

$$WTP = PDWP \times 20 \% \times 0,67,$$

где **WTP** — Water Test Pressure; **PDWP** — Positive Design Wind Pressure.

Такую методику используют обычно для зданий выше 100 этажей.

Техник, проводящий тестирование, равно как и компания, производящая тест, должна быть аккредитованы в ААМА как сертифицированная лаборатория.

Минимальное давление, при котором проводится такой тест — это 300 Па. Иногда до проведения теста на проникновение воды производится

тест на движение воздуха через систему, поэтому для определения воздухопроницаемости используется для руководства стандарт ASTM E 783⁽³⁾, а для водонепроницаемости — ASTM E 1105⁽⁹⁾. Рекомендуется до проведения теста на водонепроницаемость выполнить двухминутный «сухой тест» (*dry test*), который заключается в том, что при том же давлении, на которое проводится тест, выполняется «заполнение» системы фасада воздухом. Это позволяет убрать любые остатки воды из фасадной системы, тем самым привести тестируемый фасад в сухое состояние, исключающее дополнительное содержание воды в нем. По окончании этого теста все конструкции тестируемого фасада тщательно вытираются, и уже после этого приступают к основному тесту на проверку водонепроницаемости фасада или других конструкций, указанных выше.

Сам тест в соответствии с ASTM E 1105⁽⁹⁾ может выполняться двумя способами.

Вариант 1. Единоразовый тест.

1. Давление и объем подаваемой воды на фасадную конструкцию должны быть в соответствии с цифрами, приведенными в AAMA-WDMA-CSA 101-I. S.2-A440-11 North American Fenestration Standard-Specification for windows, doors, and skylights⁽⁸⁾ или специфицированными Архитектором.

2. Требуемое давление, на которое тестируется фасад, должно быть достигнуто в течение 15 секунд и удерживаться на протяжении 15 минут.

3. В процессе теста следует периодически осматривать фасадную конструкцию на предмет проникновения воды во внутренние плоскости элементов фасадной конструкции. При ее появлении тест останавливается, находят причины, далее устраняются по возможности на месте, и тест возобновляется, если такое решение принимает тестирующий и Консультанты. Если проникновения воды не наблюдается, то тест заканчивается через 15 минут, и соответствующий отчет о проведенном тесте составляется техником для последующего представления Девелоперу, Архитектору и Фасадному Подрядчику. Формат отчета представлен в соответствующих стандартах.

Вариант 2. Тестирование в несколько циклов, если такой тест указан в архитектурных спецификациях.

1. Давление и объем подаваемой воды на фасадную конструкцию должен быть в соответствии с пунктом 1 для Варианта 1.

2. Требуемое давление, на которое тестируется фасад, должно быть достигнуто в течение 15 секунд и удерживаться на протяжении 5 минут. Продолжая подачу воды на конструкции тестируемого фасада, сбрасывается давление до нуля и выдерживается 1 минуту.

3. Снова повторяется подъем давления до требуемого значения, на которое тестируется фасад, вы-

держивается 5 минут и снова сбрасывается до нуля на 1 минуту.

4. Такая цикличность продолжается столько раз, сколько этого требуют спецификации. Но такой тест не должен быть короче 15 минут.

5. В процессе теста производится осмотр внутренних поверхностей фасада на обнаружение протечек воды и, соответственно, принимается решение о том, удалось ли тестирование или же нет с последующим составлением отчета.

Такая практика проведения теста на строительной площадке, как правило, производится для всех оконных систем, классов LC, CW и AW. Класс R не требует проведения теста на строительной площадке. Девелопер и Архитектор, как правило, бывают удовлетворены предоставленным Подрядчиком лабораторным тестом на оконные системы класса R.

Обычно такие тесты проводятся на строительной площадке для части светопрозрачной фасадной конструкции через каждые 5–6 этажей. Для высотных зданий выше 60 этажей Архитектор и Фасад Консультант могут назначать требуемое давление для тестирования на основании расчетного ветрового давления или исходя из практики строительства в данном регионе.

