

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

Том 18. Выпуск 12
2023

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

Сквозной номер 181

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

Volume 18. Issue 12
2023

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	25.12.2023.
Подписан в свет	28.12.2023.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 22,18. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 405	

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 Банашиук, д-р, проф., Белостокский технологический университет, Республика Польша

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

Дмитрий Вячеславович Козлов, д-р техн. наук, проф., зав. каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Анна Александровна Дядичева

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Александр Дмитриевич Федотов

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	25.12.2023

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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, Wrocław University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova* **Layout:** *Aleksandr D. Fedotov*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Т.В. Иванцык, А.М. Салимов

Дом Д.А. Шепелева на Разгуляе в кругу сооружений эпохи барокко 1867

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

Ю.А. Колотовичев

Сингулярное разложение динамической реакции зданий и сооружений на элементарные составляющие. . . . 1880

В.Н. Орлов, М.В. Гасанов

Точные границы области применения приближенного решения для некоторого класса нелинейных дифференциальных уравнений в комплексной области. 1892

В.Н. Сидоров, Н.Н. Рогачева, Ю.Г. Жеглова

Пассивное гашение изгибных колебаний балки вблизи ее резонансных частот с использованием пьезоэффекта 1901

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Ф.С. Школяр, А.Г. Никитин, А.И. Зацепина

Экспериментальное исследование вклеенного вдоль волокон древесины стержня. 1915

Н.И. Шестаков, Н.В. Хохлова, Ю.Э. Васильев, У.О. Менькина

Изменение состава и свойств дорожного битума при его термостабилизации 1926

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

М.Л. Казарян, А.А. Рихтер, М.А. Шахрамьян, С.М. Григорьев

Дешифрирование депрессивных строительных объектов по данным спутниковой съемки и подспутникового мониторинга 1937

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

В.А. Наумов, Н.Р. Ахмедова

Сравнение способов определения слоя суточных осадков для расчета максимальных расходов дождевых паводков (на примере Калининградской области). 1957

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Н.Ю. Никулин, Ю.В. Елистратова

Экспериментальные исследования кожухотрубного теплообменника с цилиндрическими турбулизаторами потока. 1966

А.В. Федюхин, О.В. Афанасьева, М.Д. Зайцев

Анализ перспектив применения материалов с фазовым переходом в строительных конструкциях 1977

Д.В. Спицов, А.Г. Первов, И.А. Абросимова

Контроль соотношения одновалентных и двухвалентных ионов при подготовке питьевой воды методом нанофильтрации 1989

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

И.Г. Лукманова, Е.В. Ухалкин

Активизация внедрения технологий информационного моделирования в российской строительной отрасли. . . 2004

Т.Н. Кисель

Меры государственной поддержки внедрения технологий информационного моделирования в России. . . 2015

Н.Ю. Яськова, Л.И. Зайцева

Формирующиеся тенденции развития строительного рынка в условиях нарастающего санкционного давления 2025

Требования к оформлению научной статьи 2037

1864

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Timur V. Ivantsyk, Alexey M. Salimov

D.A. Shepelev's house in a range of baroque constructions 1867

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

Yury A. Kolotovichev

Singular value decomposition of dynamic response of structures. 1880

Victor N. Orlov, Magomedysuf V. Gasanov

**Exact boundaries of the scope of the approximate solution
for a certain class of nonlinear differential equations in the complex domain 1892**

Vladimir N. Sidorov, Nelly N. Rogacheva, Yulia G. Zheglova

Passive damping of bending vibrations of a beam near its resonance frequencies using piezoeffect 1901

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Filipp S. Shkoliar, Aleksandr G. Nikitin, Aleksandra I. Zatsepina

Experimental research of a rod glued along wood fibres 1915

Nikolay I. Shestakov, Natalia V. Khokhlova, Yuri E. Vasiliev, Uliana O. Menkina

Changes in the structure and properties of road bitumen during its thermal stabilization 1926

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Mareta L. Kazaryan, Andrey A. Richter, Mikhail A. Shakhramanyan, Sergey M. Grigoriev

**Deciphering of emergency construction objects using satellite imagery
and sub-satellite monitoring data in the Arctic. 1937**

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Vladimir A. Naumov, Natal'ya R. Ahmedova

**Comparison of methods for determining the layer of daily precipitation for calculation
of the maximum expenses of rain floods (on the example of the Kaliningrad region). 1957**

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Nikolaj Yu. Nikulin, Yulia V. Elistratova

Experimental studies of shell and tube heat exchanger with cylindrical flow turbulators 1966

Alexander V. Fedyukhin, Olga V. Afanaseva, Mark D. Zaitsev

Analysis of the prospects of phase change materials in building structures 1977

Dmitriy V. Spitsov, Alexei G. Pervov, Ivanna A. Abrosimova

Control of the ratio of monovalent and bivalent ions in drinking water treatment by nanofiltration method . . . 1989

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Inessa G. Lukmanova, Evgeny V. Ukhalkin

Activation of implementation of information modelling technologies in the Russian construction industry 2004

Tatiana N. Kisel

Measures of state support for the implementation of information modelling technologies in Russia 2015

Natalia Yu. Yaskova, Larisa I. Zaitseva

Emerging trends in the construction market under increasing sanctions pressure 2025

Requirements for research paper design 2037

1865

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 719:72

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1867-1879

Дом Д.А. Шепелева на Разгуляе в кругу сооружений эпохи барокко

Тимур Викторович Иванцык, Алексей Маратович Салимов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен один из объектов культурного наследия, формирующий архитектурный облик усадьбы Мусиных-Пушкиных на пересечении Доброслободской и Спартаковской улиц в Москве (ныне комплекс зданий Московского государственного строительного университета). Историческим ядром ансамбля на Разгуляе стал дом Д.А. Шепелева, вошедший впоследствии в состав главной постройки усадьбы Мусиных-Пушкиных. Результаты историко-архитектурных и натурных исследований были представлены в статье «Дом Д.А. Шепелева в составе главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных по материалам историко-архитектурных исследований», опубликованной в журнале «Вестник МГСУ», 2023, № 6. Основная цель исследования — проанализировать полученные в результате историко-архитектурных и натурных исследований данные в кругу аналогичных, типологически и стилистически близких строений, что позволит с наибольшей достоверностью представить подлинный облик утраченного ныне сооружения и предложить его графическую реконструкцию.

Материалы и методы. Изучение памятника основано на методе комплексного источниковедения, включающем поиск и анализ источников и подбор аналогов.

Результаты. Проведенный анализ позволил предложить реконструкцию первоначального облика дома Д.А. Шепелева с характерным для того времени барочным фасадным убранством.

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

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иванцык Т.В., Салимов А.М. Дом Д.А. Шепелева на Разгуляе в кругу сооружений эпохи барокко // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1867–1879. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1867-1879

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

D.A. Shepelev's house in a range of baroque constructions

Timur V. Ivantsyk, Alexey M. Salimov

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

ABSTRACT

Introduction. The paper is devoted to one of the objects of cultural heritage forming the architectural appearance of the Musin-Pushkin Estate at the intersection of Dobroslobodskaya and Spartakovskaya Streets in Moscow (now the complex of buildings of the Moscow State University of Civil Engineering) — the main house of the ensemble. This building has a status of federal cultural heritage object and has undergone numerous renovations and reorganizations by present time, and we can see the signs of it in the interiors and on the facades of the monument. Besides, the monument has a great construction history and includes building parts of different periods and architectural styles, which were detected as a result of historical-architectural and field studies. Thus, D.A. Shepelev's house became the core of the ensemble on "Razgulya", which later became part of the main building of Musin-Pushkin Estate. The results of the historical-architectural and field studies were considered in the article "D.A. Shepelev's house as part of the main house of the Musin-Pushkin Estate in Moscow according to the materials of historical-architectural research", published in the journal Vestnik MGSU. No. 6. 2023. The main aim of this work — to consider information from historical-architectural and field studies in a range of the similar, typologically and stylistically close constructions. This will allow to present the authentic appearance of the disappeared building with the greatest reliability and to give its graphical reconstruction.

Materials and methods. The study of the monument was based on the method of comprehensive source study, which includes the search and analysis of sources, literature, and selection of analogues. Studying of the object among stylistically

and typologically similar buildings was based on historical-architectural and field studies with using of comparative method. **Results.** As a result of the conducted research, the materials revealed in the course of historical-architectural and field studies, when considering them in the circle of analogues, received their stylistic identification and found confirmation in the considered, stylistically and typologically close buildings. The conducted analysis allowed us to propose a reconstruction of the original appearance of D.A. Shepelev's house with baroque facade decoration typical for that time.

Conclusions. The proposed reconstruction is the result of complex research, which allows to present the original appearance of the building, which became the basis for the now existing main house of the Musin-Pushkin estate, although this reconstruction does not pursue the purpose of its recreation. It only marks the original appearance of the monument and reveals one of the pages in the history of such a significant for Moscow estate complex.

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

FOR CITATION: Ivantsyk T.V., Salimov A.M. D.A. Shepelev's house in a range of baroque constructions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1867-1879. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1867-1879 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

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

верного [4] и восточного [5] флигелей, чей исторический облик был в значительной степени утрачен.

Главный дом данного комплекса также претерпел ряд преобразований (рис. 1), однако его строительную историю есть основание рассматривать в более широких хронологических рамках. В литературе, посвященной усадьбе Мусиных-Пушкиных, наличествует устоявшееся мнение, что в состав ныне существующего главного дома, созданного в 1790-е гг., входят каменные жилые палаты, которые стояли здесь еще в середине XVIII в. [6, 7], будучи выстроенными, возможно, в первой четверти XVIII столетия [8]. В этот период участок, на котором сегодня находится комплекс МГСУ, входил в состав большой усадьбы обер-гофмейстера и генерал-аншефа Д.А. Шепелева, где имелись не только деревянные, но и каменные постройки [9].



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

Fig. 1. Moscow. The main house of the Musin-Pushkin Estate in Spartakovskaya street. View of the main (western) facade from the square. Existing condition. Photo, 2021 year

Эту концепцию подтверждают и проведенные комплексные научные исследования, в ходе которых удалось выявить фрагменты стен середины XVIII в. и следы декоративно-художественного убранства фасадов утраченной постройки [10]. Анализ полученных данных позволил определиться с барочной стилистикой первоначального объема памятника (дома Д.А. Шепелева), который впоследствии вошел в состав главного сооружения усадьбы Мусиных-Пушкиных.

В результате историко-библиографических и архитектурных исследований идентифицирована строительная периодизация наиболее ранних этапов формирования усадебного комплекса на Разгуляе, где можно выделить следующие основные периоды.

I строительный период можно отнести к середине XVIII в., когда на месте существующего ныне главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных по заказу Д.А. Шепелева возводится близкое в плане к квадрату двухэтажное строение (рис. 2, 3). В таком виде оно, по всей видимости, и было зафиксировано планом 1790 г. [11].

II строительный период следует соотносить с концом 1790-х гг., когда к двум фасадам (северному и западному) дома Д.А. Шепелева были пристроены дополнительные объемы, которые увязали обновленное здание с красными линиями двух улиц, формирующих северо-западный угол домовладения [12].

III строительный период охватывает первое десятилетие XIX в. Это время кардинальной перестройки здания середины XVIII столетия [13]. Главный дом усадьбы получил П-образную в плане форму и приобрел классицистический облик, зримыми атрибутами которого стали высокий восьмиколонный портик западного фасада и изящная полуротонда на северо-восточном углу здания (рис. 4) (из материалов архитектурного обследования НИИП НИУ МГСУ). Это обновление, по сути, навсегда скрыло в недрах масштабного сооружения начала XIX в. дом Д.А. Шепелева, поэтому в рамках данной работы, опираясь в первую очередь на результаты натурных исследований, это сооружение будет рассмотрено в контексте стилистически и типологически близких построек эпохи барокко.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование данного памятника проведено с использованием комплекса методов, направленных на изучение объекта культурного наследия, его истории, этапов формирования и строительной периодизации. Особое внимание уделено подбору и анализу аналогичных построек, стилистически и типологически близких рассматриваемому памятнику. Материалами для исследования стали выявленные в ходе натурных изысканий фрагменты стен первоначального периода с остатками архитектур-

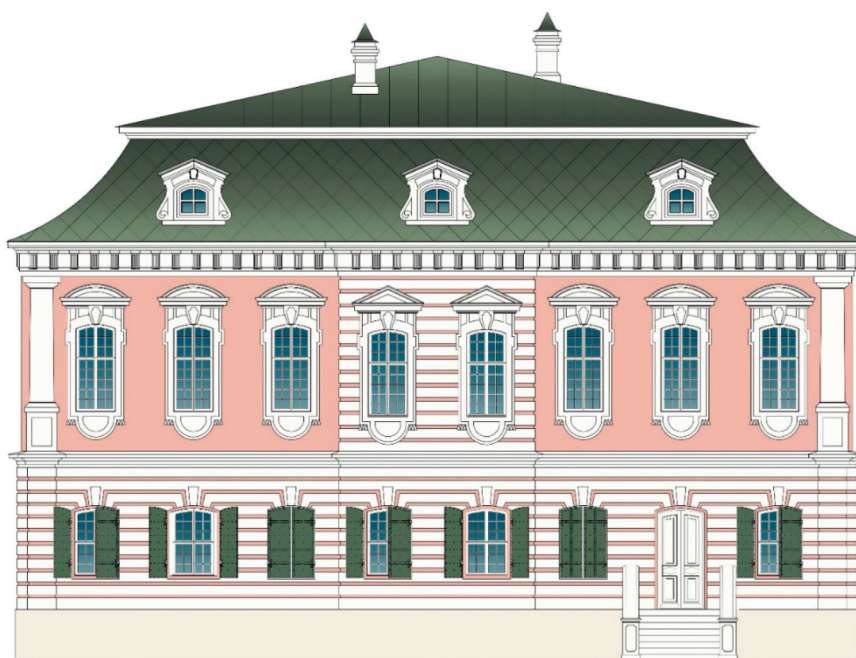


Рис. 2. Москва. Северный фасад дома Д.А. Шепелева, существовавшего на месте основной постройки усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской (Елоховской) улице. Графическая реконструкция на I строительный период (середина XVIII в.). Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 2. Moscow. The northern facade of the D.A. Shepelev's house, which existed on the site of the Musin-Pushkin estate in Spartakovskaya (Elohovskaya) street. Graphical reconstruction according to 1st construction period (middle XVIII c.). Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

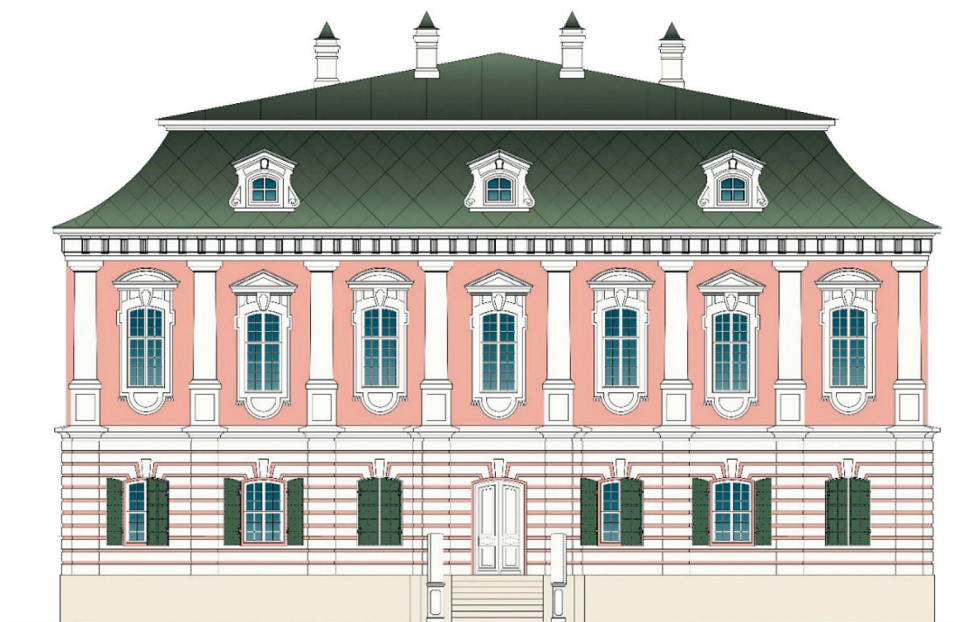


Рис. 3. Москва. Восточный фасад дома Д.А. Шепелева, существовавшего на месте основной постройки усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской (Елоховской) улице. Графическая реконструкция на I строительный период (середина XVIII в.). Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 3. Moscow. The eastern facade of the D.A. Shepelev's house, which existed on the site of the main building of the Musin-Pushkin estate in Spartakovskaya (Elohovskaya) street. Graphical reconstruction according to 1st construction period (middle XVIII c.). Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

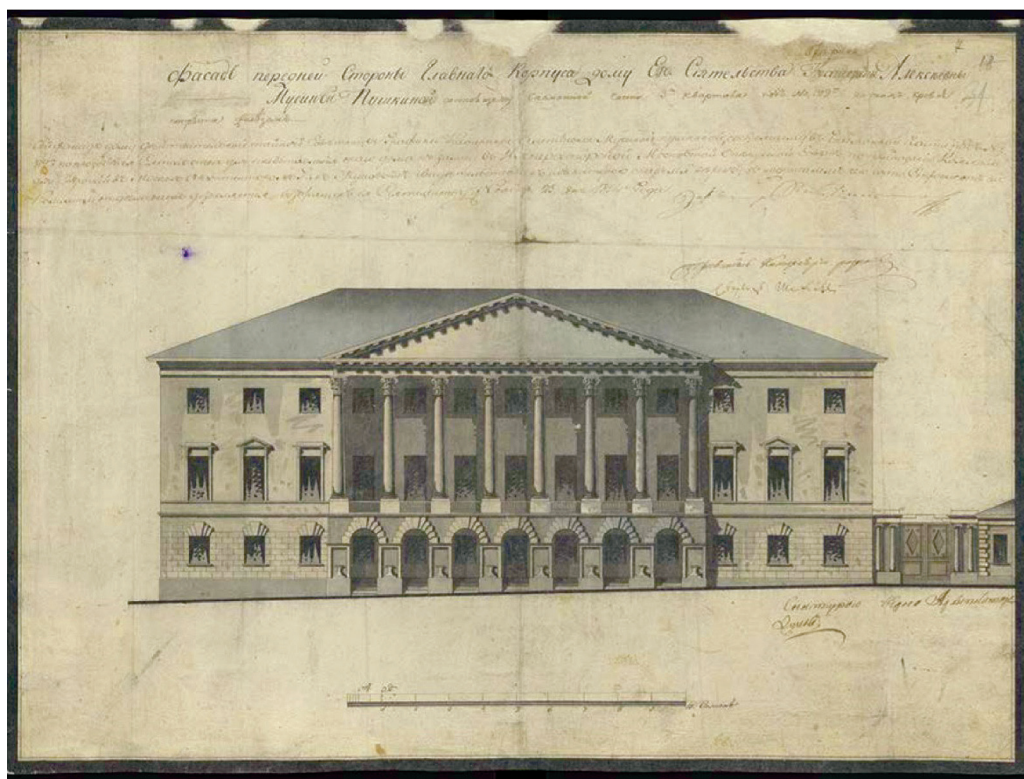


Рис. 4. Москва. Главный фасад дома усадьбы Мусиных-Пушкиных с воротами со стороны Доброслободской улицы. Середина 1830-х гг. Из материалов архитектурного обследования НИИП НИУ МГСУ

Fig. 4. Moscow. The main facade of the Musin-Pushkin Estate with gates, view from the Dobroslobodskaya street. Middle 1830th. From architectural research materials NIIP NRU MGSU

ного декора, стилистические особенности которого отличаются от общей классицистической концепции, что и легло в основу предложенной графической реконструкции исследуемого здания.

В рамках комплексного подхода проведены исследования в следующих направлениях:

1. Осуществлен поиск и проанализированы источники и литература относительно исследуемого объекта и ансамбля усадьбы в целом.

2. Используя сравнительно-исторический метод, были подобраны стилистически и типологически близкие аналоги выявленному наиболее раннему объему главного дома.

3. Подготовлена реконструкция здания, вошедшего в начале XIX в. в состав главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В конце XVIII в. широкое распространение в архитектурной практике получила перестройка старых зданий. Она производилась сообразно требованиям новой эпохи, меняющемуся укладу жизни и новым эстетическим взглядам. Во многих случаях и предполагаемому автору ансамбля на Разгуляе (М.Ф. Казакову) приходилось выполнять подобные работы [14]. Обращаясь к архитектурным альбомам М.Ф. Казакова, можно отметить ряд сооружений, которые, по словам Е.А. Белецкой, были перестроены из более ранних зданий. К таким постройкам относятся: дома С.М. Голицына и Мусиной-Пушкиной на Тверской (рис. 5, 6), а также жилое здание Пушкиной (рис. 7) и ряд других построек.

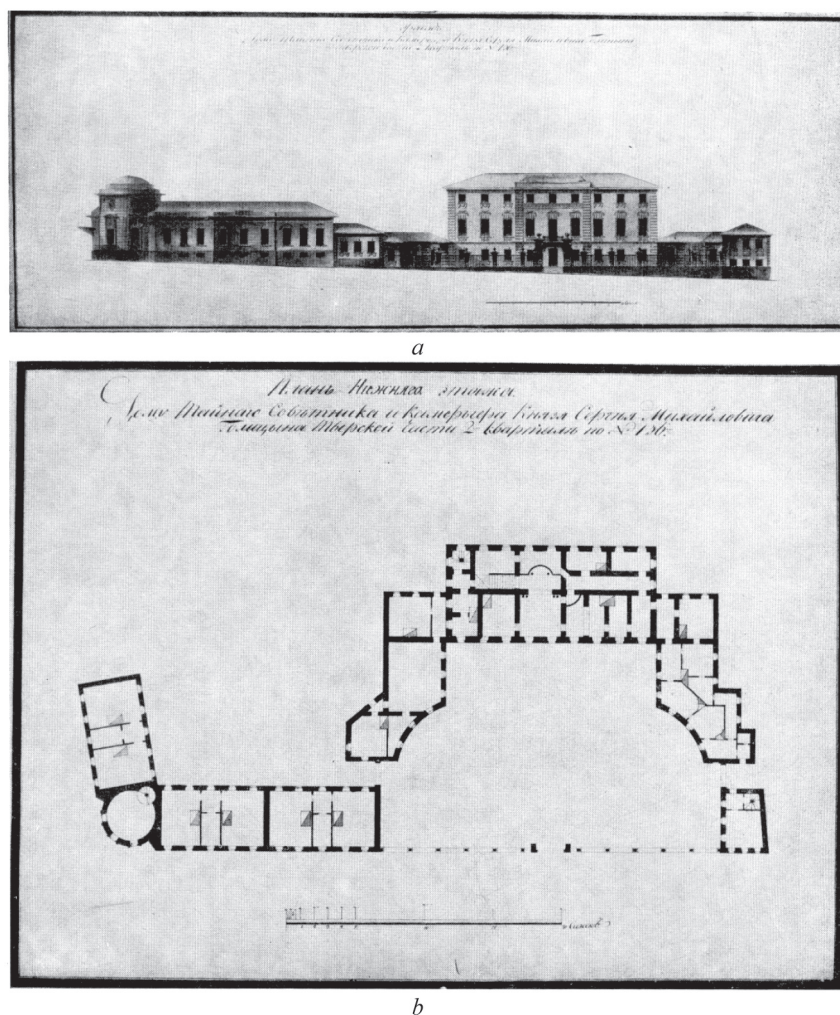


Рис. 5. Москва. Дом С.М. Голицына на Тверской: *a* — фасад; *b* — план 1-го этажа. Построен по проекту, утвержденному в 1765 г. Достроен М.Ф. Казаковым в 1797 г. В 1812 г. дом сгорел и был разобран, за исключением углового корпуса, надстроенного в середине XIX в. До настоящего времени не сохранился. Опубликовано: Белецкая Е.А. Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова. М., 1956. С. 76, 250

Fig. 5. Moscow. S.M. Golitsyn's house in Tverskaya street: *a* — facade; *b* — 1-st floor plan. The house was built according to the project approved in 1765. The construction was completed by M.F. Kazakov in 1797. In 1812 there was a fire, and the house was destroyed and disassembled, exception the corner wing, added in the middle of the XIX century. Up to the present time it has not preserved. Published: E.A. Beletskaya. Architectural albums of M.F. Kazakov. Moscow, 1956. Pp. 76, 250

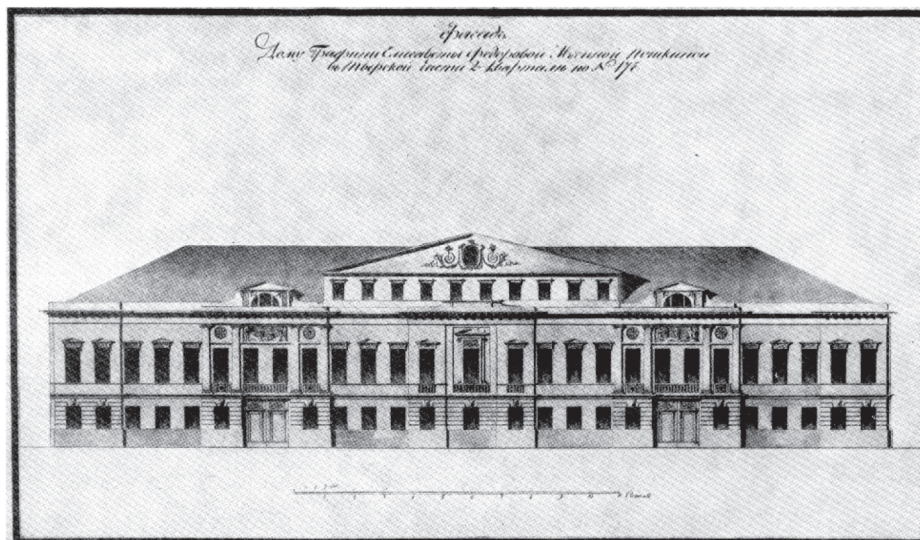


Рис. 6. Москва. Дом Мусиной-Пушкиной на Тверской. Построен М.Ф. Казаковым после 1797 г. В новое здание был включен старый дом, занимавший левую часть участка. На приведенных в альбоме поэтажных планах видны утолщения наружных стен в местах сопряжения новой и старой частей здания, неправильная форма средних комнат и сделанные для соблюдения симметрии ложные окна и ворота. Опубликовано: Белецкая Е.А. Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова. М., 1956. С. 84, 251–252

Fig. 6. Moscow. Musina-Pushkina's house in Tverskaya street. Built by M.F. Kazakov after 1797 year. The old house, occupying the left part of the land plot, became a part of the new one. The floor plans given in the album show the thickening of the outer walls in the places where the new and old parts of the building meet, the irregular shape of the middle rooms and the false windows and gates made to maintain symmetry. Published: E.A. Beletskaya. Architectural albums of M.F. Kazakov. Moscow, 1956. Pp. 84, 251–252

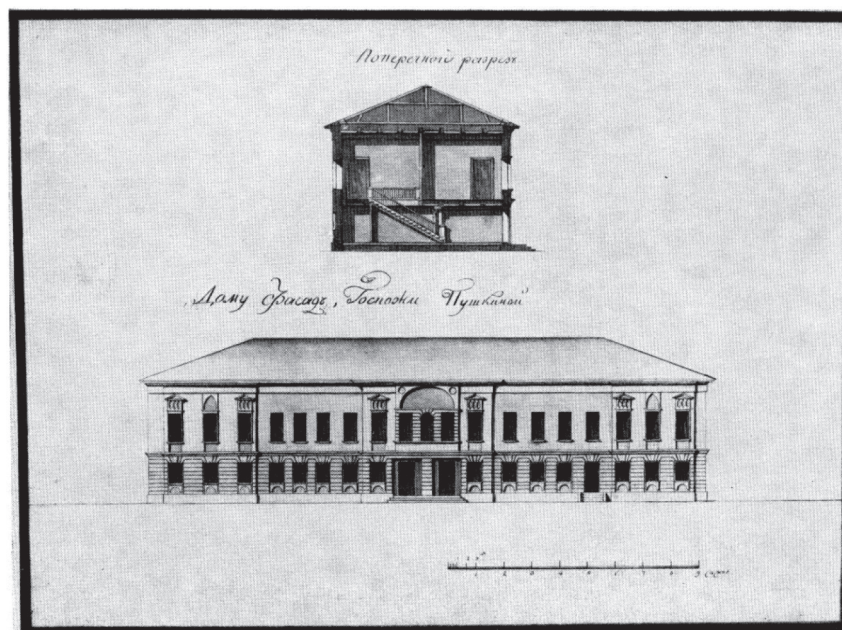


Рис. 7. Москва. Дом Пушкиной. Существующее местоположение не определено. Судя по чертежам так же, как дом Мусиной-Пушкиной на Тверской, построен с включением старого дома. На чертежах показано различие в ширине правой и левой частей здания, большое количество ложных окон и т.п. Опубликовано: Белецкая Е.А. Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова. М., 1956. С. 204, 267

Fig. 7. Moscow. Puskina's house. Existing location is not determined. Judging by the drawings, like the Musina-Pushkina House in Tverskaya street, it was built with the inclusion of the old house. The drawings show the difference in width of the right and left parts of the building, a large number of false windows, etc. Published: E.A. Beletskaya. Architectural albums of M.F. Kazakov. Moscow, 1956. Pp. 204, 267

Одним из наиболее характерных примеров перестройки здания в духе классической архитектуры является дом Дурасовой на Покровском бульваре (рис. 8). Там в конце XVIII в. была заново создана левая часть здания, включившая парадный вестибюль со свободно стоящей ротондой с колоннами и большой двусветный зал. Размеры этой пристройки рассчитаны так, чтобы при реконструкции фасада найти новые пропорциональные соотношения. Выходящий на улицу главный фасад дома был дополнен коринфским портиком, поднятым на аркаду нижнего этажа, боковыми ризалитами с барельефными вставками и балконами [15]. Дом Дурасовой после перестройки получил близкую главному дому усадьбы Мусиных-Пушкиных композицию, объемно-планировочную структуру и оформление фасадов (рис. 4).

Также ярким примером перестройки более раннего здания в эпоху классицизма может служить главный дом усадьбы Ясенево, построенный в середине XVIII столетия (по некоторым данным в 1731–1733 гг.) [16] архитектором И.Ф. Мичуриным (1700–1763). Это барочное сооружение просуществовало в своем первоизданном виде, вероятно, до рубежа XVIII–XIX вв. [16], после чего в результате проведенной реконструкции получило классицистический облик. Есть мнение, что автором проекта перестройки здания мог быть Иван Ветров, которого в отечественной историографии традиционно считают учеником М.Ф. Казакова. Однако

данная версия пока не получила документального подтверждения.

Подобная хронология прослеживается и на доме Д.А. Шепелева, который в начале XIX столетия был преобразован в главную постройку усадьбы Мусиных-Пушкиных. Но в отличие от домовладения на Разгуляе, усадебный комплекс в Ясенево уже к первой трети XX в., пострадав от пожара, пришел в запустение и во многом утратил свой первоначальный облик (рис. 9). Исчезли конструкции и элементы декоративно-художественного убранства как середины XVIII в., так и приобретенные в эпоху классицизма на рубеже XVIII–XIX вв. В результате при разработке проекта реставрации ясеневого ансамбля авторы приняли решение воссоздать объект культурного наследия на I строительный период (сердину XVIII в.) в его барочном исполнении. В данной редакции памятник можно видеть и сегодня (рис. 10).

Несмотря на столь богатую строительную историю и многочисленные переделки, главный дом усадьбы Ясенево с некоторыми допущениями можно рассматривать как один из аналогов дома Д.А. Шепелева. Также в качестве стилистически и типологически близких сооружений можно привести еще ряд, в первую очередь, московских построек. Это палаты Щербакова на Бакунинской улице (рис. 11), Птицына на Николаямской (рис. 12), дом Долгоруковых в Колпачном переулке (рис. 13), главная постройка усадьбы Грибоедова «Хмелита» (рис. 14), основное сооружение имения

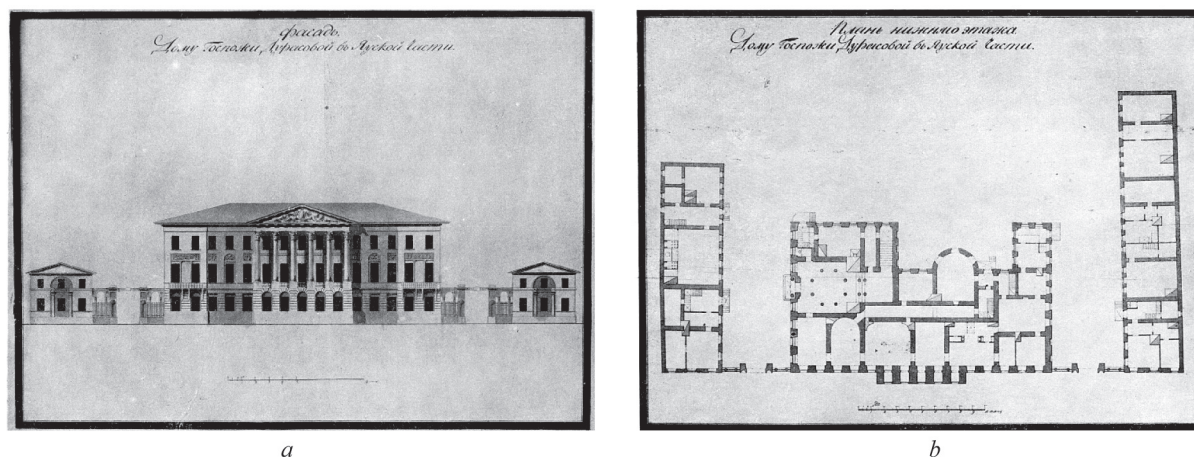


Рис. 8. Москва. Дом Дурасовой на Покровском бульваре: *a* — главный фасад; *b* — план 1-го этажа. Построен в конце XVIII в. на основе более старого здания. Поэтажные планы альбома показывают, что к старому зданию была пристроена левая часть, включившая парадный вестибюль и двусветный зал с хорами. Исследование здания в натуре, проведенное архитектором Р.П. Подольским в 1951–1952 гг. при реставрации фасада, подтвердило указания, имеющиеся в чертежах альбома. Современный адрес: Покровский бульвар, д. 11. Опубликовано: *Белецкая Е.А.* Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова. М., 1956. С. 116–118, 256

Fig. 8. Moscow. Durasova's house on Pokrovskiy boulevard: *a* — The Main facade; *b* — 1st floor plan. The house was built in the late 18th century on the basis of an older building. The floor plans of the album show that the left part was added to the old building, which included a grand entrance hall and a double-light hall with choirs. The study of the building in real life, carried out by architect R.P. Podolskiy in 1951–1952 years during facades restoration, confirmed the data from the album drawings. Modern address: Pokrovskiy b., h. 11. Published: *E.A. Beletskaya.* Architectural albums of M.F. Kazakov. Moscow, 1956. Pp. 116–118, 256



Рис. 9. Главный дом усадьбы Ясенево. 1730-е гг. Москва, Новоясеневский пр-т., д. 42, корп. 1. Фото 1925 г. фиксирует классицистический облик постройки, полученный в результате реконструкции на рубеже XVIII–XIX вв. (URL: <https://pastvu.com/p/1100837>)

Fig. 9. The main house of the Yasenevo Estate. 1730s. Bld. 1, 42, Novoyasenevsky prospekt, Moscow. The photo of 1925 year presents a classic appearance of the building, obtained as a result of the reconstruction at the turn of the 18th–19th centuries (URL: <https://pastvu.com/p/1100837>)



Рис. 10. Главный дом усадьбы Ясенево. 1730-е гг. Москва, Новоясеневский пр-т., д. 42, корп. 1. Общий вид здания после ремонтно-реставрационных работ 1970–1980-х гг.

Fig. 10. The main house of the Yasenevo Estate. 1730s. Bld. 1, 42, Novoyasenevsky prospekt, Moscow. General view of the construction after repair and restoration in 1970th–1980th

Лопасня-Зачатьевское в Чехове (рис. 15), усадебный дом Глинки (рис. 16). В данных постройках, независимо от их разнообразия и индивидуальности, можно выделить ряд элементов, аналогичных тем, что были обнаружены при исследовании дома, принадлежащего Д.А. Шепелеву. Это рустовка нижней части фасада, форма и характер исполнения оконных и дверных проемов первого этажа, наличники окон второго яруса, характер расстановки пилястр и рисунок венчающего карниза.

Опираясь на эти аналоги, стало возможным представить недостающие элементы рассматриваемой постройки. Прежде всего, это крыша главного дома, точнее ее облик. Моделируя утраченный объем, в рамках выявленной стилистики целесообразно предположить ломаную кровлю с мансардой, аналогичную той, что существует на доме Долгоруковых в Колпачном переулке (рис. 13) и главном сооружении в вяземской усадьбе Грибоедова «Хмелита» (рис. 14). Такое решение обу-



Рис. 11. Палаты Д.Н. Щербакова, XVIII в. Москва, ул. Бакунинская, д. 24. Фото 2022 г.

Fig. 11. Chambers of D.N. Scherbakov, 18 century. 24 Bakuninskaya street, Moscow. Photo 2022 year



Рис. 12. Палаты Федора Птицына. XVIII в. Москва, ул. Никольямская, д. 49, стр. 3. Фото 2022 г.

Fig. 12. Chambers of Feodor Ptitsin. 18 century. Bld. 3, 49 Nikoloyamskaya street, Moscow. Photo 2022 year



Рис. 13. Дом Долгоруковых. 1764 г. Москва, Колпачный пер., д. 6, стр. 2. Фото 2022 г.

Fig. 13. Dolgorukovy's house. 1764 year. Bld. 2, 6 Kolpachniy lane, Moscow. Photo 2022 year



Рис. 14. Главный дом усадьбы А.С. Грибоедова. 1753 г. Смоленская область, Вяземский район, село Хмелита (URL: <https://treefrog.ru/gallery/413-hmelita/>)

Fig. 14. The main house of the A.S. Griboyedov's Estate. 1753 year. Khmelita village, Vyazemskiy district, Smolensk Region (URL: <https://treefrog.ru/gallery/413-hmelita/>)



Рис. 15. Главный дом усадьбы Лопасня-Зачатьевское. 1770-е гг. Московская область, г. Чехов, ул. Пушкина, д. 10 (URL: rasfokus.ru/photos/cat/new/photo2298207.html)

Fig. 15. The main house of the Lopasnya-Zachatievskoe estate. 1770s. 10, Pushkina street, Chehov town, Moscow region (URL: rasfokus.ru/photos/cat/new/photo2298207.html)



Рис. 16. Главный дом усадьбы Глинки. 1730-е гг. Московская область, Щелковский район

Fig. 16. The main building of the Glinka's Estate. 1730s. Schelkovskiy district, Moscow region

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненная по результатам исследований реконструкция дома генерала Шепелева, вне всякого сомнения, содержит ряд допущений, однако рассмотрение ее в кругу приведенных аналогов, состоящих из хронологически, стилистически и типологически близких сооружений, дает основание

рассматривать ее в качестве наиболее вероятного облика некогда утраченного памятника.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М., 1986. С. 10–11.
2. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4 Д. 1730 1995 г. Л. 4.
3. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Ограда усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 3. С. 265–278. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.265-278.
4. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Северный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 5. С. 547–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.547-558
5. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Восточный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 10. С. 1307–1323. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1307-1323
6. ЦГА Москвы. Ф. Т-64. Оп. 1. Д. 1059. 1975 г. Л. 3.
7. Архив МГСУ. Дом Мусина-Пушкина, три флигеля и ограда. Историко-архитектурное обследование домовладения. Т. 1. М. : ООО «Арсимум», 2011. С. 52.
8. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М., 1986. С. 12.
9. Сытин П.В. Из истории московских улиц. М., 1958. С. 673.
10. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Дом Д.А. Шепелева в составе главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных по материалам историко-архитектурных исследований // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 829–840. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.829-840
11. ЦГА Москвы. Ф. 105. Оп. 1. Д. 635. 1790 г. Л. 3.
12. ЦГА Москвы. Ф. 171. Оп. 1. Д. 281. 1799 г. Л. 2.
13. ЦГА Москвы. Ф. Т. 1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 1). 1802–1804 гг. (датировку плана см.: Архив МГСУ. Дом Мусина-Пушкина, три флигеля и ограда. Историко-архитектурное обследование домовладения. Т. 1. М. : ООО «Арсимум», 2011).
14. Белецкая Е.А. Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова. М., 1956. С. 19–20.
15. Белецкая Е.А. Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова. М., 1956. С. 28.
16. Коробко М.Ю. Усадьба Ясенево. М., 2014. С. 68–71.

Поступила в редакцию 24 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 30 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 17 сентября 2023 г.

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

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

Вклад авторов:

Иванцык Т.В. — концепция исследования, натурные исследования и концепции проекта реставрации.

Салимов А.М. — научное руководство, историко-архивные и библиографические исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; Sheet 10-11. (rus.).
2. Moscow Central State Archive. Fund T-125. L. 4. File 1730. 1995; Sheet 4. (rus.).
3. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. The fence of Musin-Pushkin estate in Moscow based on historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):265-278. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.265-278 (rus.).
4. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. The north wing of the Musin-Pushkin estate in Moscow: historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):547-558. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.547-558 (rus.).
5. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. The Eastern wing of the Musin-Pushkin estate in Moscow based on historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(10):1307-1323. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1307-1323 (rus.).
6. *Moscow Central State Archive*. Fund T-64. L. 1. File 1059. 1975; Sheet 3. (rus.).
7. *Archive of the Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). The Musin-Pushkin Estate, three wings and the fence. Historical and architectural study of the house and grounds. Vol. 1. Arsimum LLC*. Moscow, 2011; 52. (rus.).
8. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; 12. (rus.).
9. Sitin P.V. *From Moscow streets history*. Moscow, 1958; 673. (rus.).
10. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. D.A. Shepelev's house as part of the main house of the Musin-Pushkin estate based on the materials of historical and architectural research. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):829-840. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.829-840 (rus.).
11. *Moscow Central State Archive*. Fund 105. L. 1. File 635. 1790; 3. (rus.).
12. *Moscow Central State Archive*. Fund 171. L. 1. File 281. 1799; 2. (rus.).
13. *Moscow Central State Archive*. Fund T-1. L. 2. File 173 (437/291; 1). 1802-1804 y. The dating of the plan can be viewed in: Archive of the MGSU. The Musin-Pushkin Estate, three wings and the fence. Historical and architectural study of the house and grounds. T. 1. Arsimum LLC. Moscow, 2011. (rus.).
14. Beletskaya E.A. *Architectural albums M.F. Kazakov*. Moscow, 1956; 19-20. (rus.).
15. Beletskaya E.A. *Architectural albums M.F. Kazakov*. Moscow, 1956; 28. (rus.).
16. Korobko M.Y. *Yasenevo Estate*. Moscow, 2014; 68-71. (rus.).

Received May 24, 2023.

Adopted in revised form on May 30, 2023.

Approved for publication on September 17, 2023.

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

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

Contribution of the authors:

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

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1880-1891

Сингулярное разложение динамической реакции зданий и сооружений на элементарные составляющие

Юрий Александрович Колотовичев^{1,2}

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

² СОДИС Лаб; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приводятся результаты декомпозиции синтезированных свободных колебаний линейной неконсервативной консольной динамической модели на элементарные составляющие с помощью сингулярного разложения матрицы перемещений.

Материалы и методы. Использовано известное представление прямоугольной матрицы в виде произведения трех матричных множителей, получившее название сингулярного разложения (Singular Value Decomposition — SVD).

Результаты. При представлении динамической реакции сооружения в определенной матричной форме результаты сингулярного разложения имеют ясную физическую интерпретацию: левые сингулярные векторы аппроксимируют собственные векторы, сингулярные значения определяют вклад отдельных форм собственных колебаний в общую динамическую реакцию, а произведения сингулярных значений и правых сингулярных векторов аппроксимируют модальные координаты колебательной системы в каждый рассматриваемый момент времени. Сингулярное разложение позволяет «автоматически» получить априорный векторный базис, основываясь на внешних проявлениях динамической реакции (перемещении, скорости или ускорении точек конструкции), в то время как традиционно используемые для этих целей собственные векторы являются базисом апостериорным, основанным на исследовании внутренних инерционных, жесткостных и демпфирующих свойств колебательной системы.

Выводы. Подтверждена возможность использования SVD матрицы перемещений для определения основных динамических параметров линейных колебательных систем: форм и частот собственных колебаний, количественных параметров демпфирования. Все этапы получения и последующего анализа элементарных составляющих динамической реакции легко автоматизируются, что дает возможность рассматривать SVD в качестве основы для разработки программного обеспечения стационарных систем динамического мониторинга строящихся и эксплуатируемых зданий и сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: динамика сооружений, операционный модальный анализ, сингулярное разложение матриц, SVD, собственные векторы, собственные частоты, демпфирование, система мониторинга конструкций, СММК, динамический мониторинг

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Колотовичев Ю.А. Сингулярное разложение динамической реакции зданий и сооружений на элементарные составляющие // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1880–1891. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1880-1891

Автор, ответственный за переписку: Юрий Александрович Колотовичев, ykol@sodislab.com.

Singular value decomposition of dynamic response of structures

Yury A. Kolotovich^{1,2}

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

² SODIS Lab; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This paper presents the results of the decomposition of the synthesized free damped vibrations of a linear cantilever dynamic model into elementary components using singular value decomposition of the displacement matrix.

Materials and methods. The well-known representation of a rectangular matrix in the form of a product of three matrix multipliers, called singular value decomposition (SVD), was used in the study.

Results. Representing the dynamic response of a structure in a certain matrix form allows for the results of the singular value decomposition to have a clear physical interpretation: the left singular vectors approximate the eigenvectors, the singular values themselves determine the contribution of individual eigenmodes to the overall dynamic response, and the products of singular values and right singular vectors approximate the modal coordinates of the dynamic system at the time under consideration. Singular value decomposition allows to “automatically” obtain an a priori vector basis based on the external manifestations of the dynamic reaction (displacement, velocity or acceleration of the points of the structure), whereas the eigenvectors traditionally used for these purposes are a posteriori basis based on the study of the internal inertia, stiffness and damping properties.

Conclusions. This study confirmed the possibility of using displacement matrix SVD to determine the major dynamic parameters of linear dynamic systems: eigenmodes, eigenfrequencies and quantitative damping parameters. All stages of obtaining and subsequent analysis of the dynamic response elementary components are easily automated, which allows to consider SVD as a basis for software development of automatic dynamic monitoring systems of structures under construction and in operation.

KEYWORDS: structural dynamics, operational modal analysis, singular value decomposition, SVD, eigenvectors, eigenfrequencies, damping, structural health monitoring, SHM, dynamic monitoring

FOR CITATION: Kolotovichev Yu.A. Singular value decomposition of dynamic response of structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1880-1891. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1880-1891 (rus.).

Corresponding author: Yury A. Kolotovichev, ykol@sodislab.com.

ВВЕДЕНИЕ

При решении прямых задач динамики сооружений инерционные, демпфирующие и упругие свойства математической модели исследуемой конструкции считаются известными (устанавливаются известными методами строительной механики). Построенная таким образом модель дает возможность определять динамические свойства сооружения и его реакцию на любые заданные воздействия.

При решении обратной задачи внутренние свойства сооружения наряду с действующей нагрузкой неизвестны, а основные динамические параметры конструкции определяют по известной реакции сооружения, которая может быть получена различными инструментальными средствами. Данный класс задач еще известен как операционный модальный анализ (operational modal analysis — ОМА) [1], основной целью которого является выявление параметров элементарных составляющих любой динамической реакции линейных систем: форм и частот собственных колебаний, а также характеристик демпфирования.

Знание действительных значений динамических параметров строящихся и эксплуатирующихся зданий и сооружений позволяет решать широкий перечень актуальных проблем, среди которых можно особо выделить: обследование и мониторинг технического состояния строительных конструкций [2–6], валидацию и калибровку компьютерных моделей [7–9], разработку цифровых двойников [10], контроль корректности принятых проектных решений [11].

В качестве исходной информации для проведения операционного модального анализа чаще всего используют инструментальные записи зависимостей перемещений, скоростей или ускорений

от времени, полученные в ограниченном (как правило, не более нескольких десятков) числе точек сооружения с помощью различных измерительных приборов (сейсмометров, велосиметров, акселерометров), и представляемые в цифровом виде [3, 4, 12, 13]. Динамическую реакцию реальных объектов всегда оказывается возможным измерить с некоторыми ошибками, вызванными как инструментальными погрешностями измерительных приборов, так и общим несовершенством методов измерения и их математической обработки, поэтому исследователям приходится иметь дело с некоторым исходным заведомо искаженным «зашумленным» дискретным сигналом.

Известные методы операционного модального анализа основаны на предварительной декомпозиции (разложении) исходного сигнала на элементарные составляющие [1, 14]. Методы принято условно разделять на два класса: декомпозиция во временной области (time domain decomposition — TDD) и декомпозиция в частотной области (frequency domain decomposition — FDD). Основой обоих классов методов является одна и та же идея о том, что любой вектор динамической реакции линейной динамической системы может быть разложен по базису векторов собственных форм колебаний. Ключевое отличие временной декомпозиции от частотной заключается в том, что первая не использует напрямую методы спектрального анализа [15], в то время как вторая базируется на исследовании частотного состава различных производных параметров исходного сигнала [16].

Исследование, результаты которого приводятся в настоящей статье, базируется на известном представлении прямоугольной матрицы в виде произведения трех матричных множителей, которое носит название сингулярное разложение (Singular Value

Decomposition — SVD) [17]. Необходимо заметить, что идея использования SVD для операционного модального анализа далеко не нова, эта техника активно используется обоими классами существующих методов [18–20], но применяется исключительно к автокорреляционным матрицам динамической реакции, что эквивалентно использованию все тех же собственных векторов в качестве базиса декомпозиции. Предлагаемое автором решение заключается в использовании SVD непосредственно к матрице динамической реакции, что эквивалентно применению иного, в общем случае отличного от форм собственных колебаний, априорного базиса разложения, который предоставляет сингулярное разложение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Динамическую реакцию произвольной колебательной системы с конечным числом n степеней свободы, рассматриваемую в m дискретных моментов времени t , всегда можно представить в виде матрицы перемещений y размерностью $n \times m$:

$$y = \begin{bmatrix} | & | & \dots & | \\ y(t_1) & y(t_2) & \dots & y(t_m) \\ | & | & \dots & | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(t_1) & y_1(t_2) & \dots & y_1(t_m) \\ y_2(t_1) & y_2(t_2) & \dots & y_2(t_m) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ y_n(t_1) & y_n(t_2) & \dots & y_n(t_m) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $y_i(t_j)$ — перемещение i -й точки системы в момент времени t_j ; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$.

Каждый столбец в матрице (1) полностью определяет деформированную форму сооружения в момент времени t_j .

Известно [21], что динамическая реакция линейных колебательных систем может быть разложена по базису системы линейно независимых векторов. При решении прямых задач динамики сооружений в качестве такого базиса обычно выбирают векторы собственных форм колебаний, тогда динамическая реакция может быть представлена суммой модальных перемещений $y_k(t)$:

$$y(t) = \sum_{k=1}^n y_k(t) = \sum_{k=1}^n Y_k \cdot q_k(t). \quad (2)$$

Уравнение (2) известно как метод разложения по формам собственных колебаний, в нем: Y_k — собственный вектор k -й формы колебаний; $q_k(t)$ — модальная амплитуда, определяющая вклад (вес) k -й формы колебаний в общее динамическое перемещение системы.

Модальные амплитуды $q_k(t)$ удобно рассматривать в качестве обобщенных (модальных) координат вектора перемещений в n -мерном пространстве, а процедуру разложения (2) — как замену пространственных координат на модальные.

Уравнение (2) можно записать в матричной форме:

$$y(t) = \begin{bmatrix} | & | & \dots & | \\ Y_1 & Y_2 & \dots & Y_n \\ | & | & \dots & | \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \vdots \\ q_n(t) \end{bmatrix} = Y \cdot \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \vdots \\ q_n(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где Y — матрица собственных векторов, размерностью $n \times n$.

С учетом выражения (3) матрица перемещений (1) может быть представлена в виде:

$$y = YQ^T, \quad (4)$$

где

$$Q^T = \begin{bmatrix} - & q_1^T & - \\ - & q_2^T & - \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ - & q_n^T & - \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1(t_1) & q_1(t_2) & \dots & q_1(t_m) \\ q_2(t_1) & q_2(t_2) & \dots & q_2(t_m) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ q_n(t_1) & q_n(t_2) & \dots & q_n(t_m) \end{bmatrix} \quad (5)$$

— транспонированная матрица состояний $n \times m$, j -й столбец которой представляет собой модальные координаты динамической системы в момент времени t_j .

Рассмотрим одну из простейших динамических моделей строительных конструкций, упругий вертикальный консольный стержень длиной L с равномерно распределенной массой, и смоделируем режим его свободных колебаний. Произвольная динамическая реакция такого стержня может быть разложена по формам собственных колебаний (рис. 1), которые определяются семейством функций [22]:

$$y_k(x) = (\cosh \beta_k x - \cos \beta_k x) + \frac{\cos \lambda_k + \cosh \lambda_k}{\sin \lambda_k + \sinh \lambda_k} \cdot (\sin \beta_k x - \sinh \beta_k x), \quad (6)$$

где собственные числа $\lambda_k = \beta_k L$ являются корнями трансцендентного частотного уравнения $\cos \lambda_k \times \cosh \lambda_k = -1$:

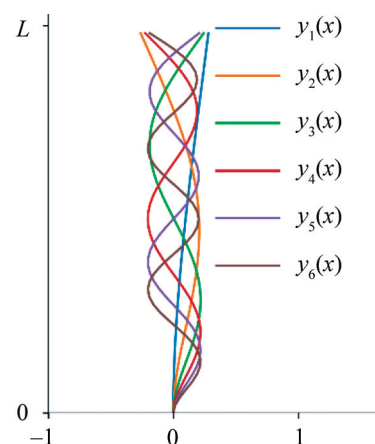


Рис. 1. Формы собственных колебаний консольного стержня с равномерно распределенной массой

Fig. 1. Eigenmodes of a cantilever beam with a uniformly distributed mass

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \beta_1 L = 0,596864\pi; \\ \lambda_2 &= \beta_2 L = 1,494180\pi; \\ \lambda_3 &= \beta_3 L = 2,500250\pi; \\ \lambda_4 &= \beta_4 L = 3,499999\pi; \\ \lambda_k &\approx \left(k - \frac{1}{2}\right)\pi, \quad k > 4.\end{aligned}\quad (7)$$

Связь собственных чисел с круговыми собственными частотами недемпфированных колебаний устанавливается формулой:

$$\omega_k = \beta_k^2 \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (8)$$

в которой EJ — изгибная жесткость стержня; m — погонная масса.

В режиме свободных колебаний при использовании модели модального демпфирования модальной амплитуды, ассоциированная с k -й формой колебаний, будет определяться выражением [23]:

$$q_k(t) = C_k \cdot e^{-\zeta_k \omega_k t} \sin(\omega_{D_k} t + \gamma_k), \quad (9)$$

где C_k — весовой коэффициент; ζ_k — безразмерный коэффициент затухания, выраженный в долях от критического коэффициента вязкости; $\omega_{D_k} = \omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2}$ — круговая частота демпфированных колебаний; γ_k — начальная фаза колебаний. Задавая различные C_k и γ_k , можно имитировать произвольные начальные условия.

Матрицу состояний (5) при использовании выражения (9) удобно представлять в виде произведения:

$$\mathbf{Q}^T = \mathbf{C} \hat{\mathbf{Q}}^T, \quad (10)$$

где

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_1 & & & \\ & C_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & C_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

— диагональная матрица амплитудных коэффициентов C_k ; $\hat{\mathbf{Q}}^T$ — безразмерная транспонированная матрица состояний, состоящая из векторов $\hat{\mathbf{q}}_k^T$, компоненты которых вычисляются по формуле (9) без учета C_k . Таким образом, задавая различные величины C_k , можно «регулировать» вклад каждой отдельной формы колебаний в общее перемещение.

Окончательно получаем для матрицы перемещений (4):

$$\begin{aligned}\mathbf{y} &= C_1 \mathbf{Y}_1 \hat{\mathbf{q}}_1^T + C_2 \mathbf{Y}_2 \hat{\mathbf{q}}_2^T + \dots + C_n \mathbf{Y}_n \hat{\mathbf{q}}_n^T = \\ &= \mathbf{Y} \mathbf{C} \hat{\mathbf{Q}}^T.\end{aligned}\quad (12)$$

С другой стороны, эффективное сингулярное разложение (SVD) прямоугольной матрицы:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} | & | & & | \\ \mathbf{y}_1 & \mathbf{y}_2 & \dots & \mathbf{y}_m \\ | & | & & | \end{bmatrix},$$

состоящей из m столбцов длиной n , имеет вид [17]:

$$\begin{aligned}\mathbf{y} &= \sigma_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{v}_1^T + \sigma_2 \mathbf{u}_2 \mathbf{v}_2^T + \dots + \sigma_m \mathbf{u}_m \mathbf{v}_m^T = \\ &= \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T,\end{aligned}\quad (13)$$

где

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} | & | & \dots & | \\ \mathbf{u}_1 & \mathbf{u}_2 & \dots & \mathbf{u}_m \\ | & | & & | \end{bmatrix} \quad (14)$$

— матрица левых сингулярных векторов;

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \sigma_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_m \end{bmatrix} \quad (15)$$

— диагональная матрица сингулярных значений;

$$\mathbf{V}^T = \begin{bmatrix} - & \mathbf{v}_1^T & - \\ - & \mathbf{v}_2^T & - \\ & \vdots & \\ - & \mathbf{v}_m^T & - \end{bmatrix} \quad (16)$$

— транспонированная матрица правых сингулярных векторов.

Матрица левых сингулярных векторов является унитарной матрицей с ортонормированными столбцами и, следовательно, может формировать базис для декомпозиции разлагаемой матрицы $\mathbf{y}$ на элементарные составляющие.

Рассмотрим консольный стержень длиной $L = 5$ м, примем модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, момент инерции поперечного сечения $J = 25$ см⁴ и массу $m = 1000$ кг/м. Дискретизируем динамическую модель с шагом 0,5 м, получив $n = 11$ точек, перемещения которых будут являться степенями свободы рассматриваемой конструкции.