Техника безопасности при проведении теста

При проведении теста обычно не происходит каких-либо значительных колебаний в давлении воды или воздуха, только если человек, устанавливающий аппаратуру для тестирования, не сделал ошибки. В таком случае возможно разрушение стекла, которое может повлечь травмирование участников теста. Поэтому следует принимать все необходимые меры к тому, чтобы такого не произошло. Надо также принять необходимые меры для предотвращения падения каких-либо инструментов или пролива воды на электрические кабели, к которым подключен вакуумный или поднимающий напор воды насос. Компания, тестирующая конструкции фасада, должна предоставить Генподрядчику письменные мероприятия по технике безопасности при проведении тестирования и получить его согласование. Остальные правила техники безопасности, предусмотренные на строительной площадке Генподрядчиком, должны неукоснительно соблюдаться всеми участниками теста. Каски, светоотражающие жилеты, строительные ботинки с защитными пластинами и носами, при работе на неогражденных участках террас или балконов обязательно использование страховочного каната и защитной упряжи, также необходимо дополнительно закрепить оборудование для тестирования с целью предотвращения его падения с высоты. Однако, как правило, Генподрядчик обеспечивает ограждающими конструкциями зону проведения теста.

Выводы

Необходимость проведения тестов на строительной площадке в США и Канаде присутствует

практически на всех многоэтажных объектах и особенно на строящихся жилых зданиях. В начале 90-х годов XX в. были многочисленные случаи в Ванкувере, когда фасады многоэтажных жилых домов просто постоянно «плакали», ведь дождь с ветром продолжается там с сентября по май. К сожалению, качество монтажа фасадных конструкций оставляло желать лучшего, использование Подрядчиками дешевой рабочей силы, отсутствие должного контроля за монтажом, изготовлением фасадных элементов привели к тому, что Правительство провинции вынуждено было обратить внимание Архитекторов, Инженеров, Фасад Консультантов на наличие проблемы, которую необходимо было решать немедленно. Это повлекло за собой дополнения в Строительный код Ванкувера, Бритиш Колумбии и в последующем и в коды других провинций, которые регламентировали проведение тестов на строительной площадке с целью убедиться, что монтаж фасадных конструкций произведен в соответствии с требованиями проекта, рабочих чертежей, и фасадная конструкция обеспечивает соответствующие параметры воздухо- и водопроницаемости, предъявляемые к данным конструкциям. В конечном итоге качество таких работ резко возросло, так как немногие Подрядчики смогли выдержать многочисленные иски владельцев зданий из-за протечек.

В России, насколько я был информирован своими коллегами, работающими в фасадной индустрии, такая практика проведения тестов на строительной площадке практически отсутствует, как и отсутствует нормативная база, которая могла бы регулировать эти процессы с целью улучшения качества строительства и конкретно фасадных конструкций.

«Гром пока не грянул», но, по всей видимости, рано или поздно случится что-то, что заставит контролирующие органы ввести такой порядок тестирования как обязательный. Но для этого необходимо подготовить нормативную базу — создать четкую классификацию светопрозрачных фасадов, окон, дверей, стеклянных крыш и т.п. Разработать требования, предъявляемые к таким фасадным компонентам в зависимости от классификации, этажности, природных нагрузок. Это большая работа, но кто-то должен ее начать и закончить. Фасады в России строятся давно, вот только нормативов пока нет, за исключением недавно появившегося ГОСТ 70941–2023, который громко заявляет о себе как «Конструкции Фасадные Светопрозрачные. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ», но больше напоминает, говоря словами одного моего коллеги, «потешные испытания из иланга при мытье фасадов перед сдачей».

К сожалению, авторы этого ГОСТа взяли за основу давно неиспользуемый в США и Канаде стандарт AAMA 501.2 Quality Assurance and Diagnostic Water Leakage Field Check of Installed Storefronts,

Curtain Walls, and Sloped Glazing Systems, который давно **не используется** Архитекторами, Фасад Консультантами как тест, дающий реальную картину качества смонтированного фасада, чаще всего принципы, описанные в этом стандарте, Подрядчик использует для предварительной оценки качества монтажа фасада до проведения официального теста с участием Архитектора, Девелопера, Инженеров и Подрядчика проводимого в соответствии с вышеуказанными ранее стандартами.

Стандарты, СНИПы, Положения, Строительные коды, упомянутые в настоящей работе или использованные в вольном переводе на русский язык стандарты зарубежных стран, а также рекомендуемая документация, регулирующая вопросы тестирования светопрозрачных конструкций фасадов