Особенности динамического поведения реальных строительных конструкций позволяют учитывать небольшое $r < n$ ограниченное число форм собственных колебаний для получения приемлемой точности определения динамической реакции. Предположим, что динамическая реакция рассматриваемого стержня является суммой первых шести форм собственных колебаний (мод).

Матрица собственных векторов, вычисленная согласно формуле (6), для дискретизированной модели показана на рис. 2, а соответствующие дискретные формы колебаний — на рис. 3.

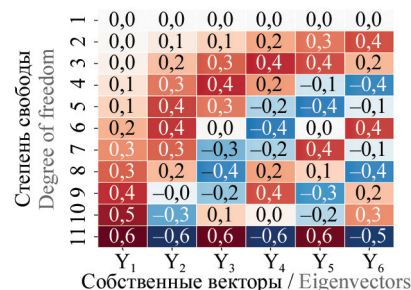


Рис. 2. Матрица собственных векторов $\mathbf{Y}$

Fig. 2. Eigenvector matrix $\mathbf{Y}$

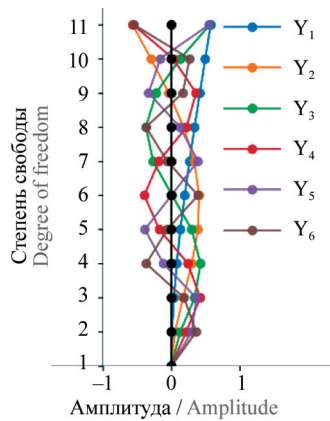


Рис. 3. Формы собственных колебаний дискретизированной динамической модели

Fig. 3. Eigenmodes of the lumped-mass dynamic model

Здесь и далее собственные векторы нормированы таким образом, чтобы они имели единичную длину, т.е. единичный результат вычисления евклидовой нормы $\|Y_k\| = 1$.

Вычислим по формуле (8) спектр собственных частот $f_k = \omega_k / 2\pi$ и зададим произвольным образом для каждой моды параметры ζ_k и γ_k . Записывая результаты в виде векторов, имеем:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}^T &= [0,16 \quad 1,01 \quad 2,84 \quad 5,57 \quad 9,22 \quad 13,77]_{[\text{Гц}]}; \\ \zeta^T &= [0,03 \quad 0,03 \quad 0,02 \quad 0,03 \quad 0,01 \quad 0,02]; \\ \gamma^T &= \left[\frac{\pi}{8} \quad \frac{\pi}{4} \quad -\frac{\pi}{2} \quad \frac{\pi}{3} \quad -\frac{\pi}{6} \quad \frac{\pi}{7} \right]_{[\text{рад.}]} \end{aligned} \quad (17)$$

Матрицу амплитудных коэффициентов C зададим таким образом (рис. 4), чтобы вклад в динамическое перемещение каждой последующей формы колебаний был меньше, чем предыдущей (что очень часто наблюдается в реальных сооружениях).

1	0	0	0	0	0
0	0,8	0	0	0	0
0	0	0,6	0	0	0
0	0	0	0,5	0	0
0	0	0	0	0,3	0
0	0	0	0	0	0,2

Рис. 4. Матрица амплитудных коэффициентов C , м

Fig. 4. Matrix of amplitude coefficients C , m

Вектор времени t для моделирования колебаний сформирован с учетом требований теоремы Котельникова – Найквиста – Шеннона [24] путем дискретизации с частотой $f_s = 40$ Гц временного промежутка $[0; 20]$ с (достаточного для реализации

трех полных циклов колебаний на частоте основного тона). Всего: 801 шаг по времени.

Безразмерная матрица состояний, полученная с учетом выражений (9) и (10), в виде тепловой карты представлена на рис. 5.

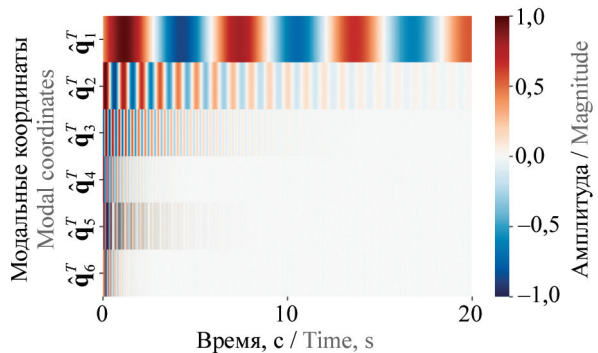


Рис. 5. Безразмерная матрица состояний $\hat{Q}^T$

Fig. 5. Dimensionless state matrix $\hat{Q}^T$

Визуализировав построчно произведения $C_k \hat{q}_k$ (рис. 6), получим зависимости модальных амплитуд (множителей к собственным векторам) от времени.

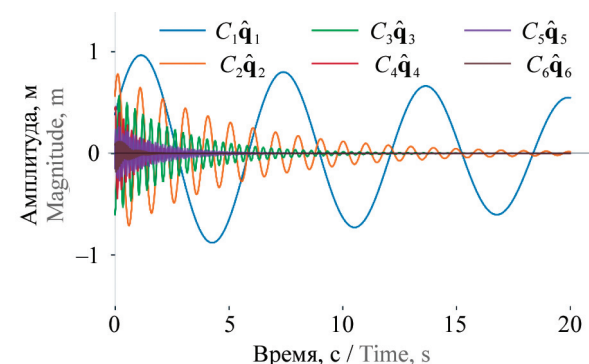


Рис. 6. Зависимость амплитуд модальных перемещений от времени, м

Fig. 6. Time dependence of modal displacement amplitudes, m

Матрица перемещений y , рассчитанная согласно выражению (12), изображена на рис. 7.

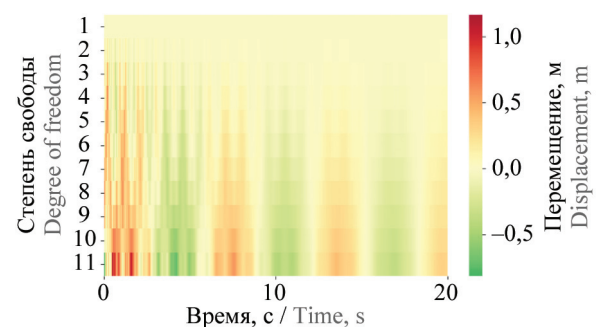


Рис. 7. Незашумленная матрица перемещений y

Fig. 7. Noise-free displacement matrix y

Воздействие помех и погрешностей при инструментальном измерении динамической реакции смоделировано добавлением к каждому компоненту матрицы перемещений 10%-ного дискретного белого шума. В результате получена зашумленная матрица перемещений (все параметры декомпозиции зашумленной матрицы перемещений авторы так же обозначают сверху знаком «тильда»), показанная на рис. 8. Визуально воздействие белого шума такого уровня практически незаметно, тем не менее его наличие скажется на результатах анализа.

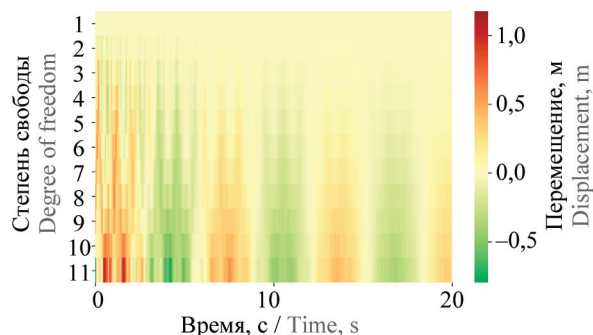


Рис. 8. Зашумленная матрица перемещений $\tilde{y}$

Fig. 8. Noisy displacement matrix $\tilde{y}$

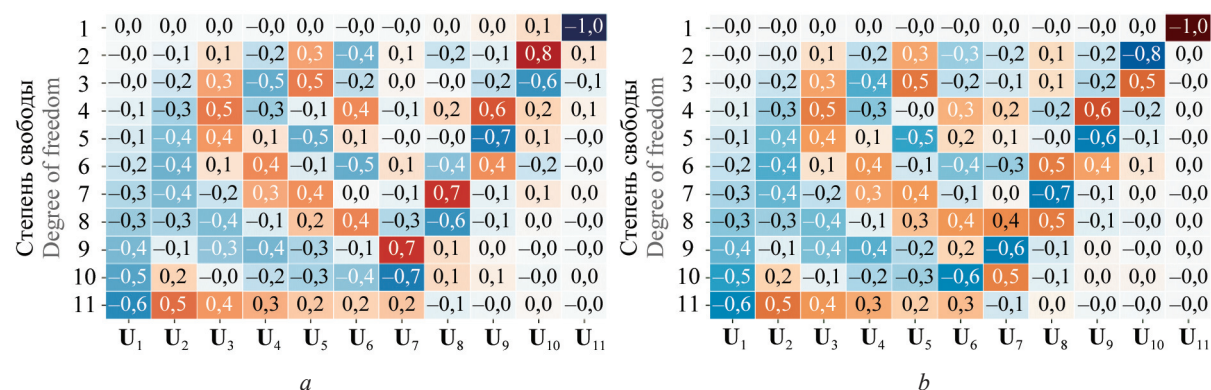


Рис. 9. Матрица U левых сингулярных векторов: a — незашумленной матрицы перемещений; b — зашумленной матрицы перемещений

Fig. 9. Left singular matrix U of the: a — noise-free displacement matrix; b — noisy displacement matrix



Рис. 10. Матрица Σ сингулярных значений: a — незашумленной матрицы перемещений; b — зашумленной матрицы перемещений

Fig. 10. Matrix Σ of singular values: a — noise-free displacement matrix; b — noisy displacement matrix

Синтезированные матрицы y и $\tilde{y}$ являются тем исходным сигналом с известной внутренней структурой, для которого производилось исследование свойств сингулярного разложения, выполненного с помощью функции *linalg.svd* библиотеки *SciPy* для языка программирования Python 3. Результаты SVD показаны на рис. 9–11.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее важным результатом является практически полное совпадение собственных векторов рассматриваемой модели с шестью первыми левыми сингулярными векторами матрицы перемещений (рис. 12). Влияние добавленного белого шума на элементы левых сингулярных векторов крайне незначительно.

График σ_k , построенный в полулогарифмическом масштабе для незашумленной матрицы (рис. 13, a), наглядно показывает ее структуру: наблюдается резкое уменьшение величины сингулярных значений, ассоциированных с теми сингулярными векторами, для которых отсутствуют соответствующие формы колебаний в исходном сигнале. Поэтому векторы U_k для $k > 6$ могут быть отброшены, что полностью соответствует физике рассматриваемого процесса.

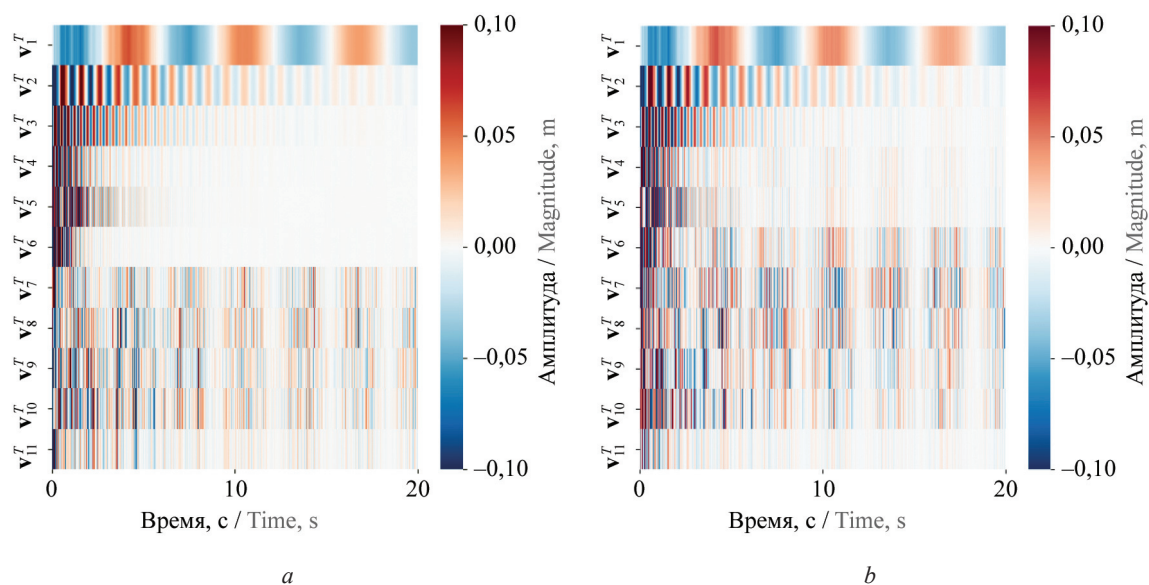


Рис. 11. Транспонированная матрица $\mathbf{V}^T$ правых сингулярных векторов: a — незашумленной матрицы перемещений; b — зашумленной матрицы перемещений

Fig. 11. Right singular matrix $\mathbf{V}^T$ of the: a — noise-free displacement matrix; b — noisy displacement matrix

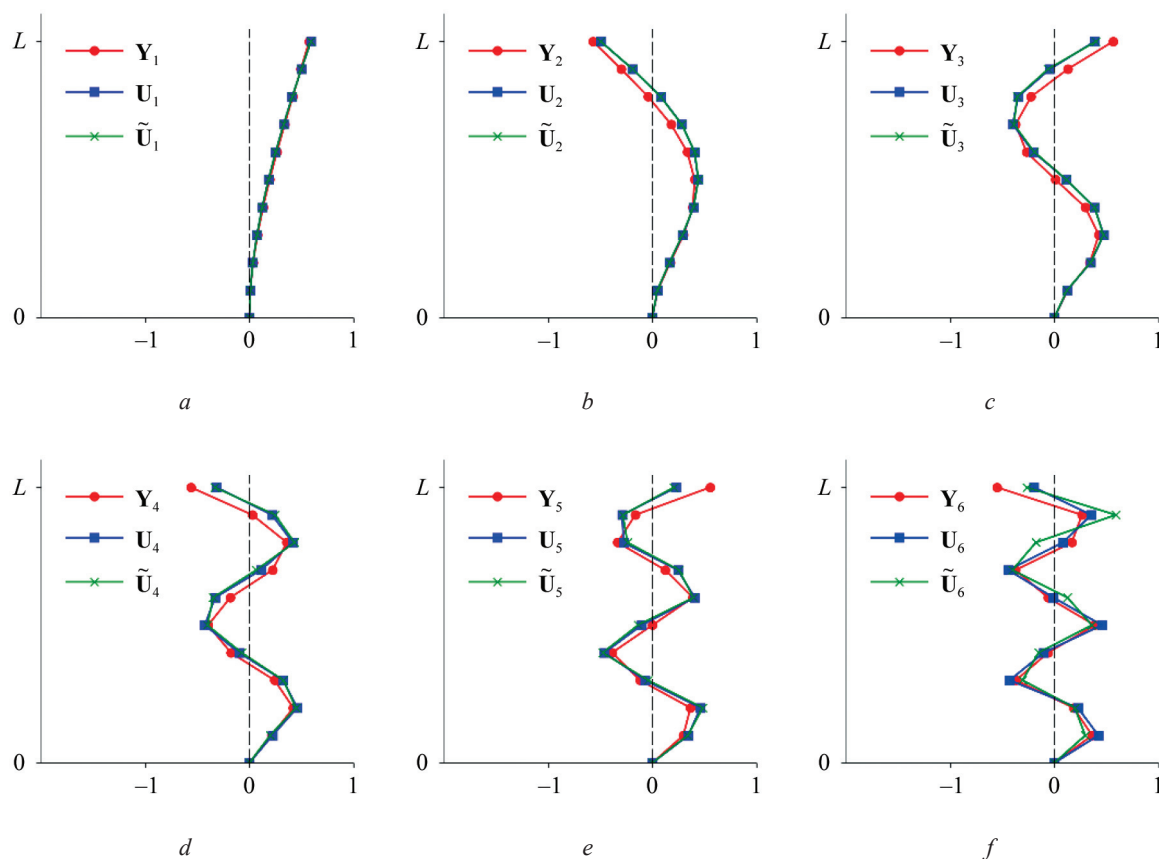


Рис. 12. Сопоставительный график динамических параметров рассматриваемой колебательной системы: $\mathbf{U}_k$ — левые сингулярные векторы незашумленной матрицы перемещений; $\tilde{\mathbf{U}}_k$ — левые сингулярные векторы зашумленной матрицы перемещений; $\mathbf{Y}_k$ — собственные векторы

Fig. 12. Comparative plot of dynamic parameters: $\mathbf{U}_k$ — left singular vectors of the noise-free displacement matrix; $\tilde{\mathbf{U}}_k$ — left singular vectors of the noisy displacement matrix; $\mathbf{Y}_k$ — eigenvectors

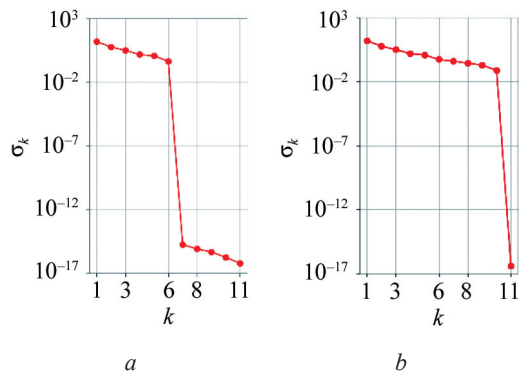


Рис. 13. Сингулярные значения σ_k : a — незашумленной матрицы перемещений; b — зашумленной матрицы перемещений

Fig. 13. Singular values σ_k of the: a — noise-free displacement matrix; b — noisy displacement matrix

Однако при наличии шума в исходной матрице по аналогичному графику (рис. 13, b) можно сделать ошибочный вывод о том, что в структуре колебаний присутствуют формы выше шестой. Другими словами, белый шум вызвал появление «паразитных» форм колебаний, которые полностью отсутствуют в исход-

ном сигнале. Очевидно, что для исключения подобных ошибок в декомпозиции необходимо получать дополнительную информацию иными методами.

Сопоставим формулы (12) и (13). Если собственный вектор $\mathbf{Y}_k$ равен левому сингулярному вектору $\mathbf{U}_k$ (совпадает геометрически и используется одинаковый способ нормирования), то справедливо следующее равенство:

$$C_k \hat{\mathbf{q}}_k = \sigma_k \mathbf{v}_k, \quad (18)$$

в котором и левую, и правую часть можно рассматривать в качестве модальной функции состояний (функции изменения модальных координат во времени). Справедливость равенства (18) подтверждена в ходе проведения численного эксперимента: модальные амплитуды незашумленной матрицы хорошо аппроксимируют модальные составляющие исходного сигнала (рис. 14).

При наличии помех шум накладывается на функцию состояний, что особенно заметно на графиках амплитуд, соответствующих высшим формам (рис. 14, e, f). Искажение амплитуд именно высших форм в рассматриваемой задаче объясняется их малым вкладом в общую динамическую реакцию, что понижает отношение «сигнал/шум».

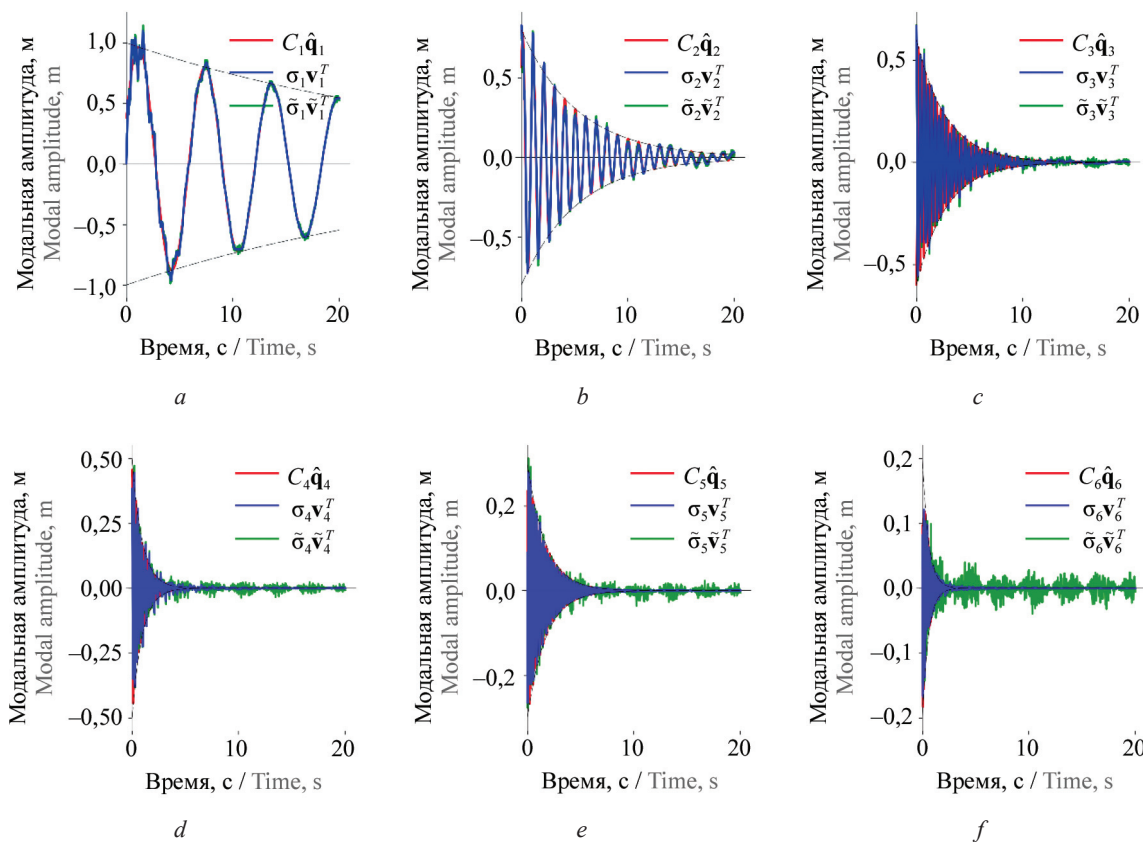


Рис. 14. Сопоставительный график функций состояний (модальных амплитуд): $C_k \hat{\mathbf{q}}_k$ — исходной матрицы перемещений; $\sigma_k \mathbf{v}_k$ — сингулярного разложения незашумленной матрицы перемещений; $\tilde{\sigma}_k \tilde{\mathbf{v}}_k$ — сингулярного разложения зашумленной матрицы перемещений

Fig. 14. Comparative plot of modal amplitudes for: $C_k \hat{\mathbf{q}}_k$ — initial displacement matrix; $\sigma_k \mathbf{v}_k$ — singular decomposition of the noise-free displacement matrix; $\tilde{\sigma}_k \tilde{\mathbf{v}}_k$ — singular decomposition of the noisy displacement matrix

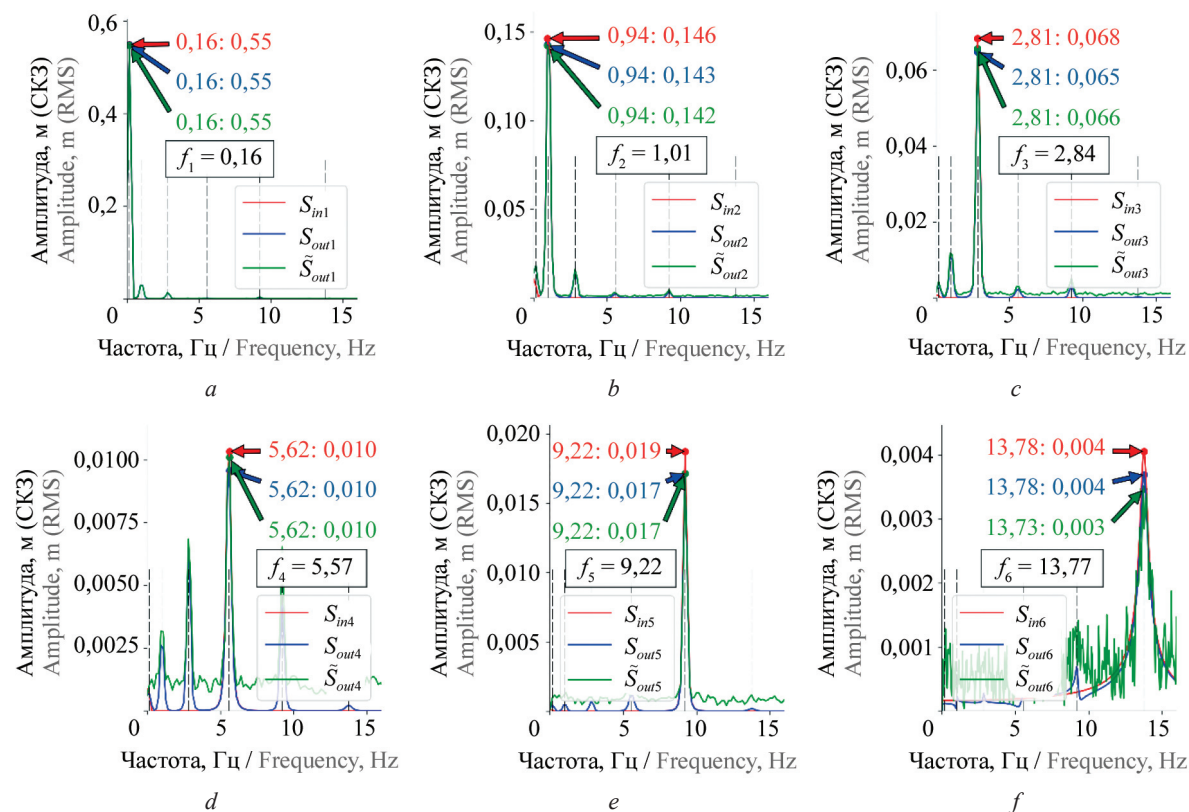


Рис. 15. Сопоставительный график спектрального состава модальных амплитуд: $S_{in,k}$ — исходной матрицы перемещений; $S_{out,k}$ — сингулярного разложения незашумленной матрицы перемещений; $\hat{S}_{out,k}$ — сингулярного разложения зашумленной матрицы перемещений; f_k — частота собственных колебаний исходного сигнала

Fig. 15. Comparative plot of modal amplitudes spectra for: $S_{in,k}$ — initial displacement matrix; $S_{out,k}$ — singular decomposition of the noise-free displacement matrix; $\hat{S}_{out,k}$ — singular decomposition of the noisy displacement matrix; f_k — eigenfrequency

Совпадение огибающих модальных амплитуд, полученных в результате сингулярного разложения, с огибающими модальными амплитудами исходного сигнала свидетельствует о равенстве параметров затухания всех шести элементарных составляющих колебательного процесса. Числовые значения коэффициентов демпфирования могут быть легко получены любым классическим методом, например путем определения логарифмического декремента затухания [25].

Исследование частотного состава модальных амплитуд выполнено методом Уэлча [26] (с применением процедуры *signal.welch* библиотеки *SciPy* для языка программирования Python 3). Спектры модальных амплитуд (рис. 15), полученных посредством сингулярного разложения, позволяют уверенно извлекать доминирующие частоты, невязка которых с частотами собственных колебаний исходного сигнала не превысила 7,5 % (рис. 15, b). При этом во всех исследуемых спектрах обнаружены частотные составляющие, соответствующие каждой из шести гармоник исходного сигнала (отмечены вертикальными пунктирными линиями на рис. 15). Этот эффект можно интерпретировать,

выражаясь фигурально, как «взаимопроникновение» элементарных составляющих колебаний. Предположительно, взаимопроникновение вызвано отличием (хотя и незначительным) базиса декомпозиции динамической реакции в процессе сингулярного разложения от собственных векторов. Тем не менее амплитуды паразитных пиков на спектрах оказываются значительно меньше доминирующей гармоник, что не препятствует решению задачи определения основных динамических параметров колебательной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Результаты численного эксперимента по декомпозиции свободных колебаний неконсервативной системы с конечным числом степеней свободы при использовании классической, допускающей разделение уравнения движения в модальных координатах, модели внутреннего трения подтверждают возможность использования сингулярного разложения матрицы перемещений для определения основ-

ных динамических параметров: форм и частот собственных колебаний, количественных параметров демпфирования.

Результаты сингулярного разложения (13) матрицы перемещений имеют ясную физическую интерпретацию: левые сингулярные векторы U_k аппроксимируют векторы собственных форм колебаний, сингулярные значения σ_k являются весовыми коэффициентами, определяющими вклад k -й формы колебаний в общую динамическую реакцию, а произведения $\sigma_k v_k$ сингулярных значений и правых сингулярных векторов аппроксимируют модальные амплитуды, которые определяют модальные координаты k -й собственной формы в каждый отдельный дискретный момент времени колебаний.

Левые сингулярные векторы не являются собственными векторами колебательной системы в том смысле, который обычно вкладывается в это понятие при решении проблемы собственных значений для системы уравнений движения. Сингулярное разложение позволяет «автоматически» получить априорный базис, основываясь на внешних проявлениях динамической реакции (перемещениях, скорости или ускорении точек конструкции), в то время как собственные векторы являются базисом апостериорным, основанным на исследовании внутренних инерционных, жесткостных и демпфирующих свойств колебательной системы.

Численные эксперименты, проведенные с моделью консольного стержня, рассмотренной в работе,

показали, что отличие соответствующих левых сингулярных и собственных векторов уменьшается при увеличении числа степеней свободы n . Бездоказательно можно предположить, что в предельном случае $n \Rightarrow \infty$ будет достигнуто строгое равенство между ними. Такой вывод кажется естественным и вполне правдоподобным, так как в предельном случае априорный базис формируется на основе максимально достоверной информации о геометрии перемещений.

Определенным недостатком сингулярного разложения служит тот факт, что порядок расположения столбцов U_k в матрице левых сингулярных векторов определяется вкладом k -й формы колебаний в суммарное перемещение (величиной сингулярного значения σ_k), а не величиной соответствующей частоты. Другими словами, порядковый номер левого сингулярного вектора в матрице может оказаться не равен порядковому номеру соответствующего собственного вектора. Однако эта проблема легко устраняется путем анализа частотного состава правых сингулярных векторов.

Результаты сингулярного разложения синтезированной динамической реакции оказались весьма устойчивыми к воздействию помех и обеспечили качественную аппроксимацию перемещений при сравнительно небольшом числе степеней свободы. Такие свойства позволяют рассматривать сингулярное разложение в качестве основы для разработки полностью автоматической стационарной системы мониторинга динамических параметров зданий и сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ghalishooyan M., Shooshtari A. Operational modal analysis techniques and their theoretical and practical aspects: A comprehensive review and introduction // IOMAC'15. 6th International Operational Modal Analysis Conference. 2015.
2. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Кайтуков Т.Б. Математическое и компьютерное моделирование в основе мониторинга зданий и сооружений. М. : АСВ, 2018. 714 с.
3. Шахрамьян А.М., Колотовичев Ю.А. Опыт использования автоматизированных систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций на Олимпийских объектах Сочи-2014 // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 92–105. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.12.92-105
4. Колотовичев Ю.А., Шахрамьян А.М. Автоматизированный мониторинг деформации несущих конструкций «Екатеринбург Арены» // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 3. С. 314–330. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.314-330
5. Rainieri C., Magalhães F., Ubertini F. Automated operational modal analysis and its applications in structural health monitoring // Shock and Vibration. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–3. DOI: 10.1155/2019/5497065
6. Grosel J., Sawicki W., Pakos W. Application of classical and operational modal analysis for examination of engineering structures // Procedia Engineering. 2014. Vol. 91. Pp. 136–141. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.035
7. Chandravanshi M.L., Mukhopadhyay A.K. Analysis of variations in vibration behavior of vibratory feeder due to change in stiffness of helical springs using FEM and EMA methods // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2017. Vol. 39. Issue 9. Pp. 3343–3362. DOI: 10.1007/s40430-017-0767-z
8. Jambovane S.R., Kalsule D.J., Athavale S.M. Validation of FE models using experimental modal analysis // SAE Technical Paper Series. 2001. DOI: 10.4271/2001-26-0042
9. Friswell M.I., Mottershead J.E. Finite element model updating in structural dynamics. Springer Dordrecht, 2010. 292 p.
10. Nicoletti V., Martini R., Carbonari S., Gara F. Operational modal analysis as a support for the development of digital twin models of bridges // Infrastructures. 2023. Vol. 8. Issue 2. P. 24. DOI: 10.3390/infrastructures8020024

11. Белостоцкий А.М., Дмитриев Д.С., Петряев С.О., Нагибович Т.Е. Расчетная оценка влияния геометрических отклонений от проекта на параметры механической безопасности многоярусных промышленных металлоконструкций (этажерок) в рамках научно-технического сопровождения строительства // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 1. С. 19–29. DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-1-19-29. EDN AEOWML.

12. Brownjohn J.M.W., Magalhaes F., Caetano E., Cunha A. Ambient vibration re-testing and operational modal analysis of the humber bridge // Engineering Structures. 2010. Vol. 32. Issue 8. Pp. 2003–2018. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.02.034

13. Devriendt C., Magalhães F., El Kafafy M., De Sitter G., Cunha A., Guillaume P. Long-term dynamic monitoring of an offshore wind turbine // Topics in Dynamics of Civil Structures. 2013. Pp. 253–267. DOI: 10.1007/978-1-4614-6555-3_28

14. Bin Zahid F., Chao Ong Z., Yee Khoo S. A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2020. Vol. 42. Issue 8. DOI: 10.1007/s40430-020-02470-8

15. Kim B.H., Stubbs N., Park T. A new method to extract modal parameters using output-only responses // Journal of Sound and Vibration. 2005. Vol. 282. Issue 1–2. Pp. 215–230. DOI: 10.1016/j.jsv.2004.02.026

16. Zhang L., Wang T., Tamura Y. A frequency–spatial domain decomposition (FSDD) method for operational modal analysis // Mechanical Systems and Signal Processing. 2010. Vol. 24. Issue 5. Pp. 1227–1239. DOI: 10.1016/j.ymssp.2009.10.024

17. Brunton S.L., Kutz J.N. Data-driven science and engineering. machine learning, dynamical systems, and control. Cambridge University Press, 2019. Pp. 3–46.

18. Brincker R., Zhang L., Andersen P. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition // Smart Materials and Structures. 2001. Vol. 10. Issue 3. Pp. 441–445. DOI: 10.1088/0964-1726/10/3/303

19. Brincker R., Andersen P., Jacobsen N.J. Automated frequency domain decomposition for operational modal analysis // IMAC-XXIV: A Conference and Exposition on Structural Dynamics Society for Experimental Mechanics. 2007.

20. Magalhães F., Caetano E., Cunha A. Operational modal analysis and finite element model correlation of the Braga Stadium suspended roof // Engineering Structures. 2008. Vol. 30. Issue 6. Pp. 1688–1698. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.11.010

21. Клаф Р., Пензиен Д. Динамика сооружений. М. : Стройиздат, 1979. 320 с.

22. Киселев В.А. Строительная механика: спец. курс. Динамика и устойчивость сооружений. М. : Стройиздат, 1980. 616 с.

23. Колотовичев Ю.А., Каракозова А.И. Основы динамики сооружений : учеб.-метод. пособие. СПб. : Научное издание, 2023. 206 с.

24. Сато Ю. Обработка сигналов. Первое знакомство. М. : Додека XXI, 2002. 175 с.

25. Wilson E.L. Static and dynamic analysis of structures: A physical approach with emphasis on earthquake engineering. Computers and Structures Inc., 2010. 394 p.

26. Welch P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. 1967. Vol. 15. Issue 2. Pp. 70–73. DOI: 10.1109/TAU.1967.1161901

Поступила в редакцию 15 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 9 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Юрий Александрович Колотовичев** — кандидат технических наук, доцент кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; директор по научной работе; **СОДИС Лаб**; 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», ул. Нобеля, д. 5; РИНЦ ID: 829386, Scopus: 57209541589, ResearcherID: AAC-3892-2022, ORCID: 0000-0002-4030-2893; ykol@sodislab.com.

REFERENCES

1. Ghalishooyan M., Shooshtari A. Operational modal analysis techniques and their theoretical and practical aspects: A comprehensive review and introduction. *IOMAC'15. 6th International Operational Modal Analysis Conference*. 2015.

2. Belostotsky A.M., Akimov P.A., Kaytukov T.B. *Mathematical and computer modeling at the heart of monitoring of buildings and structures*. Moscow, Publishing House ASV, 2018; 714. (rus.).

3. Shakhraman'yan A.M., Kolotovich Yu.A. Experience of using automated monitoring systems of the strain state of bearing structures on the olympic objects Sochi-2014. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2015; 12:92–105. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.12.92-105 (rus.).

4. Kolotovich Yu.A., Shakhramanyan A.M. An automated structural health monitoring system developed for Ekaterinburg Arena. *Vestnik MGSU [Monthly*

- Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(3):314-330. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.314-330 (rus.).
5. Rainieri C., Magalhães F., Ubertini F. Automated operational modal analysis and its applications in structural health monitoring. *Shock and Vibration*. 2019; 2019:1-3. DOI: 10.1155/2019/5497065
6. Grosel J., Sawicki W., Pakos W. Application of classical and operational modal analysis for examination of engineering structures. *Procedia Engineering*. 2014; 91:136-141. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.035
7. Chandravanshi M.L., Mukhopadhyay A.K. Analysis of variations in vibration behavior of vibratory feeder due to change in stiffness of helical springs using FEM and EMA methods. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017; 39(9):3343-3362. DOI: 10.1007/s40430-017-0767-z
8. Jambovane S.R., Kalsule D.J., Athavale S.M. Validation of FE models using experimental modal analysis. *SAE Technical Paper Series*. 2001. DOI: 10.4271/2001-26-0042
9. Friswell M.I., Mottershead J.E. *Finite element model updating in structural dynamics*. Springer Dordrecht, 2010; 292.
10. Nicoletti V., Martini R., Carbonari S., Gara F. Operational modal analysis as a support for the development of digital twin models of bridges. *Infrastructures*. 2023; 8(2):24. DOI: 10.3390/infrastructures8020024
11. Belostotsky A.M., Dmitriev D.S., Petryashev S.O., Nagibovich T.E. Calculated assessment of the impact of geometric deviations from the design on the parameters of mechanical safety of building metal structures within the framework of scientific and technical support for construction. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021; 17(1):19-29. DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-1-19-29. EDN AEOWML. (rus.).
12. Brownjohn J.M.W., Magalhães F., Caetano E., Cunha A. Ambient vibration re-testing and operational modal analysis of the Humber Bridge. *Engineering Structures*. 2010; 32(8):2003-2018. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.02.034
13. Devriendt C., Magalhães F., El Kafafy M., De Sitter G., Cunha Á., Guillaume P. Long-term dynamic monitoring of an offshore wind turbine. *Topics in Dynamics of Civil Structures*. 2013; 253-267. DOI: 10.1007/978-1-4614-6555-3_28
14. Bin Zahid F., Chao Ong Z., Yee Khoo S. A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020; 42(8). DOI: 10.1007/s40430-020-02470-8
15. Kim B.H., Stubbs N., Park T. A new method to extract modal parameters using output-only responses. *Journal of Sound and Vibration*. 2005; 282(1-2): 215-230. DOI: 10.1016/j.jsv.2004.02.026
16. Zhang L., Wang T., Tamura Y. A frequency-spatial domain decomposition (FSDD) method for operational modal analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2010; 24(5):1227-1239. DOI: 10.1016/j.ymsp.2009.10.024
17. Brunton S.L., Kutz J.N. *Data-Driven Science and Engineering. Machine Learning, Dynamical Systems, and Control*. Cambridge University Press, 2019; 3-46.
18. Brincker R., Zhang L., Andersen P. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*. 2001; 10(3):441-445. DOI: 10.1088/0964-1726/10/3/303
19. Brincker R., Andersen P., Jacobsen N.J. Automated frequency domain decomposition for operational modal analysis. *IMAC-XXIV: A Conference and Exposition on Structural Dynamics Society for Experimental Mechanics*. 2007.
20. Magalhães F., Caetano E., Cunha A. Operational modal analysis and finite element model correlation of the Braga Stadium suspended roof. *Engineering Structures*. 2008; 30(6):1688-1698. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.11.010
21. Clough R.W., Penzler J. *Dynamics of structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979; 320. (rus.).
22. Kiselev V.A. *Structural mechanics: Special course. Structural dynamics and buckling*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980; 616. (rus.).
23. Kolotovichev Yu.A., Karakozova A.I. *Elementaries of Structural Dynamics : education materias*. St. Petersburg, Naukoyomkie tehnologii Publ., 2023; 206. (rus.).
24. Sato Y. *Signal Processing. Getting Started*. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2009; 175. (rus.).
25. Wilson E.L. *Static and Dynamic Analysis of Structures: A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering*. Computers and Structures Inc. Publ., 2010; 394.
26. Welch P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967; 15(2):70-73. DOI: 10.1109/TAU.1967.1161901

Received May 15, 2023.

Adopted in revised form on May 20, 2023.

Approved for publication on September 9, 2023.

BIONOTES: Yury A. Kolotovichev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; R&D Director; **SODIS Lab**; 5 Nobel st., Skolkovo Innovation center, Moscow, 121205, Russian Federation; ID RSCI: 829386, Scopus: 57209541589, ResearcherID: AAC-3892-2022, ORCID: 0000-0002-4030-2893; ykol@sodislab.com.

Точные границы области применения приближенного решения для некоторого класса нелинейных дифференциальных уравнений в комплексной области

Виктор Николаевич Орлов, Магомедюсуф Владимирович Гасанов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается нелинейное дифференциальное уравнение третьего порядка с полиномиальной правой частью седьмой степени, описывающее волновые процессы в балках. При исследовании такого класса уравнений в общем случае неразрешимых в квадратурах авторы используют метод, позволяющий получить аналитическое приближенное решение. Данного рода исследования основаны на решении нескольких математических задач. Дано обобщение полученных ранее результатов исследования одного класса нелинейных дифференциальных уравнений с подвижными особенностями на комплексную область.

Методы и материалы. Рассматривается задача о нахождении точных границ применения приближенного решения нелинейного дифференциального уравнения в окрестности подвижной особой точки. Ранее были определены границы области применения приближенного решения на основе теоремы существования и единственности, но далее полученная область была уменьшена за счет возмущения подвижной особой точки. Используя элементы дифференциального исчисления для оценки погрешности решения, в данной работе удается расширить область применения приближенного решения и приблизить к полученной первоначально области.

Результаты. Получены точные границы области применения приближенного решения. Теоретические положения подтверждены численными расчетами, что характеризует их достоверность. Рассматривается два численных эксперимента. В первом взята точка, попадающая под предыдущую и новую, полученную в данной статье, область. Во втором — точка, попадающая лишь под действие новой теоремы.

Выводы. Авторский подход метода аналитического приближенного решения находит дальнейшее развитие на примере рассматриваемого класса нелинейных уравнений. Обобщаются результаты, полученные ранее при исследовании точных границ применения приближенного решения рассматриваемого класса уравнений в окрестности подвижной особой точки в комплексной области. Представленные исследования подтверждены с помощью численных экспериментов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аспект нелинейности, возмущение подвижной особой точки, точные границы, априорная оценка, задача Коши

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Орлов В.Н., Гасанов М.В. Точные границы области применения приближенного решения для некоторого класса нелинейных дифференциальных уравнений в комплексной области // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1892–1900. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1892-1900

Автор, ответственный за переписку: Виктор Николаевич Орлов, Orlovvn@mgsu.ru.

Exact boundaries of the scope of the approximate solution for a certain class of nonlinear differential equations in the complex domain

Victor N. Orlov, Magomedysuf V. Gasanov

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

ABSTRACT

Introduction. A nonlinear differential equation of the third order with a polynomial right part of the seventh degree describing wave processes in beams is considered. When studying this class of equations, generally unsolvable in quadrature, the authors use a method allowing to obtain an analytical approximate solution. This kind of research is based on the solution of several mathematical problems. The paper generalizes previously obtained results of the study of one class of nonlinear differential equations with moving singularities to the complex domain.

Materials and methods. The problem of finding the exact limits of application of the approximate solution of a nonlinear differential equation in the neighborhood of a moving singular point is considered. Previously, the boundaries of the application area of the approximate solution were determined on the basis of the theorem of unique existence, but further, the obtained

area was reduced due to the perturbation of the moving singular point. Applying elements of differential calculus to estimate the error of the solution, in this work, it is possible to expand the scope of the approximate solution and bring it closer to the initially obtained area.

Results. The exact boundaries of the area of application of the approximate solution are obtained. Theoretical provisions are confirmed by numerical calculations, which characterizes their reliability. Two numerical experiments are considered. In the first one, a point falling under the previous and new area obtained in this paper is taken. In the second, the point falling only under the new theorem is taken.

Conclusions. The author's approach of the method of analytical approximate solution is further developed on the example of the considered class of nonlinear equations. The paper summarizes the results obtained earlier in the research of the exact limits of application of the approximate solution of the considered class of equations in the vicinity of a moving singular point in the complex domain. The presented studies are confirmed by numerical experiments.

KEYWORDS: nonlinearity aspect, perturbation of a moving singular point, exact boundaries, a priori estimation, Cauchy problem

FOR CITATION: Orlov V.N., Gasanov M.V. Exact boundaries of the scope of the approximate solution for a certain class of nonlinear differential equations in the complex domain. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1892-1900. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1892-1900 (rus.).

Corresponding author: Victor N. Orlov, Orlovvn@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В решении многих технических задач исследователи приходят к различным дифференциальным уравнениям, как линейным, так и нелинейным. В случае линейных уравнений проблем не возникает, в случае нелинейных дифференциальных уравнений приходится учитывать некоторые аспекты этого класса уравнений, а именно наличие подвижных особых точек, что является достаточным условием невозможности в общем случае разрешить в квадратурах эти уравнения. Отметим, что все известные на данный момент классические, аналитические и численные методы непригодны для решения такого типа уравнений. Эта ситуация актуализирует развитие исследований методов решения подобных классов уравнений. Такие уравнения возникают, к примеру, при исследовании волновых процессов в эластичных балках или стержнях [1, 2], при наблюдении разрывных усилий в строительных конструкциях [3], в теплотехнике [4–6], при изучении модификационных уравнений Шредингера [7, 8]. Известны публикации разрешимости такого рода уравнений в частных случаях [9–15], развитие авторского метода в работах [16–18] и асимптотического подхода [19–22], а также метода линеаризации уравнения для нахождения различных параметров [23–26]. Следует отметить, что асимптотический подход не позволяет получить результаты, представленные в данном исследовании. В настоящей работе продолжается исследование рассматриваемого класса уравнений, представленных в работах [27–29], где на первом этапе решена задача существования и единственности решения рассматриваемого уравнения для окрестности подвижной особой точки. Затем получено аналитическое приближенное решение, доказаны априорные оценки погрешности. Далее получены результаты влияния возмущения подвижной особой точки на аналитическое приближенное решение. В ходе этих исследований наблюдается значительное уменьшение области, где возможно проведение расчетов для аналитиче-

ского приближенного решения. Применив элементы дифференциального исчисления при оценке погрешности, удастся значительно расширить эту область. В данном исследовании проводится обобщение результатов работы [29] о точных границах области применения приближенного решения некоторого класса уравнений в окрестности подвижной особой точки на комплексную область. Полученные теоретические положения подтверждены численными экспериментами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для классической задачи Коши:

$$y'''(z) = y'(z) + r(z); \quad (1)$$

$$\begin{cases} y(z_0) = y_0 \\ y'(z_0) = y_1 \\ y''(z_0) = y_2, \end{cases} \quad (2)$$

в работе [27] построено аналитическое приближенное решение для окрестности подвижной особой точки в форме:

$$y(z) = (z^* - z)^{-\frac{1}{2}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} C_n (z^* - z)^{\frac{n}{2}}. \quad (3)$$

Так как существующие на данный момент методы позволяют рассчитывать значение подвижной особой точки приближенно, то вместо выражения (3) получаем новую структуру решения:

$$\tilde{y}_N(z) = (\tilde{z}^* - z)^{-\frac{1}{2}} \cdot \sum_{n=0}^N \tilde{C}_n (\tilde{z}^* - z)^{\frac{n}{2}}, \quad (4)$$

где $\tilde{C}_n$ — возмущенные значения коэффициентов.

При оценке погрешности решения формулы (4) в работе [28] отмечаем сужение области для решения (4) по сравнению с теоремой существования в труде [27]. Применяя элемент дифференциального исчисления при оценке погрешности решения (4), удастся значительно приблизиться к области в работе [27], но для приближенного решения выражения (4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теорема

Потребуется выполнение следующих условий:

- 1) $r(z) \in C^1$ в области $|\tilde{z}^* - z| < \rho_1$, где $0 < \rho_1 = \text{const}$;
- 2) $\exists M_n : \frac{|r^{(n)}(\tilde{z}^*)|}{n!} \leq M_n, M_n = \text{const}$;
- 3) $|\tilde{z}^*| \leq |z^*|$;
- 4) выполняется следующая оценка для $|\tilde{z}^* - z^*| \leq \Delta \tilde{z}^*$;
- 5) $\Delta \tilde{z}^* < \frac{1}{(M+1)^4}$.

В этом случае приближенное решение формулы (4) задачи (1), (2) имеет следующую оценку погрешности:

$$\Delta \tilde{y}_N \leq \Delta_0 + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3,$$

в области:

$$F = F_1 \cap F_2 \cap F_3,$$

где

$$\Delta_0 \leq \frac{\sqrt[6]{15}}{2\sqrt[6]{8}} \frac{\Delta \tilde{z}^*}{|\tilde{z}_1^* - z|^{\frac{3}{2}}};$$

$$\Delta_1 \leq \frac{8M(M+1)^{2(N+1)}}{1 - (M+1)^6 |\tilde{z}^* - z|^{\frac{3}{2}}} |\tilde{z}^* - z|^{\frac{N}{2}} \times$$

$$\times \left(\frac{1}{N(N-2)(N-4)} + \frac{|\tilde{z}^* - z|^{\frac{1}{2}}}{(N+1)(N-1)(N-3)} + \frac{|\tilde{z}^* - z|}{(N+2)N(N-2)} \right)$$

в случае $N+1 = 3k$,

$$\Delta_1 \leq \frac{8M(M+1)^{2N}}{1 - (M+1)^6 |\tilde{z}^* - z|^{\frac{3}{2}}} |\tilde{z}^* - z|^{\frac{N}{2}} \times$$

$$\times \left(\frac{1}{N(N-2)(N-4)} + \frac{|\tilde{z}^* - z|^{\frac{1}{2}}}{(N+1)(N-1)(N-3)} + \frac{|\tilde{z}^* - z|}{(N+2)N(N-2)} \right)$$

для варианта $N+1 = 3k+1$, и:

$$\Delta_1 \leq \frac{8M(M+1)^{2(N-1)}}{1 - (M+1)^6 |\tilde{z}^* - z|^{\frac{3}{2}}} |\tilde{z}^* - z|^{\frac{N}{2}} \times$$

$$\times \left(\frac{1}{N(N-2)(N-4)} + \frac{|\tilde{z}^* - z|^{\frac{1}{2}}}{(N+1)(N-1)(N-3)} + \frac{|\tilde{z}^* - z|}{(N+2)N(N-2)} \right);$$

при $N+1 = 3k+2$

$$\Delta_2 \leq \frac{8\Delta M(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{3}{2}}}{1 - 2^3 (M+\Delta M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^3} \times$$

$$\times \left(1 + (M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z| + (M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^2 \right) \times$$

$$\times \left(1 + (M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{3}{2}} \right);$$

$$\Delta_3 \leq \frac{4\Delta \tilde{x}^* M(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{3}{2}}}{\left(1 - (M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{3}{2}} \right)^2} \times$$

$$\times \left(3 + (M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z| \left(7|\tilde{z}_2^* - z| + 5 \right) - 2(M+\Delta M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{5}{2}} \left(2|\tilde{z}_2^* - z| + 1 \right) \right),$$

где

$$\rho_2 = \min \left\{ \rho_1, \frac{1}{(M+1)^4}, \frac{1}{(M+\Delta M+1)^4} \right\};$$

$$M = \max \left\{ \sup_n \left\{ \frac{|r^{(n)}(\tilde{z}^*)|}{n!} \right\}, |y_0|, |y_1|, |y_2| \right\};$$

$$\Delta M = \max \left\{ \sup_n \left\{ \frac{|r^{(n)}(\tilde{z}^*)|}{n!} \right\}, |y_0|, |y_1|, |y_2| \right\} \cdot \Delta \tilde{z}^*;$$

$n = 0, 1, 2, \dots$;

$$F_1 = \left\{ z : |z| < |\tilde{z}_1^*| \right\}, F_2 = \left\{ z : |\tilde{z}_2^* - z| < \frac{1}{(M+1)^4} \right\},$$

$$F_3 = \left\{ z : |\tilde{z}_2^* - z| < \frac{1}{(M+\Delta M+1)^4} \right\},$$

$$|\tilde{z}_1^*| = |\tilde{z}^*| - \Delta \tilde{z}^*, |\tilde{z}_2^*| = |\tilde{z}^*| + \Delta \tilde{z}^*.$$

Доказательство

Основываясь на классическом подходе, имеем:

$$\Delta \tilde{y}_N(z) = |y(z) - \tilde{y}_N(z)| \leq |y(z) - \tilde{y}(z)| + |\tilde{y}(z) - \tilde{y}_N(z)|.$$

Оценим выражение $|y(z) - \tilde{y}(z)|$, используя методы дифференциального исчисления [30]:

$$|y(z) - \tilde{y}(z)| \leq \sup_U \left| \frac{\partial \tilde{y}(z)}{\partial \tilde{z}^*} \right| \Delta \tilde{z}^* + \sum_0^\infty \sup_U \left| \frac{\partial \tilde{y}(z)}{\partial \tilde{C}_n} \right| \Delta \tilde{C}_n,$$

где $U = \{z : |\tilde{z}^* - z| < \Delta \tilde{z}^*\}$.

Далее анализируем выражение:

$$\sup_U \left| \frac{\partial \tilde{y}(z)}{\partial \tilde{z}^*} \right| = \sup_U \left| \sum_0^\infty \tilde{C}_n \frac{n-1}{2} (\tilde{z}^* - z)^{\frac{n-3}{2}} \right| \leq$$

$$\leq \sum_0^\infty \sup_U |\tilde{C}_n| \frac{n-1}{2} \sup_U |\tilde{z}^* - z|^{\frac{n-3}{2}}.$$

Учитывая разложение функции $r(z)$ в регулярный ряд, по условию теоремы, $r(z) = \sum_{n=0}^\infty A_n (\tilde{z}^* - z)^n$,

можем записать в общем случае $\tilde{C}_n$ в виде $\tilde{C}_n = \tilde{C}_n(A_0, A_1, \dots, A_m)$. Напоминаем оценки для $\tilde{C}_n$ [27]:

$$|\tilde{C}_{3n}| \leq \frac{8M(M + \Delta M + 1)^{6n}}{(3n-1)(3n-3)(3n-5)};$$

$$|\tilde{C}_{3n+1}| \leq \frac{8M(M + \Delta M + 1)^{6n}}{3n(3n-2)(3n-4)};$$

$$|\tilde{C}_{3n+2}| \leq \frac{8M(M + \Delta M + 1)^{6n}}{(3n+1)(3n-1)(3n-3)}.$$

А также оценки для $\Delta \tilde{C}_n$ [28]:

$$|\Delta \tilde{C}_{3n}| \leq \frac{8\Delta M(M + \Delta M + 1)^{6n}}{(3n-1)(3n-3)(3n-5)};$$

$$|\Delta \tilde{C}_{3n+1}| \leq \frac{8\Delta M(M + \Delta M + 1)^{6n}}{3n(3n-2)(3n-4)};$$

$$|\Delta \tilde{C}_{3n+2}| \leq \frac{8\Delta M(M + \Delta M + 1)^{6n}}{(3n+1)(3n-1)(3n-3)}.$$

Теперь оценим выражение $\sup_U |\tilde{C}_n|$ с учетом рекуррентных соотношений, данных в работе [27], и, выполняя ряд преобразований, получим:

$$\begin{aligned} \sup_U |\tilde{C}_n| &\leq \tilde{C}_n(|A_0 + \Delta A_0|, |A_1 + \Delta A_1|, \dots, |A_m + \Delta A_m|) \leq \\ &\leq \frac{8M(M + \Delta M + 1)^{\left\lceil \frac{n}{3} \right\rceil}}{(n-1)(n-3)(n-5)} = T_n, \end{aligned}$$

где

$$\Delta M = \max \left\{ \sup_n \left\{ \frac{|r^{(n)}(\tilde{z}^*)|}{n!} \right\}, |y_0|, |y_1|, |y_2| \right\} \cdot \Delta \tilde{z}^*;$$

$$n = 0, 1, 2, \dots;$$

$$M = \max \left\{ \sup_n \left\{ \frac{|r^{(n)}(\tilde{z}^*)|}{n!} \right\}, |y_0|, |y_1|, |y_2| \right\}.$$

С учетом того, что

$$\sup_U |\tilde{z}^* - z|^{\frac{n-3}{2}} \leq \begin{cases} |\tilde{z}_1^* - z|^{\frac{n-3}{2}}, & n = 0, 1, 2 \\ |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{n-3}{2}}, & n > 2 \end{cases}$$

$$(\text{где } |\tilde{z}_1^*| = |\tilde{z}^*| - \Delta \tilde{z}^*, |\tilde{z}_2^*| = |\tilde{z}^*| + \Delta \tilde{z}^*);$$

$$\text{и } \sup_U \left| \frac{\partial \tilde{y}(z)}{\partial \tilde{C}_n} \right| = \sup_U |\tilde{z}^* - z|^{\frac{n-1}{2}} \leq \begin{cases} |\tilde{z}_1^* - z|^{\frac{n-1}{2}}, & n = 0 \\ |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{n-1}{2}}, & n > 0, \end{cases}$$

а также

$$C_0 = \tilde{C}_0 = \pm \sqrt[6]{\frac{15}{8}};$$

$$C_1 = C_2 = \dots = C_6 = \tilde{C}_1 = \dots = \tilde{C}_6 = 0,$$

получим следующую оценку для $|y(z) - \tilde{y}(z)|$:

$$\begin{aligned} |y(z) - \tilde{y}(z)| &\leq \sum_0^\infty \sup_U |\tilde{C}_n| \left| \frac{n-1}{2} \right| \sup_U |\tilde{z}^* - z|^{\frac{n-3}{2}} + \\ &+ \sum_7^\infty \Delta \tilde{C}_n |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{n-1}{2}} \leq \frac{\sqrt[6]{15}}{2\sqrt[6]{8}} \frac{\Delta \tilde{z}^*}{|\tilde{z}_1^* - z|^{3/2}} + \\ &+ \Delta \tilde{z}^* \sum_7^\infty \frac{n-1}{2} T_n |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{n-3}{2}} + \sum_7^\infty \Delta \tilde{C}_n |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{n-1}{2}}. \end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} |y(z) - \tilde{y}_N(z)| &\leq \frac{\sqrt[6]{15}}{2\sqrt[6]{8}} \frac{\Delta \tilde{z}^*}{|\tilde{z}_1^* - z|^{3/2}} + \\ &+ \sum_{n=N+1}^\infty |\tilde{C}_n| |\tilde{z}^* - z|^{\frac{n-1}{2}} + \sum_7^\infty \Delta \tilde{C}_n |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{n-1}{2}} + \\ &+ \Delta \tilde{z}^* \sum_7^\infty \frac{n-1}{2} T_n |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{n-3}{2}} = \Delta_0 + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3. \end{aligned}$$

Таким образом, получаем, что

$$\Delta_0 \leq \frac{\sqrt[6]{15}}{2\sqrt[6]{8}} \frac{\Delta \tilde{z}^*}{|\tilde{z}_1^* - z|^{3/2}}.$$

Для оценки Δ_1 воспользуемся теоремой второй работы [27]:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &\leq \frac{8M(M+1)^{2(N+1)}}{1 - (M+1)^6} |\tilde{z}^* - z|^{\frac{N}{2}} \times \\ &\times \left(\frac{1}{N(N-2)(N-4)} + \frac{|\tilde{z}^* - z|^{\frac{1}{2}}}{(N+1)(N-1)(N-3)} + \right. \\ &\left. + \frac{|\tilde{z}^* - z|}{(N+2)N(N-2)} \right) \end{aligned}$$

в случае $N+1 = 3k$,

$$\begin{aligned} \Delta_1 &\leq \frac{8M(M+1)^{2N}}{1 - (M+1)^6} |\tilde{z}^* - z|^{\frac{N}{2}} \times \\ &\times \left(\frac{1}{N(N-2)(N-4)} + \frac{|\tilde{z}^* - z|^{\frac{1}{2}}}{(N+1)(N-1)(N-3)} + \right. \\ &\left. + \frac{|\tilde{z}^* - z|}{(N+2)N(N-2)} \right) \end{aligned}$$

для варианта $N+1 = 3k+1$, и

$$\begin{aligned} \Delta_1 &\leq \frac{8M(M+1)^{2(N-1)}}{1 - (M+1)^6} |\tilde{z}^* - z|^{\frac{N}{2}} \times \\ &\times \left(\frac{1}{N(N-2)(N-4)} + \frac{|\tilde{z}^* - z|^{\frac{1}{2}}}{(N+1)(N-1)(N-3)} + \right. \\ &\left. + \frac{|\tilde{z}^* - z|}{(N+2)N(N-2)} \right) \end{aligned}$$

при $N+1 = 3k+2$.