Номер	Наименование документа на языке издания
1	ASTM E 283–04 Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows Curtain Walls and Doors Under Specified Pressure Difference Across the Spicemen
2	ASTM E 330–97 Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows Curtain Wals and Doors by Uniform Static Air Pressure Difference
3	ASTM E 783–02 Standard Test Method for Field Measurements of Air Leakage Through Installed Exterior Windows and Doors
4	CSA A 440.4–07 (reaffirmed 2012) Window, door, and skylight installation
5	AAMA CWG-1–89 Installation of Aluminum Curtain Walls
6	СП 426.1325800.2020 «Конструкции ограждающие светопрозрачные зданий и сооружений. Правила проектирования»
7	СТО 22594804-002–2021
8	AAMA-WDMA-CSA 101-I. S.2-A440-11 North American Fenestration Standard-Specification for windows, doors, and skylights
9	ASTM E 1105–00 Standard Test Method for Field Determination of Water Penetration of Installed Exterior Windows, Skylights, Doors, Curtain Walls, by Uniform or Cyclic Static Air Pressure Difference
10	AAMA 503–03 Voluntary Specifications For Filed Testing of Storefronts, Curtain Walls And Sloped Glazing Systems
11	AAMA 502–02 Voluntary Specifications For Filed Testing of Windows and Sliding Glass Doors
12	AAMA 501.2–03 Quality Assurance and Diagnostic Water Leakage Field Check of Installed Storefronts, Curtain Walls, and Sloped Glazing Systems

Перечень терминов, аббревиатуры и сокращений из английского языка, используемых в данной работе и их перевод на русский язык

AAMA — (<i>American Architectural Manufacturers Association</i>)	Американская Ассоциация Производителей Ахитектурных Компонентов
ASTM — (<i>American Society for Testing and Materials</i>)	Американская национальная система стандартов для материалов, используемая в США для стандартизации используемых материалов в промышленности, строительстве и других отраслях, включая методики тестирования материалов или конструкций из них
<i>Caulking rod</i>	Уплотнительный шнур, произведенный из пористой резины, выпускаемый с различными диаметрами, устанавливаемый, как правило, между оконным блоком и конструкцией, примыкающей к оконному блоку
CSA (<i>Canadian Standards Association</i>)	Канадская ассоциация стандартизации
<i>Curtain wall</i>	Навесная оконная система, закрепленная к перекрытию в его торце и закрывающая торец перекрытия, создавая единую остекленную плоскость фасада
<i>Cured silicone</i>	Герметик, приобретший достаточную для последующей эксплуатации прочность, затвердевший герметик
DP (<i>Design Pressure</i>)	Проектное давление
DRWP (<i>Driving Rain Wind Pressure</i>)	Дождь, движимый давлением ветра
<i>Fenestration Systems</i>	Оконные системы, а также возможная комбинация их с другими компонентами фасада здания, например, дверями

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 8, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 8, 2024

Gaskets	Уплотнители между стеклом и конструкцией окна, служащие для герметизации оконного заполнения и предотвращения влияния атмосферных воздействий на внутренние помещения здания
Gateway performance requirements	Основные минимальные требования, предъявляемые к определенному типу рассматриваемой продукции при достижении которых в процессе тестирования продукции может быть присвоен тот или иной класс
NBRI (Norwegian Building Research Institute)	Норвежский Исследовательский институт в сфере строительства
PG (Performance Grade)	Класс оценки оконной продукции, показываемый в цифровом выражении, в соответствии со стандартами США либо Канады
Sealant	Герметизирующая мастика
Spandrel glass	Непрозрачное стекло на внутренней поверхности которого, обращенной в сторону помещения, нанесен специальный состав, как правило, на основе силикона
STP (Structural Test Pressures)	Требования по способности противостоять определенным нагрузкам, конструктивные требования
Structural glazing	Остекление навесной фасадной системы, выполненной без прижимных крышек со стеклом, закрепленным в алюминиевой раме за счет силиконового герметика, специально предназначенного для этой цели (т.н. конструктивное остекление)
Swingstage	Навесная платформа для работы снаружи фасада

Единицы измерения и их конвертация из Империял в Метрическую систему

1	Дюйм (inch)	25,4	мм (mm)
1	Фут (ft)	304,8	мм (mm)
1	Фут (ft)	12	дюймов (inches)
1	Фунт (pound-force, lbf)	0,4535924	кгс (kgf)
1	Фунт (pound-force, lbf)	0,00444	кН (kN)
1	Фунт на кв. фут (pound on sq. foot psf)	0,04788026	КилоПаскаль (kPa)
1	Ярд (yard)	914,4	мм (mm)
1	Ярд (yard)	3	Фут (ft)
1	BTU (British Thermal Unit)	0,0002930711	кВт/час (kWt / hour)
1	PSI (Pound per sq. inch)	6,894757	kPa
1	kPa (килопаскаль)	20,9	Psf (pound per square foot), lbf/ft²

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 (*a*, *b* и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотечных депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статьи, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия^{2...}

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 3 822 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

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 3 822 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@mgсу.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@mgсу.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgсу.ru/>



И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК

004525988

КБК

0000000000000000000130

ОКТМО

45365000

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

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК

004525988

КБК

0000000000000000000130

ОКТМО

45365000

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

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/>