Данные оценки справедливы в области

$$F_2 = \left\{ z : |\tilde{z}_2^* - z| < \frac{1}{(M+1)^4} \right\}.$$

Далее переходим к оценкам для Δ_2 :

$$\begin{aligned} \Delta_2 &\leq \sum_7^\infty |\Delta \tilde{C}_n| |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{n-1}{2}} = \sum_4^\infty |\Delta \tilde{C}_{2n}| |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{2n-1}{2}} + \\ &+ \sum_4^\infty |\Delta \tilde{C}_{2n-1}| |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{n-1}{2}} = \Delta_{21} + \Delta_{22}. \end{aligned}$$

Рассмотрим случай дробных степеней с учетом закономерности оценок для $\tilde{\Delta C}_n$ и полученных оце-

нок $\sup_U |\tilde{z}^* - z|^{\frac{n-1}{2}}$:

$$\begin{aligned} \Delta_{21} &= \sum_4^\infty |\Delta \tilde{C}_{2n}| |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{2n-1}{2}} \leq \sum_1^\infty |\Delta \tilde{C}_{6n-2}| |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{6n-3}{2}} + \\ &+ \sum_1^\infty |\Delta \tilde{C}_{6n}| |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{6n-1}{2}} + \sum_1^\infty |\Delta \tilde{C}_{6n+2}| |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{6n+1}{2}} \leq \\ &\leq \sum_1^\infty \frac{8\Delta M(M+\Delta M+1)^{12n-6}}{(6n-3)(6n-5)(6n-7)} |\tilde{z}_2^* - z|^{3n-3/2} + \\ &+ \sum_1^\infty \frac{8\Delta M(M+\Delta M+1)^{12n}}{(6n-1)(6n-3)(6n-5)} |\tilde{z}_2^* - z|^{3n-1/2} + \\ &+ \sum_1^\infty \frac{8\Delta M(M+\Delta M+1)^{12n-6}}{(6n+1)(6n-1)(6n-3)} |\tilde{z}_2^* - z|^{3n+1/2} \leq \\ &\leq \frac{8\Delta M(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{3/2}}{1-(M+\Delta M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^3} + \\ &+ \frac{8\Delta M(M+\Delta M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^{5/2}}{1-(M+\Delta M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^3} + \\ &+ \frac{8\Delta M(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{7/2}}{1-(M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^3} = \\ &= \frac{8\Delta M(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{3/2}}{1-(M+\Delta M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^3} \times \\ &\times \left(\frac{1+(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|}{+(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^2} \right). \end{aligned}$$

Аналогичная ситуация и для случая целых степеней Δ_{22} :

$$\begin{aligned} \Delta_{22} &\leq \frac{8\Delta M(M+\Delta M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^3}{1-(M+\Delta M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^3} \times \\ &\times \left(\frac{1+(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|}{+(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^2} \right). \end{aligned}$$

Таким образом, получаем окончательное выражение для оценки Δ_2 :

$$\begin{aligned} \Delta_2 &\leq \frac{8\Delta M(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{3/2}}{1-2^3(M+\Delta M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^3} \times \\ &\times \left(\frac{1+(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|}{+(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^2} \right) \times \\ &\times \left(1+(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{3/2} \right). \end{aligned}$$

Данная оценка Δ_2 справедлива в области

$$F_2 = \left\{ z : |\tilde{z}_2^* - z| < \frac{1}{(M+1)^4} \right\}.$$

Осталось показать справедливость оценки Δ_3 :

$$\begin{aligned} \Delta_3 &\leq \Delta \tilde{z}^* \left(\sum_7^\infty |\tilde{C}_n| |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{n-1}{2}} \right)' = \\ &= \Delta \tilde{z}^* \left(\sum_7^\infty \frac{8M(M+\Delta M+1)^{6\lceil \frac{n}{3} \rceil}}{(n-1)(n-3)(n-5)} |\tilde{z}_2^* - z|^{\frac{n-1}{2}} \right)' \leq \\ &\leq \Delta \tilde{z}^* \left(\frac{8M(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{3/2}}{1-(M+\Delta M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^3} \times \right. \\ &\times \left. \left(\frac{1+(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|}{+(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^2} \right) \times \right. \\ &\times \left. \left(1+(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{3/2} \right) \right)' = \\ &= \frac{4\Delta \tilde{z}^* \Delta M(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{3/2}}{\left(1-(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{3/2} \right)^2} \times \\ &\times \left(\frac{3+(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z| (7|\tilde{z}_2^* - z|+5)}{-2(M+\Delta M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^{5/2} (2|\tilde{z}_2^* - z|+1)} \right). \end{aligned}$$

После преобразований получаем оценку для Δ_3 :

$$\begin{aligned} \Delta_3 &\leq \frac{4\Delta \tilde{z}^* M(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{3/2}}{\left(1-(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z|^{3/2} \right)^2} \times \\ &\times \left(\frac{3+(M+\Delta M+1)^6 |\tilde{z}_2^* - z| (7|\tilde{z}_2^* - z|+5)}{-2(M+\Delta M+1)^{12} |\tilde{z}_2^* - z|^{5/2} (2|\tilde{z}_2^* - z|+1)} \right). \end{aligned}$$

Оценка Δ_3 работает в области

$$F_3 = \left\{ z : |\tilde{z}_2^* - z| < \frac{1}{(M+\Delta M+1)^4} \right\}.$$

Окончательно получаем область

$$F = F_1 \cap F_2 \cap F_3.$$

Численный эксперимент

Пример 1. Проведем расчеты задачи Коши (1), (2) с условиями:

$$\begin{aligned} r(z) &= z^5; \quad y(0) = 0,2 + 0,5i; \\ y'(0) &= -0,3 - 0,7i; \quad y''(0) = 0,95i; \\ \tilde{z}^* &= 5,8563; \quad \Delta \tilde{z} = 0,0005. \end{aligned}$$

Рассматриваемая задача (1), (2) при данных условиях неразрешима в квадратурах. Применяя полученные результаты, рассчитаем приближенное решение (4) при $N = 9$ для значения аргумента $\tilde{z}_1$ с учетом области $F = F_1 \cap F_2 \cap F_3$, для которой теорема [28] является применимой — $\rho = 0,015625$ (принятое обозначение в работе [28]). Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Пример 2. Рассмотрим задачу Коши (1), (2) с условиями:

$$\begin{aligned} r(z) &= z^5; \quad y(0) = 0,2 + 0,5i; \\ y'(0) &= -0,3 - 0,7i; \quad y''(0) = 0,95i; \\ \tilde{z}^* &= 5,8563; \quad \Delta \tilde{z} = 0,0005. \end{aligned}$$

Рассматриваем значение x_2 , удовлетворяющее условию настоящей теоремы, находящееся в области $F = F_1 \cap F_2 \cap F_3$ — $\rho_2 = 0,06249$, $z_2 = 5,78$, но при этом не подпадающее под результаты теоремы работы [28]. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Табл. 1. Характеристики приближенного решения

Table 1. Characteristics of the approximate solution

z_1	$\tilde{y}_9(z_1)$	Δ_1	Δ_2	Δ_3
5,841	$1,5081 \cdot 10^7 - 1,3799 \cdot 10^6$	0,04	0,07	0,0005

Примечание: $\tilde{y}_9(z_1)$ — аналитическое приближенное решение (4); Δ_1 — оценка погрешности, полученная согласно работе [28]; Δ_2 — оценка погрешности согласно данной работе; Δ_3 — апостериорная оценка для решения (4). В случае $\Delta_3 = 0,0005$ доказанная теорема требует $N = 14$. Слагаемые с 10 по 14 в общей сумме не влияют на точность полученного результата — $\varepsilon = 0,0005$, это означает, что при $N = 9$ получаем значение $\tilde{y}_9(z_1)$ с точностью $\varepsilon = 0,0005$. Следует отметить, что априорные оценки данной работы и работы [28] имеют одинаковый порядок.

Note: $\tilde{y}_9(z_1)$ — analytical approximate solution (4); Δ_1 — error estimate obtained according to [28]; Δ_2 — error estimate

according to this paper; Δ_3 — posteriori estimate for the solution (4). In the case of $\Delta_3 = 0.0005$ the proved theorem requires $N = 14$. The summands 10 to 14 in the total sum do not affect the accuracy of the obtained result — $\varepsilon = 0.0005$ this means that when $N = 9$ we obtain a value $\tilde{y}_9(z_1)$ with accuracy $\varepsilon = 0.0005$. It should be noted that the priori estimates of this paper and the paper [28] are of the same order.

Табл. 2. Характеристики приближенного решения

Table 2. Characteristics of the approximate solution

z_2	$\tilde{y}_9(z_2)$	Δ'_1	Δ'_2
5,78	$378\,980,6054 + 532\,683,1167i$	0,02	0,0009

Примечание: $\tilde{y}_9(z_2)$ — приближенное решение (4); Δ'_1 — погрешность, согласно настоящей работе; Δ'_2 — апостериорная погрешность решения (4). Для варианта $\Delta'_2 = 0,0009$ по доказанной в работе теореме следует $N = 13$. Слагаемые с 10 по 13 не влияют на точность проведенных расчетов — $\varepsilon = 0,0009$. Это означает, что при $N = 9$ полученное значение $\tilde{y}_9(z_2)$ имеет точность $\varepsilon = 0,0009$.

Note: $\tilde{y}_9(z_2)$ — approximate solution (4); Δ'_1 — error, according to this paper; Δ'_2 — posteriori error of the solution (4). For the variant $\Delta'_2 = 0.0009$, according to the theorem proved in this paper, it follows that $N = 13$. The summands 10 to 13 do not affect the accuracy of the calculations — $\varepsilon = 0.0009$. This means that when $N = 9$ the obtained value has an accuracy of $\varepsilon = 0.0009$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Авторский подход метода аналитического приближенного решения находит дальнейшее развитие на примере рассматриваемого класса нелинейных уравнений. В исследовании полученные результаты основывались на элементах дифференциального исчисления, которые позволили улучшить предыдущие результаты. В статье обобщаются результаты, полученные ранее при исследовании точных границ применения приближенного решения, рассматриваемого класса уравнений в окрестности подвижной особой точки в комплексной области. Представленные исследования подтверждены с помощью численных экспериментов, с одной стороны, подтверждающих полученные теоретические результаты; с другой стороны, хорошо согласующиеся с результатами предыдущей публикации в общей области.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Feng Y. Existence and uniqueness results for a third-order implicit differential equation // Computers and Mathematics with Applications. 2008. Vol. 56. Issue 1. Pp. 2507–2514. DOI: 10.1016/j.camwa.2008.05.021
2. Чугайнова А.П. Нестационарные решения обобщенного уравнения Кортевега–де Фри-

за–Бюргерса // Труды Математического института им. В.А. Стеклова. 2013. Т. 281. С. 215. DOI: 10.1134/S0371968513020179. EDN QZXEUL.

3. Chichurin A., Filipuk G. The properties of certain linear and nonlinear differential equations of the fourth order arising in beam models // Journal of Physics: Conference Series. 2019.

Vol. 1425. Issue 1. P. 012107. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012107

4. Jamshed W., Uma Devi S.S., Goodarzi M., Prakash M., Sooppy Nisar K., Zakarya M. et al. Evaluating the unsteady Casson nanofluid over a stretching sheet with solar thermal radiation: An optimal case study // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 26. P. 101160. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101160

5. Dwivedi P., Sudhakar K., Soni A., Solomin E., Kirpichnikova I. Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020. Vol. 21. P. 100674. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100674

6. Li P., Zhao W. Image fire detection algorithms based on convolutional neural networks // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020. Vol. 19. P. 100625. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100625

7. Kudryashov N.A. Optical solitons of the Schrödinger–Hirota equation of the fourth order // *Optik*. 2023. Vol. 274. P. 170587. DOI: 10.1016/j.ijleo.2023.170587

8. Kudryashov N.A. Dispersive optical solitons of the generalized Schrödinger–Hirota model // *Optik*. 2023. Vol. 272. P. 170365. DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.170365

9. Carillo S., Chichurin A., Filipuk G., Zullo F. Schwarzian derivative, Painlevé XXV–Ermakov equation, and Bäcklund transformations // *Mathematische Nachrichten*. 2023. DOI: 10.1002/mana.202200180

10. Вересович П.П., Яблонский А.И. О подвижных особых точках систем дифференциальных уравнений третьего порядка // *Дифференциальные уравнения*. 1977. Т. 13. № 11. С. 1932–1939.

11. Писаренко В.П., Яблонский А.И. Дифференциальное уравнение, имеющее решения с алгебраическими подвижными особыми точками // *Дифференциальные уравнения*. 1976. Т. 12. № 5. С. 928–930.

12. Соболевский С.Л. Подвижные особые точки полиномиальных обыкновенных дифференциальных уравнений // *Дифференциальные уравнения*. 2004. Т. 40. № 6. С. 756–762. DOI: 10.1023/B:DIEQ.0000046859.46244.5e

13. Соболевский С.Л. Подвижные особые точки алгебраических обыкновенных дифференциальных уравнений // *Дифференциальные уравнения*. 2005. Т. 41. № 8. С. 1092–1099. DOI: 10.1007/s10625-005-0260-9

14. Filipuk G., Kecker T. On singularities of certain non-linear second-order ordinary differential equations // *Results in Mathematics*. 2022. Vol. 77. Issue 1. DOI: 10.1007/s00025-021-01577-1

15. Filipuk G., Halburd R.G. Movable algebraic singularities of second-order ordinary differential equations // *Journal of Mathematical Physics*. 2009. Vol. 50. Issue 2. DOI: 10.1063/1.3068414

16. Леонтьева Т.Ю. Об одном обобщении точных критериев существования подвижных особых точек одного класса нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений в комплексной об-

ласти // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика*. 2017. № 13 (262). С. 51–57. EDN ZCJDNR.

17. Пчелова А.З. Границы области применения приближенного решения в окрестности возмущенной подвижной особой точки одного дифференциального уравнения в комплексной области // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика*. 2014. № 4. С. 170–179. EDN SXXCML.

18. Орлов В.Н., Ив Б.Б. Теорема существования решения одного класса нелинейных дифференциальных уравнений четвертого порядка с полиномиальной правой частью второй степени в окрестности подвижной особой точки // *Вестник Башкирского университета*. 2018. Т. 23. № 4. С. 980–986. EDN YUXNSH.

19. Astashova I.V. On asymptotic classification of solutions to nonlinear regular and singular third- and fourth-order differential equations with power nonlinearity // *Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*. 2016. Pp. 191–203. DOI: 10.1007/978-3-319-32857-7_18

20. Astashova I., Bartušek M., Došlá Z., Marini M. Asymptotic proximity to higher order nonlinear differential equations // *Advances in Nonlinear Analysis*. 2022. Vol. 11. Issue 1. Pp. 1598–1613. DOI: 10.1515/anona-2022-0254

21. Kruskal M.D., Joshi N., Halburd R. Analytic and asymptotic methods for nonlinear singularity analysis: a review and extensions of tests for the Painlevé property // *Integrability of Nonlinear Systems*. 2007. Pp. 171–205. DOI: 10.1007/BFb0113696

22. Řehák P. On asymptotic relationships between two higher order dynamic equations on time scale // *Applied Mathematics Letters*. 2017. Vol. 73. Pp. 84–90. DOI: 10.1016/j.aml.2017.02.013

23. Leonov G.A., Kuznetsov N.V. Time-varying linearization and the perron effects // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2007. Vol. 17. Issue 4. Pp. 1079–1107. DOI: 10.1142/S0218127407017732

24. Hartman P. On the local linearization of differential equations // *Proceedings of the American Mathematical Society*. 1963. Vol. 14. Issue 4. Pp. 568–573. DOI: 10.1090/s0002-9939-1963-0152718-3

25. Ramos J.I. Linearization techniques for singular initial-value problems of ordinary differential equations // *Applied Mathematics and Computation*. 2005. Vol. 161. Issue 2. Pp. 525–542. DOI: 10.1016/j.amc.2003.12.047

26. Jimenez J.C., Shoji I., Ozaki T. Simulation of stochastic differential equations through the local linearization method. A comparative study // *Journal of Statistical Physics*. 1999. Vol. 94. Pp. 587–602. DOI: 10.1023/A:1004504506041

27. Орлов В.Н., Гасанов М.В. Теорема существования решения одного класса нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка

с полиномиальной правой частью седьмой степени в окрестности подвижной особой точки // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2020. № 1 (43). С. 92–100. DOI: 10.37972/chgpu.2020.43.1.011. EDN LDNWP.

28. Orlov V.N., Gasanov M.V. Study of wave processes in elastic beams and nonlinear differential equations with moving singular points // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021.

Vol. 1030. Issue 1. P. 012081. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012081

29. Orlov V.N., Gasanov M.V. Analytic approximate solution in the neighborhood of a moving singular point of a class of nonlinear equations // Axioms. 2022. Vol. 11. Issue 11. P. 637. DOI: 10.3390/axioms11110637

30. Бахвалов Н.С. Численные методы. М. : Наука, 1970. 632 с.

Поступила в редакцию 12 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 10 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 13 октября 2023 г.

О Б А В Т О Р А Х : **Виктор Николаевич Орлов** — доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 711175, Scopus: 57202806960, ResearcherID: ABF-7635-2020, ORCID: 0000-0001-7606-5490; Orlovvn@mgsu.ru;

Магомедюсуп Владимирович Гасанов — преподаватель кафедры высшей математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5571-4447, Scopus: 57222119930, ResearcherID: AFZ-3342-2022, ORCID: 0000-0003-4669-4506; GasanovMV@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Орлов В.Н. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, итоговые выводы.

Гасанов М.В. — сбор материала, обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Feng Y. Existence and uniqueness results for a third-order implicit differential equation. *Computers and Mathematics with Applications*. 2008; 56(1):2507-2514. DOI: 10.1016/j.camwa.2008.05.021

2. Chugainova A.P. Nonstationary solutions of the generalized Korteweg-de Vries-Burgers equation. *Trudy Matematicheskogo Instituta imeni V.A. Steklova*. 2013; 281:215. DOI: 10.1134/S0371968513020179. EDN QZXEUL. (rus.).

3. Chichurin A., Filipuk G. The properties of certain linear and nonlinear differential equations of the fourth order arising in beam models. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1425(1):012107. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012107

4. Jamshed W., Uma Devi S.S., Goodarzi M., Prakash M., Sooppy Nisar K., Zakarya M. et al. Evaluating the unsteady Casson nanofluid over a stretching sheet with solar thermal radiation: An optimal case study. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021; 26:101160. ISSN 2214-157X, DOI: 10.1016/j.csite.2021.101160

5. Dwivedi P., Sudhakar K., Soni A., Solomin E., Kirpichnikova I. Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020; 21:100674. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100674

6. Li P., Zhao W. Image fire detection algorithms based on convolutional neural networks. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020; 19:100625. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100625

7. Kudryashov N.A. Optical solitons of the Schrödinger–Hirota equation of the fourth order. *Optik*. 2023; 274:170587. DOI: 10.1016/j.ijleo.2023.170587

8. Kudryashov N.A. Dispersive optical solitons of the generalized Schrödinger–Hirota model. *Optik*. 2023; 272:170365. DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.170365

9. Carillo S., Chichurin A., Filipuk G., Zullo F. Schwarzian derivative, Painlevé XXV–Ermakov equation, and Bäcklund transformations. *Mathematische Nachrichten*. 2023. DOI: 10.1002/mana.202200180

10. Veresovich P.P., Yablonsky A.I. Moving singular points of systems of third-order differential equations. *Differential Equations*. 1977; 13(11):1932-1939. (rus.).

11. Pisarenok V.P., Yablonsky A.I. Differential equation with solutions with algebraic moving singular points. *Differential Equations*. 1976; 12(5):928-930. (rus.).

12. Sobolevsky S.L. Moving singular points of polynomial ordinary differential equations. *Differential Equations*. 2004; 40(6):756-762. DOI: 10.1023/B:DIEQ.0000046859.46244.5e (rus.).

13. Sobolevsky S.L. Moving singular points of algebraic ordinary differential equations. *Differential*

Equations. 2005; 41(8):1092-1099. DOI: 10.1007/s10625-005-0260-9 (rus.).

14. Filipuk G., Kecker T. On singularities of certain non-linear second-order ordinary differential equations. *Results in Mathematics*. 2022; 77(1). DOI: 10.1007/s00025-021-01577-1

15. Filipuk G., Halburd R.G. Movable algebraic singularities of second-order ordinary differential equations. *Journal of Mathematical Physics*. 2009; 50(2). DOI: 10.1063/1.3068414

16. Leont'eva T.Yu. About one generalization of exact criteria for the existence of moving singular points of one class of nonlinear ordinary differential equations in the complex area. *Belgorod State University Scientific Bulletin Mathematics & Physics*. 2017; 13(262):51-57. EDN ZCJDNR. (rus.).

17. Pchelova A.Z. The application area borders of approximate solution in the neighborhood of the approximate value of moving singularity for one differential equation in the complex domain. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*. 2014; 4:170-179. EDN SXXCML. (rus.).

18. Orlov V.N., Iv B.B. The existence theorem for the solution of a class of fourth-order nonlinear differential equations with a polynomial right-hand part of second degree in proximity of a moving singular point. *Bulletin of the Bashkir University*. 2018; 23(4):980-986. EDN YUXNSH. (rus.).

19. Astashova I.V. On asymptotic classification of solutions to nonlinear regular and singular third- and fourth-order differential equations with power nonlinearity. *Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*. 2016; 191-203. DOI: 10.1007/978-3-319-32857-7_18

20. Astashova I., Bartušek M., Došlá Z., Marini M. Asymptotic proximity to higher order nonlinear differential equations. *Advances in Nonlinear Analysis*. 2022; 11(1):1598-1613. DOI: 10.1515/anona-2022-0254

21. Kruskal M.D., Joshi N., Halburd R. Analytic and asymptotic methods for nonlinear singularity analysis: a review and extensions of tests for the Painlevé

property. *Integrability of Nonlinear Systems*. 2007; 171-205. DOI: 10.1007/BFb0113696

22. Řehák P. On asymptotic relationships between two higher order dynamic equations on time scale. *Applied Mathematics Letters*. 2017; 73:84-90. DOI: 10.1016/j.aml.2017.02.013

23. Leonov G.A., Kuznetsov N.V. Time-varying linearization and the perron effects. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2007; 17(4):1079-1107. DOI: 10.1142/S0218127407017732

24. Hartman P. On the local linearization of differential equations. *Proceedings of the American Mathematical Society*. 1963; 14(4):568-573. DOI: 10.1090/s0002-9939-1963-0152718-3

25. Ramos J.I. Linearization techniques for singular initial-value problems of ordinary differential equations. *Applied Mathematics and Computation*. 2005; 161(2):525-542. DOI: 10.1016/j.amc.2003.12.047

26. Jimenez J.C., Shoji I., Ozaki T. Simulation of stochastic differential equations through the local linearization method. A comparative study. *Journal of Statistical Physics*. 1999; 94:587-602. DOI: 10.1023/A:1004504506041

27. Orlov V.N., Gasanov M.V. Existence theorem for a solution of a class of third order nonlinear differential equations with polynomial right hand side of the seventh degree in a vicinity of a movable singular point. *Vestnik I. Yakovlev Chuvach State Pedagogical University. Series: Mechanics of a limit state*. 2020; 1(43):92-100. DOI: 10.37972/chgpu.2020.43.1.011. EDN LDNWP. (rus.).

28. Orlov V.N., Gasanov M.V. Study of wave processes in elastic beams and nonlinear differential equations with moving singular points. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012081. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012081

29. Orlov V.N., Gasanov M.V. Analytic approximate solution in the neighborhood of a moving singular point of a class of nonlinear equations. *Axioms*. 2022; 11(11):637. DOI: 10.3390/axioms11110637

30. Bakhvalov N.S. *Numerical methods*. Moscow, Nauka Publ., 1970; 632. (rus.).

Received August 12, 2023.

Adopted in revised form on October 10, 2023.

Approved for publication on October 13, 2023.

BIONOTES: **Victor N. Orlov** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Higher Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 711175, Scopus: 57202806960, Researcher ID: ABF-7635-2020, ORCID: 0000-0001-7606-5490; Orlovvn@mgsu.ru;

Magomedysuf V. Gasanov — lecturer of the Department of Higher Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5571-4447, Scopus: 57222119930, ResearcherID: AFZ-3342-2022, ORCID: 0000-0003-4669-4506; GasanovMV@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Victor N. Orlov — scientific management, research concept, development of methodology, final conclusions.

Magomedysuf V. Gasanov — collection of material, processing of material, writing an article.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 539.3:621.3.036.61

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1901-1914

Пассивное гашение изгибных колебаний балки вблизи ее резонансных частот с использованием пьезоэффекта

Владимир Николаевич Сидоров, Нелля Николаевна Рогачева,
Юлия Германовна Жеглова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Предложен принципиально новый способ пассивного гашения колебаний конструкции в окрестности ее резонансных частот. Способ основан на использовании пьезоэффекта. С этой целью к конструкции добавлены пьезоэлектрические элементы, которые служат преобразователями энергии (механической энергии в электрическую энергию и наоборот).

Материалы и методы. Пьезоэлектрические элементы представляют собой предварительно поляризованную пьезокерамику с электродами. Для пассивного гашения вибраций используются два различных вида электрических условий на электродах: электроды короткозамкнуты и электроды разомкнуты. Изменяя электрические условия на электродах, изменяется краевая задача. Спектр собственных частот краевой задачи для конструкции с короткозамкнутыми электродами отличается от спектра собственных частот краевой задачи для той же конструкции с разомкнутыми электродами. Идея метода заключается в следующем: пусть частота колебаний конструкции с короткозамкнутыми электродами приближается к ее резонансной частоте. Разомкнем электроды, тем самым изменим спектр собственных частот конструкции. Частота колебаний, которая является резонансной частотой для конструкции с короткозамкнутыми электродами, для конструкции с разомкнутыми электродами не будет резонансной. В результате изменения электрических условий амплитуды искомых величин (прогиба, изгибающего момента, перерезывающего усилия и т.д.) существенно уменьшатся. С целью оценки эффективности пассивного гашения вибрации предложена простая формула.

Результаты. Для балки, совершающей вынужденные изгибные колебания в окрестности ее резонансной частоты, по предложенному способу пассивного гашения вибраций выполнены расчеты, получены таблицы эффективности гашения вибрации в окрестности резонансных частот и построены графики. Исследована возможность повышения эффективности гашения колебаний за счет выбора направления предварительной поляризации пьезоэлектрического материала, расположения электродов и их количества.

Выводы. Результаты исследований пассивного гашения колебаний вблизи резонансных частот с помощью пьезоэффекта подтвердили простоту и надежность предлагаемого метода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассивное гашение вибраций, пьезоэффект, спектр собственных частот, поляризованная пьезокерамика

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сидоров В.Н., Рогачева Н.Н., Жеглова Ю.Г. Пассивное гашение изгибных колебаний балки вблизи ее резонансных частот с использованием пьезоэффекта // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1901–1914. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1901-1914

Автор, ответственный за переписку: Юлия Германовна Жеглова, JeglovaYUG@mgsu.ru.

Passive damping of bending vibrations of a beam near its resonance frequencies using piezoeffect

Vladimir N. Sidorov, Nelly N. Rogacheva, Yulia G. Zheglova

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

ABSTRACT

Introduction. The paper describes a fundamentally new method of passive damping of vibrations of a structure in the vicinity of its resonant frequencies. The method is based on the use of piezoeffect. For this purpose, piezoelectric elements are added to the structure, which serve as energy converters (mechanical energy into electrical energy and vice versa).

Materials and methods. Piezoelectric elements are polarized piezoceramics with electrodes. Two different types of electrical conditions on the electrodes are used for passive vibration damping: a) the electrodes are short-circuited and b) disconnected electrodes. By changing the electrical conditions on the electrodes, we change the boundary value problem. The spectrum of natural frequencies of the boundary value problem for a structure with short-circuited electrodes differs from the spectrum of natural frequencies of the boundary value problem for the same structure with disconnected electrodes.

The idea of the method is as follows: let the vibration frequency of the structure with short-circuited electrodes approach its resonant frequency. Let us disconnect the electrodes, thereby changing the spectrum of natural frequencies of the structure. The vibration frequency, which is the resonant frequency for the structure with short-circuited electrodes, will not be resonant for the structure with disconnected electrodes. As a result of changes in electrical conditions, the amplitudes of the required quantities (deflection, bending moment, shearing force, etc.) will decrease significantly. To evaluate the effectiveness of passive vibration damping, a simple formula is proposed.

Results. For a beam undergoing forced bending vibrations in the vicinity of its resonant frequency, calculations were performed using the proposed method of passive vibration damping, tables of vibration damping efficiency in the vicinity of resonant frequencies were obtained, and graphs are plotted. The possibility of increasing the efficiency of vibration damping by choosing the direction of pre-polarization of the piezoelectric material, the location of the electrodes and their number was investigated.

Conclusions. The results of studies of passive vibration damping near resonant frequencies using the piezoeffect confirmed the simplicity and reliability of the proposed method.

KEYWORDS: passive vibration damping, piezoeffect, spectrum of natural frequencies, polarized piezoceramics

FOR CITATION: Sidorov V.N., Rogacheva N.N., Zheglova Yu.G. Passive damping of bending vibrations of a beam near its resonance frequencies using piezoeffect. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1901-1914. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1901-1914 (rus.).

Corresponding author: Yulia G. Zheglova, JeglovaYUG@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Создание эффективных средств контроля и гашения колебаний конструкций является одной из важнейших проблем современной техники. Она охватывает широкий класс задач в строительстве, машиностроении, транспорте, военной технике, электронике и др. В строительстве это колебания зданий и сооружений, в том числе дымовых труб, телевизионных башен, мостов и т.д., которые подвергаются действиям динамических эксплуатационных ветровых и сейсмических нагрузок.

Для решения этого вопроса используются активные и пассивные системы гашения колебаний.

Различие между ними состоит в том, что в системах активного гашения колебаний используются внешние источники энергии, необходимые для возбуждения вынужденных колебаний конструкции в противофазе ее колебаний и уменьшающие амплитуды колебаний [1–10].

Пассивное гашение колебаний конструкции не требует внешних источников энергии. Для решения проблемы виброзащиты применяются различные системы пассивного гашения вибраций: демпфирующие; адаптивные; инерционные с гасителями колебаний; системы, регулирующие жесткость конструкции; изолирующие системы и др. [11–16].

Демпфирование заключается в поглощении и изменении энергии вибрации. Задача демпфирования — увеличение рассеивания энергии, для того чтобы уменьшить ускорение перемещений и инерционные силы колебания конструкции.

В инерционных системах используются различные гасители колебаний или гироскопические устройства. В строительных сооружениях масса гасителя составляет 1–2 % от массы сооружения. Под устройство гасителей отводятся большие площади в верхней части сооружения. В качестве примера можно привести гаситель в здании высотой 509 м (101 этаж) в г. Тайбэе (Тайвань). В верхней части

этого здания между 87 и 91 этажами подвешен гаситель в виде шара 660 тонн. Совершая колебания в противофазе, шаровой маятник уменьшает амплитуду сейсмических колебаний здания и меняет его собственные частоты.

Повышение жесткости сооружения достигается установкой дополнительных панелей и связей, которые значительно увеличивают прочность конструкции и изменяют ее резонансный спектр частот колебаний.

Изолирующие системы используются с древних времен. В строительных сооружениях способ сейсмоизоляции является наиболее эффективным. В отечественном строительстве часто применяются кинематические фундаменты, использующие эффекты качения, скольжения, трения и т.д. Другой распространенный тип сейсмоизоляции — фундаменты с упругопластическими элементами.

Особые трудности представляет гашение вынужденных колебаний, частоты которых близки или совпадают с собственными частотами конструкции. Именно для этого случая предлагается новый способ пассивного гашения колебаний конструкции вблизи ее резонансных частот, основанный на пьезоэффекте [17]. С этой целью на лицевые поверхности балки добавлены слои из предварительно поляризованной пьезокерамики с сильным пьезоэффектом. На электродах пьезоэлектрических слоев используются два типа электрических условий — электроды либо коротко замкнуты, либо разомкнуты. Электроупругое состояние конструкции с разными условиями на электродах описывается разными краевыми задачами с разными спектрами собственных частот. Этот известный в математике факт положен в основу нового способа пассивного гашения колебаний конструкции вблизи ее резонансных частот: если конструкция совершает колебания с частотой, близкой к ее резонансной частоте, то, изменив электрические условия на электродах, мы изменим спектр

собственных частот, и колебания конструкции будут происходить не на резонансной частоте.

Эффективность гашения зависит от направления предварительной поляризации пьезокерамики, расположения и количества электродов, геометрических и физических параметров конструкции и исследуется в представленной работе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходные уравнения

Рассмотрена трехслойная балка с одним упругим слоем и двумя пьезоэлектрическими слоями, расположенными симметрично относительно упругого слоя. Средний слой — упругий, внешние слои выполнены из пьезоэлектрического материала. В дальнейшем обозначения номер упругого слоя (1), номера верхнего и нижнего слоев (+2) и (−2) соответственно. Толщина упругого слоя равна $2h_1$, толщина каждого пьезоэлектрического слоя — h_2 , длина балки — l (рис. 1).

Продольный разрез балки в декартовых координатах и электрическая нагрузка схематически показаны на рис. 1.

Ось x_1 направлена по длине балки, x_2 — по ширине балки, ось x_3 ортогональна им.

Предполагается, что пьезоэлектрические слои предварительно поляризованы в направлении x_3 [18].

В работе [18] построена теория многослойных электроупругих балок. Приведем эти результаты для частного случая — трехслойной балки.

В случае тонкостенных балок в уравнениях состояния напряжениями σ_{22} и σ_{33} можно пренебречь по сравнению с напряжениями σ_{11} . Кроме того, предполагается, что электроупругое состояние не зависит от координаты x_2 .

С учетом сделанных допущений уравнения для упругого и электроупругого слоев запишутся в виде уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_{ii}^{(k)}}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}^{(k)}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i^{(k)}}{\partial t^2}, \quad i \neq j = 1, 3, \quad k = -2, 1, 2; (1)$$

Формулы деформация-перемещение:

$$e_1^{(k)} = \frac{\partial u_1^{(k)}}{\partial x_1}, \quad k = -2, 1, 2. \quad (2)$$

Уравнение состояния (закон Гука) упругого слоя:

$$\sigma_{11}^{(1)} = E e_1^{(1)}. \quad (3)$$

Поведение пьезоэлектрических слоев описывается связанной электроупругой задачей, поэтому в уравнения состояния пьезоэлектрических слоев и уравнения электростатики одновременно входят и механические, и электрические величины [19]:

$$\sigma_{11}^{(\pm 2)} = \frac{1}{s_{11}^E} e_1^{(\pm 2)} - \frac{d_{31}^E}{s_{11}^E} E_3^{(\pm 2)}, \quad (4)$$

$$D_3^{(\pm 2)} = \varepsilon_{33}^T E_3^{(\pm 2)} + d_{31} \sigma_{11}^{(\pm 2)}, \quad (5)$$

где

$$E_3^{(\pm 2)} = -\frac{\partial \phi^{(\pm 2)}}{\partial x_3}. \quad (6)$$

В формулах (1)–(6) u_1 и e_1 — перемещение и деформация в направлении x_1 соответственно; E_3 и D_3 — компоненты вектора электрического поля и вектора электрической индукции в направлении x_3 ; ϕ — электрический потенциал; s_{11}^E — упругая податливость при нулевом электрическом поле; E — модуль упругости упругого слоя; d_{31}^E — пьезоэлектрическая проницаемость; ε_{33}^T — диэлектрическая проницаемость при нулевых напряжениях [19]. Используемые обозначения те же, что и в трудах [2, 18].

Рассмотрим пьезоэлектрические слои, лицевые поверхности которых $x_3 = \pm h_1 \pm h_2$ полностью покрыты электродами. Будем использовать только два вида условий на электродах:

- электроды короткозамкнуты (электрический потенциал на электродах равен нулю);
- электроды разомкнуты.

На короткозамкнутых электродах электрический потенциал равен нулю:

$$\phi^{(\pm 2)} \Big|_{x_3 = \pm h} = \phi^{(\pm 2)} \Big|_{x_3 = \pm h_1} = 0. \quad (7)$$

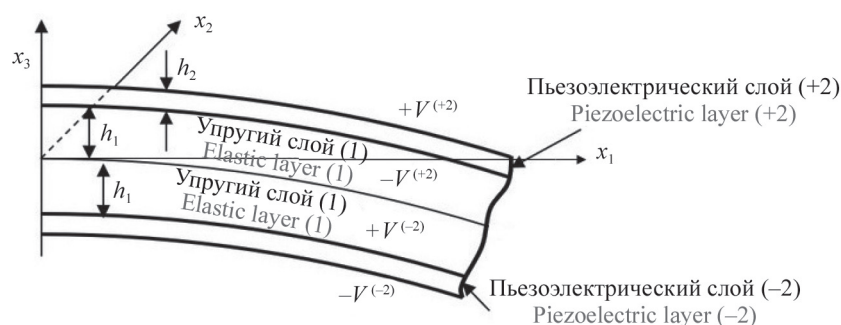


Рис. 1. Схематическое изображение структуры слоистой балки

Fig. 1. Schematic representation of a layered beam structure

На разомкнутых электродах электрический потенциал отличен от нуля:

$$\varphi^{(\pm 2)} \Big|_{x_3=\pm h} = \pm V^{(\pm 2)}, \quad \varphi^{(\pm 2)} \Big|_{x_3=\pm h_1} = \mp V^{(\pm 2)} \quad (8)$$

и его значения $V^{(\pm 2)}$ определяются из следующего интегрального условия:

$$I = \int_{\Omega} \frac{\partial D_3}{\partial t} d\Omega = 0. \quad (9)$$

Здесь интеграл берется по поверхности Ω одного из электродов, t обозначает время.

На поверхностях балки механическая поверхностная нагрузка задается обычным образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{13}^{(\pm 2)} \Big|_{x_3=\pm h} &= \pm q_1^{\pm}, \quad \sigma_{33}^{(\pm 2)} \Big|_{x_3=\pm h} = \\ &= \pm q_3^{\pm}, \quad \sigma_{33}^{(\pm 2)} \Big|_{x_3=\pm h_1} = \pm q_3^{\pm}. \end{aligned} \quad (10)$$

Верхний индекс в скобках указывает номер слоя. Здесь и далее каждая формула с двойным знаком $\pm$, m содержит две формулы. Для получения одной формулы следует взять верхние знаки, для получения второй формулы нужно взять нижние знаки.

Вывод уравнений электроупругой балки

Так как будет рассмотрена задача изгиба балки, то искомые величины σ_{11} , u_1 , E_3 , D_3 являются нечетными функциями от переменной x_3 , а искомые величины u_3 , φ , σ_{13} — четными функциями от переменной x_3 .

Электрический потенциал φ в задаче изгиба балки — это четная функция от переменной x_3 , поэтому условия (8) запишутся в следующем виде:

$$V^{(\pm 2)} = -V^{(-2)} = V. \quad (11)$$

Для построения теории электроупругих балок следует принять некоторые предположения относительно электрических величин. Как и при построении теории пьезоэлектрических слоистых балок [18], содержание принимаемых гипотез зависит от электрических условий на поверхностях пьезоэлектрических слоев.

Механические величины любого слоя, для которого справедливы гипотезы Кирхгофа, могут быть записаны в виде следующих линейных функций координаты x_3 :

$$\begin{aligned} u &= x_3 u_1, \quad e_1 = x_3 \kappa, \\ \sigma_{11}^{(\pm 2)} &= \sigma_{11,0}^{(\pm 2)} + x_3 \sigma_{11,1}^{(\pm 2)}, \quad \sigma_{11}^{(1)} = x_3 \sigma_{11,1}^{(1)}, \end{aligned} \quad (12)$$

где κ — компонента изгибной деформации средней линии балки w :

$$\kappa = \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2}, \quad w = -u_3 \Big|_{x_3=0}. \quad (13)$$

В работе [18] показано, что электрический потенциал в пьезоэлектрическом слое является квадратичной функцией координаты толщины x_3 :

$$\varphi^{(\pm 2)} = \varphi_{,0}^{(\pm 2)} + x_3 \varphi_{,1}^{(\pm 2)} + x_3^2 \varphi_{,2}^{(\pm 2)}. \quad (14)$$

Выпишем основные формулы для балки с разомкнутыми электродами. На разомкнутых электродах электрический потенциал отличен от нуля. Он равен константе на каждом электроде, которая определяется из интегрального условия (9).

Если на электродах задан электрический потенциал (8), то формулу (14) можно преобразовать:

$$\begin{aligned} \varphi^{(\pm 2)} &= -V + (x_3 \mp h_1) \left(\pm \frac{2V}{h_2} \mp h_2 \varphi_{,2}^{(\pm 2)} \right) + \\ &+ (x_3 \mp h_1)^2 \varphi_{,2}^{(\pm 2)}. \end{aligned} \quad (15)$$

С учетом формул (15) и (6) получаем:

$$E_{3,0}^{(\pm 2)} = \mp \frac{2V}{h_2} \pm (h + h_1) \varphi_{,2}^{(\pm 2)}, \quad E_{3,1}^{(\pm 2)} = -2\varphi_{,2}^{(\pm 2)},$$

где

$$E_3^{(\pm 2)} = E_{3,0}^{(\pm 2)} + x_3 E_{3,1}^{(\pm 2)}. \quad (16)$$

В результате несложных преобразований уравнения состояния пьезоэлектрических слоев с разомкнутыми электродами можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^{(\pm 2)} &= \sigma_{11,0}^{(\pm 2)} + x_3 \sigma_{11,1}^{(\pm 2)}; \\ \sigma_{11,0}^{(\pm 2)} &= \pm \frac{2d_{31}}{h_2 s_{11}^E} V \mp \frac{(h + h_1) k_{31}^2}{2s_{11}^E (1 - k_{31}^2)} \kappa; \\ \sigma_{11,1}^{(\pm 2)} &= \frac{1}{s_{11}^E (1 - k_{31}^2)} \kappa; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\varphi_{,2}^{(\pm 2)} = \frac{d_{31}}{2\epsilon_{33}^T} \sigma_{11,1}^{(\pm 2)} = \frac{k_{31}^2}{2d_{31} (1 - k_{31}^2)} \kappa;$$

$$E_{3,0}^{(\pm 2)} = \mp \frac{2V}{h_2} \pm \frac{(h + h_1) k_{31}^2}{2d_{31} (1 - k_{31}^2)} \kappa;$$

$$E_{3,1}^{(\pm 2)} = -\frac{k_{31}^2}{d_{31} (1 - k_{31}^2)} \kappa;$$

$$\begin{aligned} D_{3,0}^{(\pm 2)} &= \epsilon_{33}^T E_{3,0}^{(\pm 2)} + d_{31} \sigma_{11,0}^{(\pm 2)} = \\ &= \epsilon_{33}^T E_{3,0}^{(\pm 2)} - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} E_{3,0}^{(\pm 2)} = \epsilon_{33}^T (1 - k_{31}^2) E_{3,0}^{(\pm 2)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \frac{\partial D_{3,0}}{\partial t} d\Omega &= \epsilon_{33}^T (1 - k_{31}^2) \frac{\partial}{\partial t} \times \\ &\times \int_{\Omega} \left(\mp \frac{2V}{h_2} \pm \frac{(h + h_1) k_{31}^2}{2d_{31} (1 - k_{31}^2)} \kappa \right) d\Omega = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Запишем основные формулы для балки с короткозамкнутыми электродами с учетом формул (7):

$$\begin{aligned} \sigma_{11,0}^{(\pm 2)} &= \mp \frac{(h + h_1) k_{31}^2}{2s_{11}^E (1 - k_{31}^2)} \kappa, \quad \sigma_{11,1}^{(\pm 2)} = \frac{1}{s_{11}^E (1 - k_{31}^2)} \kappa; \\ E_{3,0}^{(\pm 2)} &= \pm (h + h_1) \varphi_{,2}^{(\pm 2)}, \quad E_{3,1}^{(\pm 2)} = -2\varphi_{,2}^{(\pm 2)}; \\ \varphi_{,2}^{(\pm 2)} &= \frac{k_{31}^2}{2d_{31} (1 - k_{31}^2)} \kappa; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\varphi^{(\pm 2)} = (x_3 \mp h_1)(x_3 \mp h) \frac{k_{31}^2}{2d_{31} (1 - k_{31}^2)} \kappa;$$

$$D_{3,0}^{(\pm 2)} = \pm \frac{\epsilon_{33}^T (h + h_1) k_{31}^2}{2d_{31}} \kappa.$$

Перейдем в полученных формулах к обозначениям, принятым в теории балок. Интегрируя напряжения по толщине балки, находим результирующую поперечную силу N и изгибающий момент G :

$$\begin{aligned} N &= - \int_{-h}^{+h} \sigma_{13} dx_3; \\ G &= - \int_{h_1}^h \sigma_{11}^{(2)} x_3 dx_3 - \int_{-h_1}^0 \sigma_{11}^{(1)} x_3 dx_3 - \int_{-h}^{-h_1} \sigma_{11}^{(-2)} x_3 dx_3. \end{aligned} \quad (20)$$

Проинтегрировав уравнения движения и уравнения состояния для каждого слоя по переменной x_3 , получим одномерное уравнение для трехслойной электроупругой балки. В качестве примера рассмотрим гармонические колебания трехслойной балки по переменной t по закону $e^{-i\omega t}$, где переменная t — время; ω — круговая частота. Выпишем все уравнения и краевые условия относительно амплитудных значений искомых величин.

Выпишем уравнения изгибных колебаний балки с короткозамкнутыми электродами:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dx} + Z + 2h\rho\omega^2 w, \quad N &= \frac{dG}{dx}, \\ G &= M\kappa, \quad \kappa = \frac{d^2 w}{dx^2}, \quad Z = -(q_3^+ + q_3^-), \\ M &= -\frac{2h_1^3 E}{3} - \frac{2(h^3 - h_1^3)}{3s_{11}^E(1-k_{31}^2)} \left(1 - \frac{3h_2(h+h_1)^2 k_{31}^2}{4(h^3 - h_1^3)} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

После решения одномерной задачи можно найти напряжения и электрические величины по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_{11,0}^{(\pm 2)} &= \mp \frac{(h+h_1)k_{31}^2}{2s_{11}^E(1-k_{31}^2)} \kappa, \quad \sigma_{11,1}^{(\pm 2)} = \frac{1}{s_{11}^E(1-k_{31}^2)} \kappa, \\ E_{3,0}^{(\pm 2)} &= \pm \frac{(h+h_1)k_{31}^2}{2d_{31}(1-k_{31}^2)} \kappa, \quad E_{3,1}^{(\pm 2)} = -\frac{k_{31}^2}{d_{31}(1-k_{31}^2)} \kappa, \\ D_{3,0}^{(\pm 2)} &= \epsilon_{33}^T(1-k_{31}^2) E_{3,0}^{(\pm 2)}. \end{aligned} \quad (22)$$

Выпишем уравнения изгибных колебаний балки с разомкнутыми электродами:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dx_1} + Z + 2h\rho\omega^2 w, \quad N &= \frac{dG}{dx_1}, \\ G &= M\kappa + Q, \quad \kappa = \frac{d^2 w}{dx_1^2}, \\ Z &= -(q_3^+ + q_3^-); \\ M &= -\frac{2h_1^3 E}{3} - \frac{2(h^3 - h_1^3)}{3s_{11}^E(1-k_{31}^2)} \times \\ &\times \left(1 - \frac{3h_2(h+h_1)^2 k_{31}^2}{4(h^3 - h_1^3)} \right); \\ Q &= -\frac{d_{31}}{s_{11}^E} \frac{h^2 - h_1^2}{h_2} 2V = \\ &= -\frac{h_2(h+h_1)^2}{2l} \frac{k_{31}^2}{s_{11}^E(1-k_{31}^2)} \left(\frac{dw}{dx} \Big|_{x=l} - \frac{dw}{dx} \Big|_{x=0} \right); \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{11,0}^{(\pm 2)} &= \pm \frac{2d_{31}}{h_2 s_{11}^E} V \mp \frac{(h+h_1)k_{31}^2}{2s_{11}^E(1-k_{31}^2)} \kappa; \\ \sigma_{11,1}^{(\pm 2)} &= \frac{1}{s_{11}^E(1-k_{31}^2)} \kappa; \\ E_{3,1}^{(\pm 2)} &= -\frac{k_{31}^2}{d_{31}(1-k_{31}^2)} \kappa; \\ D_{3,0}^{(\pm 2)} &= \epsilon_{33}^T(1-k_{31}^2) E_{3,0}^{(\pm 2)}. \end{aligned} \quad (25)$$

По формулам (25) можно вычислить напряжения и электрические величины балки с разомкнутыми электродами.

Колебания балки со сплошными электродами в окрестности ее резонансных частот

Рассмотрим случай, когда на балку действует только постоянная нагрузка Z_* .

Введем безразмерные искомые величины:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{x_1}{l}, \quad w_* = \frac{w}{l}, \quad \kappa_* = l \kappa = \frac{d^2 w_*}{d\xi^2}, \\ N_* &= \frac{l^2}{M} N, \quad G_* = \frac{l}{M} G, \\ Z_* &= \frac{l^3}{M} Z, \quad Q_* = Q \frac{l}{M}. \end{aligned} \quad (26)$$

Пусть электроды балки короткозамкнуты.

С учетом формул (26) система уравнений (21) переписывается в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dN_*}{d\xi} + Z_* - \lambda^4 w_* &= 0, \\ N_* &= \frac{dG_*}{d\xi}, \quad G_* = \kappa_*, \quad \kappa_* = \frac{d^2 w_*}{d\xi^2}. \end{aligned} \quad (27)$$

Разрешающее уравнение для задачи изгиба записывается, как:

$$\frac{d^4 w_*}{d\xi^4} - \lambda^4 w_* + Z_* = 0, \quad \lambda^4 = -\frac{2h\rho\omega^2 l^4}{M}. \quad (28)$$

Его решение имеет вид:

$$\begin{aligned} w_* &= c_1 ch\lambda\xi + c_2 sh\lambda\xi + \\ &+ c_3 cos\lambda\xi + c_4 sin\lambda\xi + \frac{1}{\lambda^4} Z_*. \end{aligned} \quad (29)$$

Безразмерные перерезывающее усилие и изгибающий момент определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} G_* &= \lambda^2 (c_1 ch\lambda\xi + c_2 sh\lambda\xi - c_3 cos\lambda\xi - c_4 sin\lambda\xi); \\ N_* &= \lambda^3 (c_1 sh\lambda\xi + c_2 ch\lambda\xi + c_3 sin\lambda\xi - c_4 cos\lambda\xi). \end{aligned}$$

Произвольные постоянные интегрирования c_1 и c_2 определяются из условий на концах балки:

$$\begin{aligned} w_* \Big|_{\xi=0} &= 0, \quad \frac{dw_*}{dx_1} \Big|_{\xi=0} = 0; \\ G_* \Big|_{\xi=1} &= 0, \quad N_* \Big|_{\xi=1} = 0. \end{aligned} \quad (30)$$

Найдем произвольные константы интегрирования c_1, c_2, c_3, c_4 , удовлетворяя условиям (29):

$$\begin{aligned} c_3 &= -c_1 - \frac{1}{\lambda^4} Z_*, \quad c_4 = -c_2, \\ c_1 &= -\frac{Z_*}{2\lambda^4 \delta} (ch\lambda \cos \lambda + sh\lambda \sin \lambda + 1), \\ c_2 &= \frac{Z_*}{2\lambda^4 \delta} (ch\lambda \sin \lambda + sh\lambda \cos \lambda), \\ \delta &= ch\lambda \cos \lambda + 1. \end{aligned} \quad (31)$$

Первые три значения безразмерного частотного параметра λ на резонансах, найденные из частотного уравнения (31), равны 1,875, 4,694, 7,855.

Рассмотрим задачу о колебаниях балки с разомкнутыми электродами.

Система уравнений относительно безразмерных искомых величин для балки с разомкнутыми электродами имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dN_*}{d\xi} + Z_* - \lambda^4 w_* &= 0, \quad N_* = \frac{dG_*}{d\xi}, \\ G_* &= \kappa_* + Q_*, \quad \kappa_* = \frac{d^2 w_*}{d\xi^2}, \end{aligned} \quad (32)$$

где

$$Q_* = -\frac{h_2(h+h_1)^2}{2s_{11}^E M} \frac{k_{31}^2}{1-k_{31}^2} \left(\left. \frac{dw_*}{d\xi} \right|_{\xi=1} - \left. \frac{dw_*}{d\xi} \right|_{\xi=0} \right). \quad (33)$$

Разрешающее уравнение имеет вид (28). Его решение записывается в виде (29).

Безразмерные изгибающий момент и перерезывающая сила определяются по формулам:

$$\begin{aligned} G_* &= \lambda^2 (c_1 ch\lambda \xi + c_2 sh\lambda \xi - c_3 \cos \lambda \xi - c_4 \sin \lambda \xi) + \\ &+ \lambda (c_1 sh\lambda + c_2 ch\lambda - c_3 \sin \lambda + c_4 \cos \lambda); \\ N_* &= \frac{1}{\lambda^3} (c_1 sh\lambda \xi + c_2 ch\lambda \xi + c_3 \sin \lambda \xi - c_4 \cos \lambda \xi); \end{aligned}$$

$$t = -\frac{h_2(h+h_1)^2}{2s_{11}^E M} \frac{k_{31}^2}{1-k_{31}^2}.$$

Удовлетворяя граничным условиям (30), получим следующие формулы для произвольных постоянных интегрирования:

$$\begin{aligned} c_1 &= -\frac{Z_*}{2\lambda^4 \delta} \left(\lambda_2 (ch\lambda \cos \lambda + sh\lambda \sin \lambda + 1) + \right. \\ &\left. + 2t ch\lambda \sin \lambda \right); \\ c_2 &= \frac{Z_*}{2\lambda^4 \delta} (\lambda_2 (ch\lambda \sin \lambda + sh\lambda \cos \lambda) + 2t sh\lambda \sin \lambda); \\ c_3 &= -c_1 - \frac{1}{\lambda^4} Z_*, \quad c_4 = -c_2; \\ \delta &= \lambda (ch\lambda \cos \lambda + 1) + t (ch\lambda \sin \lambda + sh\lambda \cos \lambda). \end{aligned} \quad (34)$$

Введем понятие эффективности f пассивного гашения колебаний с помощью пьезоэлектрического эффекта. Примем за эффективность пассивного гашения колебаний отношение абсолютной величины разности резонансных частот, имеющих

одинаковые номера для балки с разомкнутыми и короткозамкнутыми электродами соответственно к резонансным частотам балки с короткозамкнутыми электродами:

$$f = \frac{|\omega^{(sh)} - \omega^{(d)}|}{\omega^{(sh)}} = \frac{|\lambda^{(sh)} - \lambda^{(d)}|}{\lambda^{(sh)}}. \quad (35)$$

Величины λ^2 входят в формулу во второй степени, так как, согласно второй формуле (28), частота ω пропорциональна λ^2 .

Табл. 1. Значения безразмерного частотного параметра при резонансах балки со сплошными электродами и эффективность гашения колебаний для первых пяти резонансных частот

Table 1. Values of the dimensionless frequency parameter at resonances of the beam with solid electrodes and the efficiency of vibration damping for the first five resonant frequencies

n	1	2	3	4	5
$\lambda^{(sh)}$	1,8750	4,6940	7,8547	10,9954	14,1371
$\lambda^{(d)}$	1,9021	4,7155	7,8672	11,0044	14,1441
f	0,0291	0,0092	0,0032	0,0032	0,0001

Примечание: n — номер резонансной частоты колебаний; $\lambda^{(sh)}$ и $\lambda^{(d)}$ — значения безразмерного частотного параметра на резонансах балки с короткозамкнутыми или разомкнутыми электродами соответственно.

Note: n — is the number of the resonant frequency of oscillation; $\lambda^{(sh)}$ and $\lambda^{(d)}$ — values of the dimensionless frequency parameter at the beam resonances with short-circuited or open-circuited electrodes, respectively.

Расчет выполнялся для балки из железобетона со слоями предварительно поляризованной пьезо-керамики с сильным пьезоэлектрическим эффектом PZ29, $h_2/h_1 = 0,1$.

Из табл. 1 видно, что наибольшая эффективность в случае сплошных электродов достигается на основной (первой) резонансной частоте колебаний балки и быстро уменьшается с увеличением номера резонансной частоты. Эффективность гашения изгибных колебаний невелика и уменьшается с увеличением номера резонансной частоты.

Табл. 1 составлена для консольной балки. При других краевых условиях эффективность может быть нулевой. Например, если края балки жестко заделаны, то величина $Q(33)$ равна нулю, так как углы поворота жестко заделанных краев балки равны нулю. В этом случае системы уравнений для слоистой балки с короткозамкнутыми и разомкнутыми электродами совпадают, а значит, совпадают и их собственные частоты.

Выше мы рассматривали балку со сплошными электродами. Можно предположить, что использование разрезных электродов будет более эффективно для пассивного гашения вибраций.

Изгибные колебания балки с разрезными электродами (пьезослой с толщиной поляризации)

В случае короткозамкнутых электродов не имеет значения, сплошные электроды или разрезные, так как в этом случае электрический потенциал на электродах равен нулю. Формулы (28)–(30) для искомых величин сохраняют силу. Собственные частоты найдены выше (табл. 1).

На рис. 2 представлено схематическое изображение слоистой балки с разрезными электродами.

Предположим, что длина каждого разрезного электрода не больше толщины балки. Каждый электрод разрезан на m электродов одинаковой длины. Длина каждой пары разрезных электродов будет $l_i = l/m$, $l_i/l < h$. В этом случае для каждой пары электродов (для каждого i -го отрезка балки, покрытого сплошными электродами) формула для Q_i запишется в виде (33):

$$Q_i = -\frac{h_2(h+h_1)^2}{2l_i} \frac{k_{31}^2}{s_{11}^E(1-k_{31}^2)} \times \\ \times \left(\frac{dw}{dx_1} \Big|_{x_1=x_{1,i+1}} - \frac{dw}{dx_1} \Big|_{x_1=x_{1,i}} \right), \\ l_i = x_{1,i+1} - x_{1,i}.$$

В формуле отношение

$$\frac{dw}{dx_1} \Big|_{x_1=x_{1,i+1}} - \frac{dw}{dx_1} \Big|_{x_1=x_{1,i}}$$

представляет собой приращение первой производной w , деленное на приращение аргумента x .

Перейдем от отношения приращения первых производных от прогибов к приращению аргумента l_i к дифференциальной записи, получим:

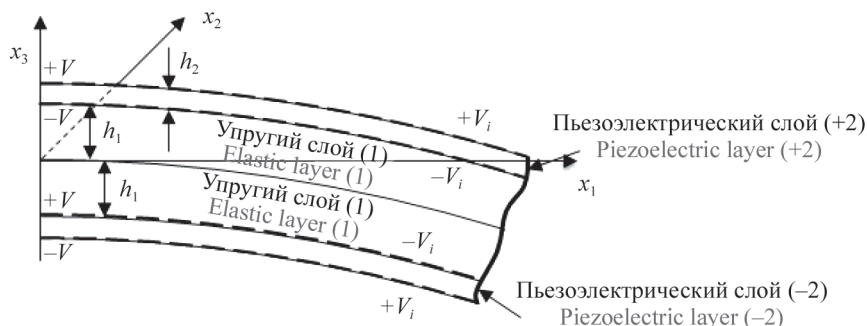


Рис. 2. Схематическое изображение структуры слоистой балки с разрезными электродами

Fig. 2. Schematic representation of the structure of a layered beam with split electrodes

$$Q = -\frac{h_2(h+h_1)^2}{2} \frac{k_{31}^2}{s_{11}^E(1-k_{31}^2)} \frac{d^2w}{dx_1^2} = \\ = -\frac{h_2(h+h_1)^2}{2} \frac{k_{31}^2}{s_{11}^E(1-k_{31}^2)} \kappa. \quad (36)$$

Учитывая формулу (36), соотношения упругости для изгибающих моментов запишем следующим образом:

$$G = M_1 \kappa, \quad M_1 = -\frac{2h_1^3 E}{3} - \frac{2(h^3 - h_1^3)}{3s_{11}^E(1-k_{31}^2)} \times \\ \times \left(1 - \frac{3h_2(h+h_1)^2 k_{31}^2}{4(h^3 - h_1^3)} \right) - \frac{h_2(h+h_1)^2}{2} \frac{k_{31}^2}{s_{11}^E(1-k_{31}^2)}. \quad (37)$$

Перейдем от размерных величин к безразмерным в уравнениях (32), (37) по формулам:

$$\xi = \frac{x_1}{l}, \quad w_* = \frac{w}{l}, \quad \kappa_* = l \kappa = \frac{d^2 w_*}{d\xi^2}, \quad N_* = \frac{l^2}{M} N, \\ G_* = \frac{l}{M} G, \quad Z_* = \frac{l^3}{aM} Z, \quad (38) \\ \lambda_1^4 = -\frac{2h\rho\omega^2 l^4}{aM}, \quad \lambda^4 = a\lambda_1^4, \quad a = \frac{M_1}{M},$$

где

$$M = -\frac{2h_1^3 E}{3} - \frac{2(h^3 - h_1^3)}{3s_{11}^E(1-k_{31}^2)} \left(1 - \frac{3h_2(h+h_1)^2 k_{31}^2}{4(h^3 - h_1^3)} \right). \\ \text{Формула} \quad \lambda^4 = a\lambda_1^4 \quad (39)$$

связывает безразмерный частотный параметр балки с разомкнутыми электродами λ_1 с соответствующим безразмерным частотным параметром балки с короткозамкнутыми электродами λ .

Разрешающее уравнение относительно безразмерного прогиба принимает вид:

$$\frac{d^4 w_*}{d\xi^4} - \lambda_1^4 w_* + Z_* = 0, \quad \lambda_1^4 = -\frac{2h\rho\omega^2 l^4}{aM}.$$

Формулы для искомых безразмерных величин:

$$\begin{aligned} w_* &= c_1 ch\lambda_1 \xi + c_2 sh\lambda_1 \xi + \\ &+ c_3 \cos\lambda_1 \xi + c_4 \sin\lambda_1 \xi + \frac{1}{\lambda_1^4} Z_*, \\ G_* &= \lambda_1^2 (c_1 ch\lambda_1 \xi + c_2 sh\lambda_1 \xi - c_3 \cos\lambda_1 \xi - c_4 \sin\lambda_1 \xi), \\ N_* &= \lambda_1^3 (c_1 sh\lambda_1 \xi + c_2 ch\lambda_1 \xi + c_3 \sin\lambda_1 \xi - c_4 \cos\lambda_1 \xi). \end{aligned} \quad (40)$$

Удовлетворяя краевым условиям консольной балки, найдем неизвестные постоянные c_1, c_2, c_3, c_4 :

$$\begin{aligned} c_3 &= -c_1 - \frac{1}{\lambda_1^4} Z_*, \quad c_4 = -c_2, \\ c_1 &= -\frac{Z_*}{2\lambda_1^4 \delta} (ch\lambda_1 \cos\lambda_1 + sh\lambda_1 \sin\lambda_1 + 1), \\ c_2 &= \frac{Z_*}{2\lambda_1^4 \delta} (ch\lambda_1 \sin\lambda_1 + sh\lambda_1 \cos\lambda_1), \\ \delta &= ch\lambda_1 \cos\lambda_1 + 1. \end{aligned}$$

Табл. 2. Значения безразмерного частотного параметра при резонансах балки с разрезными электродами и эффективность гашения колебаний для первых пяти резонансных частот

Table 2. Values of the dimensionless frequency parameter at resonances of a beam with split electrodes and the efficiency of vibration damping for the first five resonant frequencies

n	1	2	3	4	5
$\lambda^{(sh)}$	1,8750	4,6940	7,8547	10,9954	14,1371
$\lambda^{(d)}$	1,9125	4,7878	8,0117	11,2152	14,4197
f	0,0404	0,0404	0,0404	0,0404	0,0404

Сравнивая табл. 1 и 2, заметим, что в случае разрезных электродов эффективность выше, чем для сплошных электродов, и она постоянная для всех частот.

На рис. 3 кривые красного цвета изображают величины w_*, G_*, N_* для балки с короткозамкнутыми электродами, кривые синего цвета — те же величины для балки с разомкнутыми электродами. В расчете использовалась частота, которая на 0,5 % меньше первой резонансной частоты с короткозамкнутыми электродами. Расчет подтверждает эффективность предлагаемого нового метода.

Пьезокерамика с продольной поляризацией

Рассмотрим балку с пьезоэлектрическими слоями с продольной предварительной поляризацией вдоль оси балки. Схема строения балки представлена на рис. 4. Стрелками на рис. 4 показано направление предварительной поляризации пьезокерамики. Пьезокерамика такой структуры широко используется в электронике, робототехнике, измерительных приборах и т.д., поскольку обладает большим коэффициентом электромеханической связи.

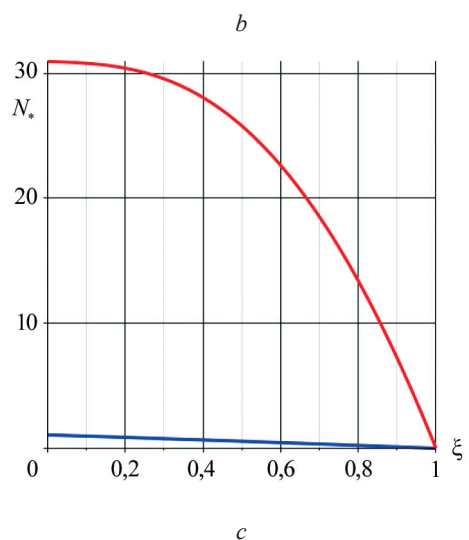
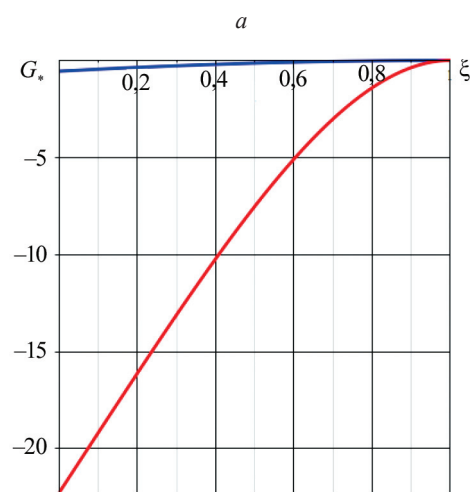
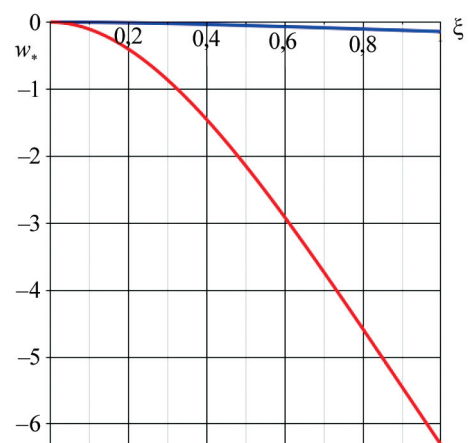


Рис. 3. Зависимость безразмерных искомых величин от продольной безразмерной координаты ξ вблизи первой резонансной частоты: a — безразмерный прогиб w_* ; b — безразмерный изгибающий момент G_* ; c — безразмерная поперечная сила N_* .

Fig. 3. Dependence of the dimensionless sought quantities on the longitudinal dimensionless coordinate ξ near the first resonant frequency: a — dimensionless deflection w_* ; b — dimensionless bending moment G_* ; c — dimensionless transverse force N_* .

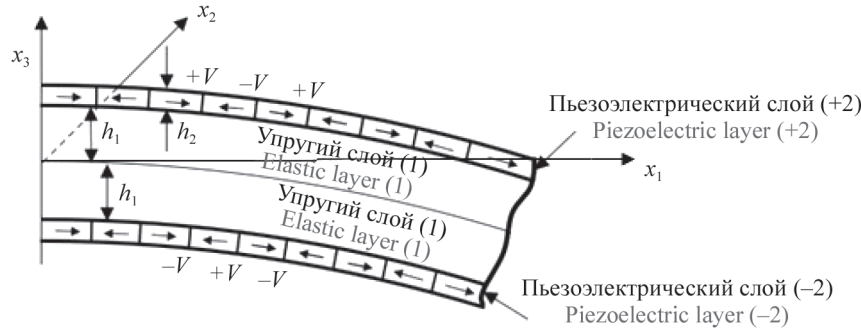


Рис. 4. Схематическое строение слоистой балки с пьезоэлектрическими слоями с продольной поляризацией пьезоэлектрических слоев

Fig. 4. Schematic structure of a layered beam with piezoelectric layers with longitudinal polarization of the piezoelectric layers

На рис. 4 изображена составная пьезокерамика с продольной поляризацией. Предположим, что длина каждого участка пьезокерамики не больше толщины балки. Электроды покрывают края каждого отрезка пьезоэлектрического слоя.

Основные соотношения для пьезоэлектрических слоев с продольной поляризацией имеют вид [2]:

$$\sigma_{11}^{(\pm 2)} = \frac{1}{s_{33}^E} e_1^{(\pm 2)} - \frac{d_{33}}{s_{33}^E} E_1^{(\pm 2)}; \quad (41)$$

$$D_1^{(\pm 2)} = \epsilon_{33}^T E_1^{(\pm 2)} + d_{33} \sigma_{11}^{(\pm 2)}; \quad (42)$$

$$\frac{dD_1^{(\pm 2)}}{dx_1} = 0, \quad E_1^{(\pm 2)} = -\frac{d\phi^{(\pm 2)}}{dx_1},$$

где E_1 и D_1 — компоненты вектора электрического поля и вектора электрической индукции в направлении x_1 ; s_{33}^E — упругая податливость при нулевом электрическом поле; d_{33} — пьезоэлектрическая проницаемость; ϵ_{33}^T — диэлектрическая проницаемость при нулевых напряжениях. Используемые обозначения те же, что и в работе [19].

Уравнения движения и уравнения для упругого среднего слоя балки (1), (3) сохраняют силу.

Будем использовать два типа электрических условий на электродах — на короткозамкнутых электродах электрический потенциал равен нулю, на разомкнутых электродах интеграл по поверхности электрода от компоненты D_1 вектора электрической индукции равен нулю:

$$\int_{h_1}^h D_1|_{x_1=x_{1,j}} dx_3 = 0, \quad \int_{-h}^{-h_1} D_1|_{x_1=x_{1,j}} dx_3 = 0.$$

В результате простых преобразований, аналогичных проделанным выше, получим следующие уравнения для балки с короткозамкнутыми электродами:

$$\frac{dN}{dx_1} + Z + 2h\rho\omega^2 w, \quad N = \frac{dG}{dx_1}, \quad G = M\kappa, \quad \kappa = \frac{d^2 w}{dx_1^2}, \quad (43)$$

$$Z = -(q_3^+ + q_3^-),$$

$$M_2 = -\frac{2h_1^3 E}{3} - \frac{2(h^3 - h_1^3)}{3s_{33}^E(1 - k_{33}^2)} \left(1 - \frac{3h_2(h + h_1)^2 k_{33}^2}{4(h^3 - h_1^3)} \right).$$

Введем безразмерные искомые значения:

$$\xi = \frac{x_1}{l}, \quad w_* = \frac{w}{l}, \quad \kappa_* = l\kappa = \frac{d^2 w_*}{d\xi^2}, \quad (44)$$

$$N_* = \frac{l^2}{M_2} N, \quad G_* = \frac{l}{M_2} G, \quad Z_* = \frac{l^3}{M_2} Z.$$

С учетом формул (44) система уравнений (43) переписывается в виде ($V = 0, Q = 0$):

$$\frac{dN_*}{d\xi} + Z_* - \lambda_2^4 w_* = 0, \quad N_* = \frac{dG_*}{d\xi}, \quad (45)$$

$$G_* = \kappa_*, \quad \kappa_* = \frac{d^2 w_*}{d\xi^2}.$$

Разрешающее уравнение для задачи изгиба записывается, как:

$$\frac{d^4 w_*}{d\xi^4} - \lambda_2^4 w_* + Z_* = 0, \quad (46)$$

$$\lambda_2^4 = -\frac{2h\rho\omega^2 l^4}{M_2}.$$

Найдем решение уравнения (46):

$$w_* = c_1 ch\lambda_2 \xi + c_2 sh\lambda_2 \xi + c_3 \cos\lambda_2 \xi + c_4 \sin\lambda_2 \xi + \frac{1}{\lambda_2^4} Z_*; \quad (47)$$

$$G_* = \lambda_2^2 (c_1 ch\lambda_2 \xi + c_2 sh\lambda_2 \xi - c_3 \cos\lambda_2 \xi - c_4 \sin\lambda_2 \xi);$$

$$N_* = \lambda_2^3 (c_1 sh\lambda_2 \xi + c_2 ch\lambda_2 \xi + c_3 \sin\lambda_2 \xi - c_4 \cos\lambda_2 \xi). \quad (48)$$

Произвольные постоянные интегрирования c_1 и c_2 определяются из условий на концах балки:

$$w_*|_{\xi=0} = 0, \quad \frac{dw_*}{d\xi}|_{\xi=0} = 0, \quad (49)$$

$$G_*|_{\xi=1} = 0, \quad N_*|_{\xi=1} = 0.$$

Найдем произвольные постоянные интегрирования c_1, c_2, c_3, c_4 :

$$\begin{aligned}
c_3 &= -c_1 - \frac{1}{\lambda_2^4} Z_*, \quad c_4 = -c_2, \\
c_1 &= -\frac{Z_*}{2\lambda_2^4 \delta} (ch\lambda_2 \cos \lambda_2 + sh\lambda_2 \sin \lambda_2 + 1), \\
c_2 &= \frac{Z_*}{2\lambda_2^4 \delta} (ch\lambda_2 \sin \lambda_2 + sh\lambda_2 \cos \lambda_2), \\
\delta &= ch\lambda_2 \cos \lambda_2 + 1.
\end{aligned} \quad (50)$$

Безразмерные собственные частотные параметры балки с короткозамкнутыми электродами находятся из уравнения (50).

Разомкнутые электроды

В этом случае при продольной поляризации каждый пьезоэлектрический слой состоит из отдельных участков длиной l/m . Длина участка l_i должна быть малой величиной порядка толщины балки, а его края покрыты электродами.

Соотношения упругости для изгибающих моментов запишем следующим образом:

$$\begin{aligned}
G &= M_3 \kappa, \quad M_3 = -\frac{2h_1^3 E}{3} - \frac{2(h^3 - h_1^3)}{3s_{33}^E (1 - k_{33}^2)} \times \\
&\times \left(1 - \frac{3h_2(h + h_1)^2 k_{33}^2}{4(h^3 - h_1^3)} \right) - \frac{h_2(h + h_1)^2}{2} \frac{k_{33}^2}{s_{33}^E (1 - k_{33}^2)}.
\end{aligned} \quad (51)$$

Остальные уравнения теории изгиба слоистой балки не меняются.

Рассмотрим случай, когда на балку действует только постоянная нагрузка Z_* .

Введем безразмерные искомые значения. Перейдем от размерных величин к безразмерным в уравнениях (32), (51) по формулам:

$$\begin{aligned}
\xi &= \frac{x_1}{l}, \quad w_* = \frac{w}{l}, \quad \kappa_* = l \kappa = \frac{d^2 w_*}{d\xi^2}, \\
N_* &= \frac{l^2}{M_2} N, \quad G_* = \frac{l}{M_2} G, \quad Z_* = \frac{l^3}{bM_2} Z, \\
\lambda_3^4 &= -\frac{2h\rho\omega^2 l^4}{bM_2}, \quad \lambda_2^4 = b\lambda_3^4, \quad b = \frac{M_3}{M_2},
\end{aligned} \quad (52)$$

где

$$M_2 = -\frac{2h_1^3 E}{3} - \frac{2(h^3 - h_1^3)}{3s_{33}^E (1 - k_{33}^2)} \left(1 - \frac{3h_2(h + h_1)^2 k_{33}^2}{4(h^3 - h_1^3)} \right).$$

Формула

$$\lambda_2^4 = b\lambda_3^4 \quad (53)$$

связывает безразмерный частотный параметр балки с разомкнутыми электродами λ_1 с соответствующим безразмерным частотным параметром балки с короткозамкнутыми электродами λ .

Разрешающее уравнение относительно безразмерного прогиба принимает вид:

$$\frac{d^4 w_*}{d\xi^4} - \lambda_3^4 w_* + Z_* = 0, \quad \lambda_3^4 = -\frac{2h\rho\omega^2 l^4}{b^4 M_2}.$$

Формулы для искомых безразмерных величин:

$$\begin{aligned}
w_* &= c_1 ch\lambda_1 \xi + c_2 sh\lambda_1 \xi + \\
&+ c_3 \cos \lambda_1 \xi + c_4 \sin \lambda_1 \xi + \frac{1}{\lambda_1^4} Z_*;
\end{aligned} \quad (54)$$

$$G_* = \lambda_1^2 (c_1 ch\lambda_1 \xi + c_2 sh\lambda_1 \xi - c_3 \cos \lambda_1 \xi - c_4 \sin \lambda_1 \xi);$$

$$N_* = \lambda_1^3 (c_1 sh\lambda_1 \xi + c_2 ch\lambda_1 \xi + c_3 \sin \lambda_1 \xi - c_4 \cos \lambda_1 \xi).$$

Удовлетворяя краевым условиям консольной балки, найдем неизвестные постоянные c_1, c_2, c_3, c_4 :

$$\begin{aligned}
c_3 &= -c_1 - \frac{1}{\lambda_1^4} Z_*, \quad c_4 = -c_2; \\
c_1 &= -\frac{Z_*}{2\lambda_1^4 \delta} (ch\lambda_1 \cos \lambda_1 + sh\lambda_1 \sin \lambda_1 + 1); \\
c_2 &= \frac{Z_*}{2\lambda_1^4 \delta} (ch\lambda_1 \sin \lambda_1 + sh\lambda_1 \cos \lambda_1); \\
\delta &= ch\lambda_1 \cos \lambda_1 + 1.
\end{aligned} \quad (55)$$

Табл. 3. Значения безразмерного частотного параметра для балки с продольной поляризацией при резонансах балки с электродами и эффективность гашения колебаний для первых пяти резонансных частот

Table 3. Values of the dimensionless frequency parameter for a beam with longitudinal pre-polarization at resonances of a beam with electrodes and the efficiency of vibration damping for the first five resonant frequencies

n	1	2	3	4	5
$\lambda^{(sh)}$	1,8750	4,6940	7,8547	10,9954	14,1371
$\lambda^{(d)}$	2,0625	5,1634	8,6402	12,0949	15,5508
f	0,2100	0,2100	0,2100	0,2100	0,2100

На рис. 5, 6 кривые красного цвета изображают величины w_* , G_* , N_* для балки с короткозамкнутыми электродами, кривые синего цвета — те же величины для балки с разомкнутыми электродами. Рис. 5 построен для частоты, которая на 0,5 % меньше первой резонансной частоты с короткозамкнутыми электродами. Рис. 6 построен для частоты, которая на 0,5 % меньше второй резонансной частоты с короткозамкнутыми электродами. В случае продольной поляризации эффективность существенно выше, чем при толщинной поляризации (см. табл. 2, 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные исследования показали, что эффективность гашения колебаний существенно зависит от направления поляризации пьезокерамики и от количества и расположения ее электродов.

В случае использования пьезокерамики с предварительной поляризацией по толщине балки, лицевые поверхности слоев которой покрыты сплошными электродами (табл. 1), эффективность гашения невелика.

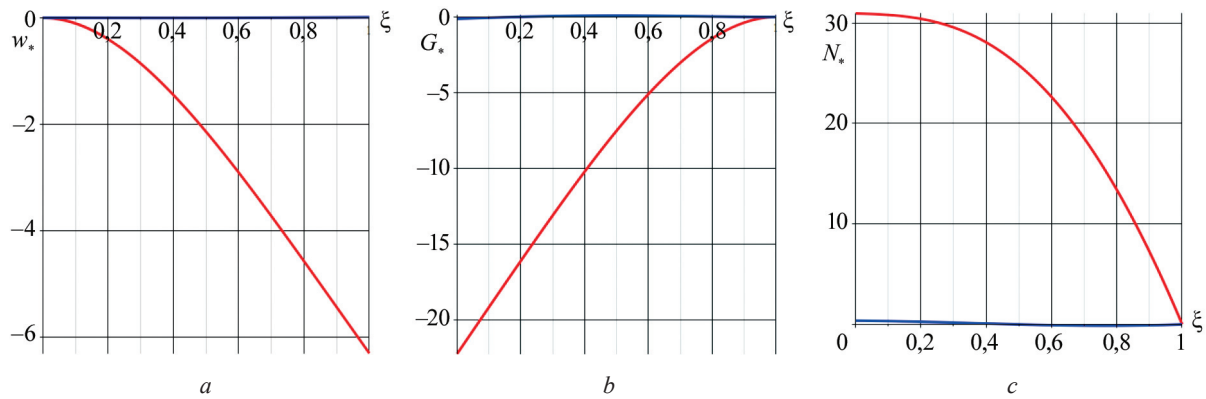


Рис. 5. Зависимость безразмерных искомых величин от продольной безразмерной координаты ξ вблизи первой резонансной частоты: a — безразмерный прогиб w_* ; b — безразмерный изгибающий момент G_* ; c — безразмерная поперечная сила N_* .

Fig. 5. Dependence of the dimensionless sought quantities on the longitudinal dimensionless coordinate ξ near the first resonant frequency: a — dimensionless deflection w_* ; b — dimensionless bending moment G_* ; c — dimensionless transverse force N_* .

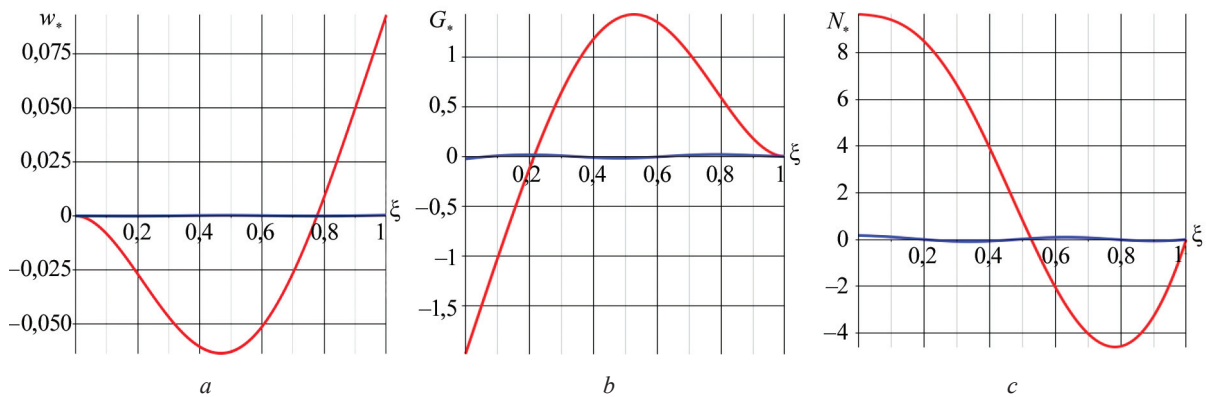


Рис. 6. Зависимость безразмерных искомых величин от продольной безразмерной координаты ξ вблизи второй резонансной частоты: a — безразмерный прогиб w_* ; b — безразмерный изгибающий момент G_* ; c — безразмерная поперечная сила N_* .

Fig. 6. Dependence of the dimensionless sought quantities on the longitudinal dimensionless coordinate ξ near the second resonant frequency: a — dimensionless deflection w_* ; b — dimensionless bending moment G_* ; c — dimensionless shear force N_* .

Более эффективным является использование разрезных электродов. Причем их количество должно быть достаточно велико, чтобы с принятой в теории балок точностью можно было заменить кусочно непрерывную функцию электрического потенциала от переменной x_1 непрерывной функцией, т.е. выполнить переход от конечных разностей к дифференциалам.

Рассмотрены пьезоэлектрические слои с толщиной и с продольной поляризацией.

Показано, что наличие большого количества электродов позволяет гасить амплитуду колебаний с одинаковой эффективностью на всех резонансных частотах (табл. 2, 3). Отметим, что при использовании пьезокерамики с продольной поляризацией

эффективность гашения колебаний существенно больше, чем при использовании пьезокерамики с толщиной поляризацией.

Новый предложенный способ не имеет аналогов, так как в отличие от других способов, которые уменьшают амплитуды колебаний на резонансах, предлагаемый метод предлагает уйти от резонансов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено исследование принципиально нового способа пассивного гашения колебаний конструкции в окрестности ее резонансных частот. Предлагаемый способ основан на использовании пьезоэлектрического материала, обладающего

сильным пьезоэлектрическим эффектом. Идея заключается в изменении электрических условий на электродах пьезоэлементов. При изменении электрических условий меняется связанная электроупругая краевая задача и ее спектр собственных частот. Исследования показали, что в уравнениях краевой задачи при изменении электрических краевых условий меняются уравнения состояния. Так, в рассмотренном выше численном примере для пьезоэлектрических слоев с разрезными электродами с толщиной поляризации отношение $M_1/M = 1,158$, с продольной поляризацией отношение $M_3/M_2 = 2,279$ (где M, M_2 — изгибная жесткость балки при короткозамкнутых электродах, M_1, M_3 — изгибная жесткость балки при разомкнутых электродах). Таким образом, изгибная жесткость композитной балки с пьезоэлектрическими слоями с толщиной поляризации увеличивается на 15,8 %, для

балки с продольной поляризацией увеличивается на 127,9 %.

Эффективность пассивного гашения колебаний той же балки на резонансных частотах при толщинной поляризации равна 0,0404, для балки с продольной поляризацией — 0,21.

Проведенное исследование убедительно доказывает преимущество использования пьезоэлектрических элементов с продольной поляризацией.

Отметим простоту пассивного гашения вибраций на резонансах с применением пьезоэффекта, безинерционность работы гашения вибраций, одинаковую эффективность гашения на всех резонансных частотах, а также стабильность свойств пьезоэлектрического материала гасителя в широком температурном и временном диапазоне и его низкую стоимость.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Preumont A.* Vibration control of active structures. John Wiley & Sons, 2008. 295 p.
2. *Rogacheva N.N.* The theory of piezoelectric shells and plates. Florida : Boca Raton : CRC Press, 1994. 249 p. EDN VQKGWT.
3. *Inmah D.J.* Vibration with control. Wiley Online Books, 2017.
4. *Kwak M.K.* Dynamic modeling and active vibration control of structures. Springer Dordrecht, 2021. 371 p. DOI: 10.1007/978-94-024-2120-0
5. *He W., Liu J.* Active vibration control and stability analysis of flexible beam systems. Springer, 2019. 212 p. DOI: 10.1007/978-981-10-7539-1
6. *Rogacheva N.N.* Active vibration suppression of a beam using piezoeffect // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 03024. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199703024
7. *Liu Z., Chen L., Sun L., Zhao L., Cui W., Guan H.* Multimode damping optimization of a long-span suspension bridge with damped outriggers for suppressing vortex-induced vibrations // Engineering Structures. 2023. Vol. 286. P. 115959. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115959
8. *Fujino Y., Siringoringo D.M., Ikeda Y., Nagayama T., Mizutani T.* Research and implementations of structural monitoring for bridges and buildings in Japan // Engineering. 2019. Vol. 5. Issue 6. Pp. 1093–1119. DOI: 10.1016/j.eng.2019.09.006
9. *Isić S., Mehremić S., Karabegović I., Husak E.* Systems for passive and active vibration damping // New Technologies, Development and Application II. 2019. Pp. 96–104. DOI: 10.1007/978-3-030-18072-0_10
10. *Zhang F., Liu J., Tian J.* Analysis of the vibration suppression of double-beam system via nonlinear switching piezoelectric network // Machines. 2021. Vol. 9. Issue 6. P. 115. DOI: 10.3390/machines9060115
11. *Dumitriu M.* Study on the effect of damping asymmetry of the vertical suspension on the railway bogie vibrations // Symmetry. 2022. Vol. 14. Issue 2. P. 327. DOI: 10.3390/sym14020327
12. *Huang K., Li T., Xu W., Cao L.* Effects of nonlinear damping on vibrations of microbeam // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 6. P. 3206. DOI: 10.3390/app12063206
13. *Mazur K., Rzepecki J., Pietruszewska A., Wrona S., Pawelczyk M.* Vibroacoustical performance analysis of a rigid device casing with piezoelectric shunt damping // Sensors. 2021. Vol. 21. Issue 7. P. 2517. DOI: 10.3390/s21072517
14. *Sidorov V.N., Badina E.S.* Computer simulation of structural vibration damping with allowance for nonlocal properties // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2020. Vol. 16. Issue 4. Pp. 86–91. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-4-86-91
15. *Sidorov V.N., Badina E.S., Detina E.P.* Nonlocal in time model of material damping in composite structural elements dynamic analysis // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 4. Pp. 14–21. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-4-14-21
16. *Сидоров В.Н., Бадина Е.С.* Конечно-элементное моделирование колебаний композитных балок с учетом демпфирования нелокального во времени // Механика композиционных материалов и конструкций. 2021. Т. 27. № 1. С. 65–72. DOI: 10.33113/mkmk.ras.2021.27.01.065_072.05. EDN CGFFUZ.

17. Rogacheva N.N. Passive vibration suppression of structures in the vicinity of natural frequencies using piezoeffect // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. Vol. 15. Issue 2. Pp. 125–134. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-2-125-134

18. Rogacheva N.N. The dynamic behaviour of piezoelectric laminated bars // *Journal of Applied Mathe-*

matics and Mechanics. 2007. Vol. 71. Issue 4. Pp. 494–510. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2007.09.004

19. Berlincourt D.A., Curran D.R., Jaffe H. Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducers // *Physical Acoustics*. 1964. Pp. 169–270. DOI: 10.1016/b978-1-4832-2857-0.50009-5

Поступила в редакцию 9 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 13 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 23 октября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Николаевич Сидоров** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 691222, Scopus: 39161892000, ResearcherID: C-3057-2018; SidorovVN@mgsu.ru;

Нэля Николаевна Рогачева — доктор физико-математических наук, доцент кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 17172, ORCID: 0009-0009-3409-378X; RogachevaNN@mgsu.ru;

Юлия Германовна Жеглова — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 940377, Scopus: 57202228987, ResearcherID: AAC-8875-2022, ORCID: 0000-0001-8121-8535; JeglovaYUG@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Preumont A. *Vibration control of active structures*. John Wiley & Sons, 2008; 295.
2. Rogacheva N.N. *The theory of piezoelectric shells and plates*. Florida, Boca Raton: CRC Press, 1994; 249. EDN VQKGWT.
3. Inmah D.J. *Vibration with control*. Wiley Online Books, 2017.
4. Kwak M.K. *Dynamic modeling and active vibration control of structures*. Springer Dordrecht, 2021; 371. DOI: 10.1007/978-94-024-2120-0
5. He W., Liu J. *Active vibration control and stability analysis of flexible beam systems*. Springer, 2019; 212. DOI: 10.1007/978-981-10-7539-1
6. Rogacheva N.N. Active vibration suppression of a beam using piezoeffect. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:03024. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703024
7. Liu Z., Chen L., Sun L., Zhao L., Cui W., Guan H. Multimode damping optimization of a long-span suspension bridge with damped outriggers for suppressing vortex-induced vibrations. *Engineering Structures*. 2023; 286:115959. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115959
8. Fujino Y., Siringoringo D.M., Ikeda Y., Nagayama T., Mizutani T. Research and implementations of structural monitoring for bridges and buildings in Japan. *Engineering and Mechanics*. 2007. Vol. 71. Issue 4. Pp. 494–510. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2007.09.004
9. Isić S., Mehremić S., Karabegović I., Husak E. Systems for passive and active vibration damping. *New Technologies, Development and Application II*. 2019; 96-104. DOI: 10.1007/978-3-030-18072-0_10
10. Zhang F., Liu J., Tian J. Analysis of the vibration suppression of double-beam system via nonlinear switching piezoelectric network. *Machines*. 2021; 9(6):115. DOI: 10.3390/machines9060115
11. Dumitriu M. Study on the effect of damping asymmetry of the vertical suspension on the railway bogie vibrations. *Symmetry*. 2022; 14(2):327. DOI: 10.3390/sym14020327
12. Huang K., Li T., Xu W., Cao L. Effects of nonlinear damping on vibrations of microbeam. *Applied Sciences*. 2022; 12(6):3206. DOI: 10.3390/app12063206
13. Mazur K., Rzepecki J., Pietruszewska A., Wrona S., Pawelczyk M. Vibroacoustical performance analysis of a rigid device casing with piezoelectric shunt damping. *Sensors*. 2021; 21(7):2517. DOI: 10.3390/s21072517
14. Sidorov V.N., Badina E.S. Computer simulation of structural vibration damping with allowance for nonlocal properties. *International Journal for Computational*

Civil and Structural Engineering. 2020; 16(4):86-91. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-4-86-91

15. Sidorov V.N., Badina E.S., Detina E.P. Non-local in time model of material damping in composite structural elements dynamic analysis. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(4):14-21. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-4-14-21

16. Sidorov V.N., Badina E.S. Finite element modelling of composite beams vibration taking into account damping nonlocal in time. *Mechanics of Composite Materials and Structures*. 2021; 27(1):65-72. DOI: 10.33113/mkmk.ras.2021.27.01.065_072.05. EDN CGFFUZ. (rus.).

17. Rogacheva N.N. Passive vibration suppression of structures in the vicinity of natural frequencies using piezoeffect. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019; 15(2):125-134. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-2-125-134

18. Rogacheva N.N. The dynamic behaviour of piezoelectric laminated bars. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2007; 71(4):494-510. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2007.09.004

19. Berlincourt D.A., Curran D.R., Jaffe H. Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducers. *Physical Acoustics*. 1964; 169-270. DOI: 10.1016/b978-1-4832-2857-0.50009-5

Received October 9, 2023.

Adopted in revised form on October 13, 2023.

Approved for publication on October 23, 2023.

B I O N O T E S: **Vladimir N. Sidorov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Department of the Department of Informatics and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 691222, Scopus: 39161892000, ResearcherID: C-3057-2018; SidorovVN@mgsu.ru;

Nelly N. Rogacheva — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 17172, Scopus: 0009-0009-3409-378X; RogachevaNN@mgsu.ru;

Yulia G. Zheglova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 940377, Scopus: 57202228987, ResearcherID: AAC-8875-2022, ORCID: 0000-0001-8121-8535; JeglovaYUG@mgsu.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

Экспериментальное исследование вклеенного вдоль волокон древесины стержня

Филипп Сергеевич Школяр, Александр Григорьевич Никитин,
Александра Игоревна Зацепина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Объект исследования — образцы клееной древесины с вклеенным в каждый образец арматурным стержнем периодического профиля. Предмет исследования — значения сопротивления древесины выдергиванию или продавливанию вклеенного вдоль волокон стержня, податливость данного соединения. Целью является вычисление сопротивления по результатам испытаний и сравнение полученного значения с нормативным, а также оценка податливости соединения. Актуальность обусловлена широким применением в строительстве конструкций из клееной древесины и узлов соединения на вклеенных стержнях. Полученные данные могут быть использованы в построении расчетных моделей и в расчете узлов.

Материалы и методы. Применены эксперимент и расчетные методы.

Результаты. Эксперимент проводился ступенчатой нагрузкой вплоть до разрушения, произошедшего вследствие скалывания вдоль волокон деревянного элемента на границе клеевой шов — деревянный элемент. По результатам исследования пяти образцов получены значения полных деформаций для каждой ступени нагружения. По этим данным вычислены и занесены в таблицу значения сопротивления древесины и податливости для каждого образца. Рассчитано нормативное значение сопротивления древесины, которое превысило значение, указанное в своде правил. Также получено численное нормативное значение податливости.

Выводы. Превышение сопротивления, полученного в результате эксперимента, значению в нормативном документе свидетельствует о применимости последнего, при этом будет обеспечен запас прочности. В расчете уникальных конструкций по специальным техническим условиям возможно применение увеличенного значения сопротивления, полученного по результатам эксперимента. Податливость у соединения, выполненного посредством вклеивания стержня вдоль волокон, мала, но есть. В деревянных конструкциях полностью от нее уйти не представляется возможным.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: клееная древесина, вклеенный стержень, жесткий стык, сопротивление выдергиванию, сопротивление продавливанию, податливость

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Школяр Ф.С., Никитин А.Г., Зацепина А.И. Экспериментальное исследование вклеенного вдоль волокон древесины стержня // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1915–1925. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1915-1925

Автор, ответственный за переписку: Александра Игоревна Зацепина, zatsepina.aleksandra@yandex.ru.

Experimental research of a rod glued along wood fibres

Filipp S. Shkoliar, Aleksandr G. Nikitin, Aleksandra I. Zatsepina

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The objects of the research are experimental specimens of glued laminated wood with a steel rod glued along the wood fibres in each of them. The subject of the research is the values of resistance of wood to pulling out or push-through of the rod glued along the fibres, as well as the compliance of the joint. The goal of the research is to calculate the resistance according to the test results and compare the obtained value with normative data. The relevance of the research is due to the widespread application in construction of glued wood structures and joints on glued rods. The obtained data can be used in calculation models and in the calculation of nodes.

Materials and methods. Experiment and calculation methods are used in the research.

Results. The results of five specimens were used to obtain the values of total deformations for each stage of loading. It occurred due to chipping of the wooden element along the fibres at the border of the adhesive joint and the wood. Wood resistance and compliance values for each specimen were calculated and tabulated. The normative value of wood resistance was obtained. It exceeded the value specified in the normative document data. A numerical normative value of compliance was also obtained.

Conclusions. The excess of the resistance obtained from the experiment over the value in the normative document indicates its applicability with provided safety factor. In the calculation of unique structures according to special technical specifications, it is possible to use an increased resistance value obtained as the result of the experiment. The compliance of a rigid joint on rods glued along the fibres is small. In wooden structures it is not possible to avoid it completely.

KEYWORDS: glued laminated wood, glued rod, rigid joint, pull-out resistance, push-through resistance, compliance

Acknowledgements. The team of authors express gratitude to anonymous reviewers.

FOR CITATION: Shkoliar F.S., Nikitin A.G., Zatsepina A.I. Experimental research of a rod glued along wood fibres. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1915-1925. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1915-1925 (rus.).

Corresponding author: Aleksandra I. Zatsepina, zatsepina.aleksandra@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Применение деревянных конструкций (ДК) во многих отраслях народного хозяйства, а также в производственных зданиях экономически целесообразно. По сравнению с железобетонными оно дает возможность уменьшить расход стали в 1,5–2,5 раза, трудоемкость монтажа до 2,5 раз. Снижение общего веса здания в 2,0–2,5 раза позволяет сократить расходы на транспортировку конструкций, в условиях России это обретает значимость, поскольку можно доставлять конструкции в отдаленные сельские районы и активно развивающиеся районы Дальнего Востока и Сибири [1, 2].

Особое внимание стоит уделить существенному экономическому эффекту, который возникает при использовании ДК в зданиях и сооружениях со средней различной степени химической агрессивности, в частности в складах реагентов и минеральных удобрений, бассейнах, открытых пространствах, где срок эксплуатации зданий и сооружений увеличивается в 2–3 раза, а их стоимость снижается на 30 % [3].

Перспективность данного вида конструкций обуславливает возможность применения в большепролетных зданиях и сооружениях, в которых древесина используется наиболее эффективно.

В то же время с применением большепролетных зданий и сооружений актуальным становится вопрос использования узловых соединений, позволяющих обеспечить высокую несущую способность и жесткость. Благодаря большой прочности и компактности решений стыки могут устраиваться без: дополнительных накладок, увеличения габаритов конструкций, серьезного увеличения материалоемкости конструкций. Это снимает транспортные и в значительной степени технологические проблемы клееных деревянных конструкций (КДК) [4].

На эффективность конструктивных решений в основном влияют следующие качественные характеристики соединений: конструктивные, технологические, функциональные и эксплуатационные показатели. Указанные показатели воздействуют неодинаково, так как они зависят от особенностей строительных конструкций, из-за чего оценка их

достоинств и недостатков достаточно условна. В конечном итоге эффективность производимых конструкций определяется комплексом свойств. М.С. Золотов, Г.Н. Зубарев, Ю.М. Иванов, Л.М. Ковальчук, А.В. Калугин рассматривают опыт применения стальных элементов в соединениях ДК, в том числе с точки зрения их деформационных характеристик, как наиболее важного показателя, который определяет жесткость и эксплуатационную надежность возводимых зданий и сооружений в целом [5–10].

История активного применения КДК в России насчитывает более четырех десятилетий. В конце 70-х годов прошлого столетия в СССР удалось развить эту новую на тот момент отрасль, однако возникла проблема нехватки конструкторского и производственного опыта, в связи с чем на практике встречались частые аварии конструкций. Для решения данной проблемы были организованы филиалы Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко в г. Волоколамске и в г. Нелидово, а в отраслевых НИИ — специальные отделы по исследованию и проектированию КДК. Обследование аварийных конструкций и их последующий анализ показали, что причины возникновения аварийных ситуаций в большинстве своем были схожи, это — ошибки в проектировании, нарушения в процессе изготовления, хранения и эксплуатации.

Как правило, разрушение происходило в результате недостаточной сдвиговой прочности клееной древесины из-за трещин в клеевых швах и неполного заполнения клеевым составом. Развитие аварийной ситуации происходило в две стадии. Первая стадия — сдвиг в середине высоты сечения или по другим плоскостям, в которых наблюдалось расслоение. Вторая — разрушение от изгиба ослабленного элемента составного сечения, у которого резко снижался момент сопротивления его сечения.

Для исправления этого положения в условиях массового производства наметили одновременно два пути: усиление конструкций в целях повышения сдвиговой прочности и совершенствования узловых соединений с проведением необходимых исследований; дифференцированное изучение при-

роды отказов, совершенствование технологических операций изготовления конструкций и их проектирования.

Изучением новых соединений с применением клеенных стержней занимались Г.Н. Зубарев и С.Б. Турковский [11–13]. В результате попыток повысить сдвиговую прочность и надежность конструкций ученые пришли к использованию клеенных стержней под углом 30–45 градусов к направлению волокон, что позволило решить многие проблемы, описанные выше. Их начали применять для усиления всех изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов, что практически исключило аварийные случаи из-за недостаточной сдвиговой прочности. С появлением таких соединений удалось получить равнопрочные жесткие стыки и узлы, в том числе для большепролетных конструкций, которым не было аналогов.

В дальнейших исследованиях большое внимание уделялось анализу работы подобных узлов. В этот период Н.Д. Пospelov провел ряд исследований, которые позволили определить различные факторы, влияющие на работу соединений на клеенных стержнях. Были сделаны выводы о том, что такие узлы хорошо работают при динамических нагрузках [14].

В настоящее время в России теоретические и экспериментальные работы в области соединений деревянных конструкций с применением стальных элементов, в том числе клеенных, ведутся в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (НИЦ «Строительство», г. Москва), МГСУ (г. Москва), СПбГАСУ (г. Санкт-Петербург), ПГУАС (г. Пенза) и т.д. такими учеными, как В.М. Вдовин, А.А. Погорельцев, С.Б. Турковский, А.Б. Шмидт и др. [15–17].

Нормативная методика расчета узлов на клеенных стальных стержнях была предложена группой ученых в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко под руководством С.Б. Турковского. Методика разработана в связи с внедрением в строительную практику системы узловых соединений на клеенных стержнях и называется «система ЦНИИСК» [13, 16]. Расчет данных узловых соединений базируется на методике, предлагаемой в СП 382.1325800.2017¹.

При использовании КДК важен вопрос обеспечения преимущественно жестких узловых соединений, которые дают возможность воспринимать значительные усилия за счет их оптимального перераспределения в конструктивных элементах. Например, в опорном узле деревянной стойки возникают усилия растяжения либо растяжения с изгибом, которые являются для дерева самыми неблагоприятными. Решить эту проблему можно путем использования в узловых соединениях стальных изделий, работающих на выдергивание.

В связи с вышесказанным можно сделать вывод об актуальности проблемы применения жестких и в то же время компактных технологичных при изготовлении и монтаже узлов клеенных деревянных конструкций, а также использовании в них клеенных стержней.

Большой вклад в изучение параметров древесины при использовании подобных соединений внесли российские и зарубежные ученые.

T. Shchelokova изучает деформации армированных деревянных балок, отмечая, что деформация армированных балок на 15–20 % меньше, чем неармированных. Исследование также показывает влияние естественных ослаблений (таких как сучки) на напряженно-деформированное состояние [18].

Другие авторы анализируют потенциальную применимость асимметричного армирования клеенных балок гладкими и ребристыми стальными стержнями, а также базальтовыми стержнями. Эти стержни размещаются только в зоне растяжения, где древесина работает на выдергивание. По результатам исследования балки, армированные сталью, обладают на 20 % большей прочностью, чем неармированные [19].

M. Totsuka и соавт. в своей статье [20] приводят анализ поведения клееного бруса при сжатии параллельно волокнам. Особое внимание уделено зонам повреждений вблизи плит, по которым прикладывалась нагрузка. Установлено, что длина зоны повреждения зависит от точности обработки контактной поверхности и имеет тенденцию к увеличению с ростом площади контактной поверхности. Эта работа важна для понимания деформативности образцов при проведении эксперимента.

Коллективом зарубежных авторов Jockwer R., Caprio D. и Jorissen A. изучены деформации соединений с поперечно нагруженными стержнями по результатам более 750 испытаний. В статье [21] даны рекомендации по достижению различных уровней пластичности и различных значений деформаций в зависимости от расстояния между крепежными элементами и других геометрических параметров. Это, безусловно, имеет практическое значение при проектировании узлов.

S.T. Akter и соавт. численно исследуют влияние структуры годовых колец как на локальное поведение материала, так и на глобальную прочность и смещения древесины при сжатии перпендикулярно волокнам [22].

В работе [23] обсуждаются выбранные подходы к проектированию соединений в деревянных балках, нагруженных перпендикулярно волокнам, и анализируется их поведение в отношении различных геометрических параметров. Наиболее важными параметрами по результатам исследования являются: высота и ширина балки, относительная высота соединения, его ширина и высота. В случае

¹ СП 382.1325800.2017. Конструкции деревянные клеенные на клеенных стержнях. Методы расчета.

нескольких соединений расстояние между соседними соединениями также имеет важное значение.

В статье [24] отмечается, что из соображений безопасности всегда рекомендуется предусматривать пластическое разрушение соединений ДК. Обычно предполагается, что этого можно достичь, выполнив требования по минимальному расстоянию между крепежными элементами. Тем не менее рассматривается необходимость учитывать режимы именно хрупкого разрушения в соединениях, нагруженных параллельно волокнам, чтобы оценить их и достичь желаемой пластичности.

Моделирование поведения под нагрузкой соединений клееного LVL-элемента с одним клееным стальным стержнем при различных направлениях нагрузки к волокнам 0, 45 и 90° описывается в труде [25]. Сравнение экспериментальных и численных данных иллюстрирует потенциал подхода инженерного моделирования для преодоления недостатков действующих правил проектирования, которые не могут надлежащим образом предсказать жесткостные свойства соединений на клеенных стержнях.

Многоэтапный подход к параметризации нелинейного и анизотропного поведения податливого соединения на стальных стержнях представлен в работе [26].

В исследовании [27] приводится анализ испытаний, показывающий завышение несущей способности соединений ДК, выполненных по DIN 1052:1988, на 10–25 %. Делается вывод о том, что проектирование согласно DIN 1052:1988 не соответствует уровню надежности, требуемому на сегодняшний день. Оценки также показывают, что некоторые значения несущей способности, полученные в соответствии с Eurocode 5, могут быть увеличены.

В статье М. Steilner и Н. J. Blaß [28] отмечается, что в соединениях древесины, выполненных с помощью металлических соединительных элементов, важным параметром является момент текучести крепежа. Разработан новый метод определения угла пластического изгиба, который не зависит от пластичности или хрупкости крепежа.

Поведение соединений на стальных стержнях европейских лиственных пород путем анализа испытаний, проведенных на древесине бука и ели, описывается в публикации [29]. Отмечается, что модель, предусмотренная Eurocode 5 для учета угла действия нагрузки к волокнам, лучше, чем SIA 265, но оптимизирована только для хвойных пород. По результатам испытаний значения прочности, указанные в нормах, оказываются завышенными в случаях приложения нагрузки под углом, отличным от 0°.

Franke S. и Magnière N. проводят обзор [30] различных методов тестирования и оценки прочности древесины на продавливание. Результаты показывают значительные различия между данно-

ми американских, европейских и международных стандартов.

Таким образом, по итогам анализа накопленного конструкторского опыта использования в ДК металлических изделий можно сделать вывод, что вопросы реальной прочности и деформативности узлов являются важными.

В научно-технической литературе отсутствуют научно обоснованные теоретические сведения, а также экспериментальные данные об опорных жестких узлах ДК с клееными вдоль волокон стержнями, также не приведены данные о реальной деформативности узла. Это обстоятельство определяет целесообразность изучения деформативности и несущей способности жесткого опорного узла деревянной стойки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применяются экспериментальные и расчетные методы исследования.

Цель работы — определение сопротивления древесины выдергиванию или продавливанию по результатам испытаний и сравнение полученного значения с указанным в своде правил, а также оценка податливости соединения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Установление необходимого количества и изготовление образцов из клееной древесины, склеивание в образцы металлических стержней из арматурной стали периодического профиля.
2. Разработка схемы испытания, обеспечивающей ступенчатое приложение нагрузки. Установка индикаторов деформаций.
3. Проведение испытания образцов с фиксацией деформаций каждого образца для каждой из 16 ступеней нагружения.
4. Обработка результатов испытаний: вычисление значений сопротивления древесины R и податливости K для каждого образца.
5. Вычисление на основе экспериментальных данных нормативных значений R_n и K_n в связи с их отношением к логнормальному распределению. Составление вычисленного значения R_n с указанными в своде правил.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение необходимого количества образцов

Минимальное количество испытываемых образцов вычисляют по формуле:

$$n_{\min} = \frac{c_v^2 t_\gamma^2}{P_\gamma^2},$$

где $c_v = 20\%$ — коэффициент вариации свойства древесины, %; $\gamma = 0,68$ — требуемая доверительная вероятность, принимается для ориентировочных

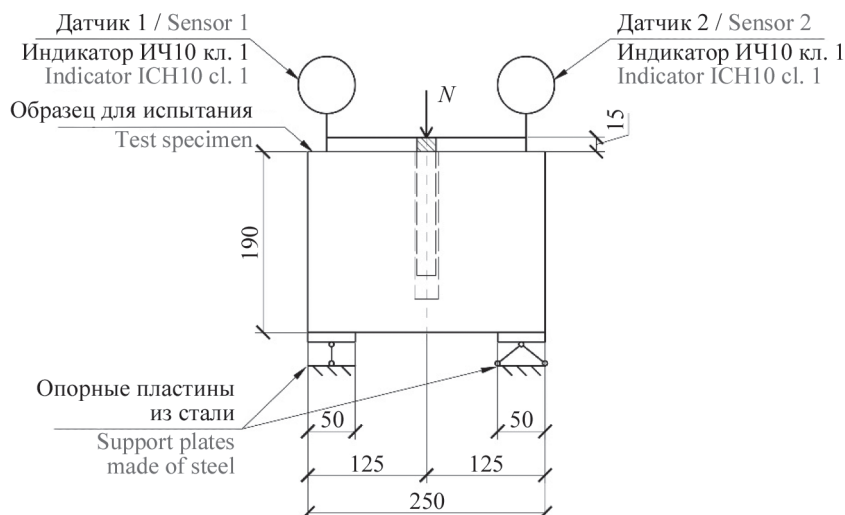


Рис. 2. Схема испытания образцов

Fig. 2. Scheme of experiment



Рис. 3. Общий вид испытательной установки

Fig. 3. General view of the test installation

схема испытания, на рис. 3 — общий вид испытательной установки.

Нагрузка на стержни прикладывалась ступенями по 4 кН до разрушения, которое во всех случаях происходило по границе клей – древесина из-за среза и скалывания древесины поперек волокон. Принимается 3 этапа режима нагружения опытных образцов:

- 1-й этап — предварительное нагружение до $0,4N_{\max} = 16$ кН;
- 2-й этап — разгрузка до $0,1N_{\max} = 4$ кН;
- 3-й этап — нагружение до разрушения.

Приложение нагрузки на образец проводилось с постоянной скоростью нагружения, которая обеспечила время до разрушения $t_{\max}$ в пределах от 40 с до 6 мин. На рис. 4 представлен режим нагружения опытных образцов.

На рис. 5 показан график зависимости деформаций от нагрузки для одного из испытываемых об-

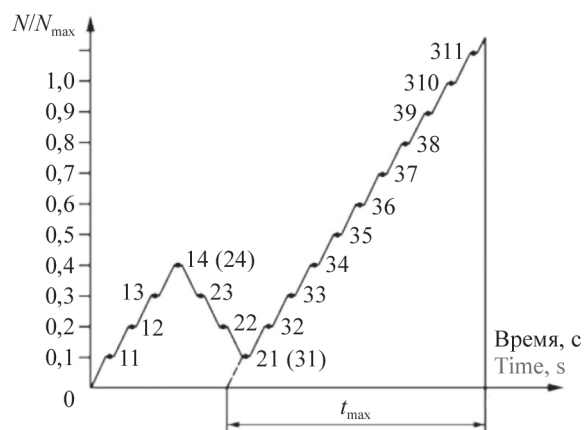


Рис. 4. Режим нагружения опытных образцов

Fig. 4. Loading mode of specimens

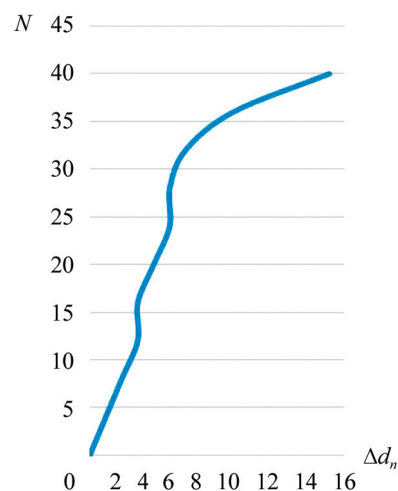


Рис. 5. Диаграмма зависимости разности полных деформаций для образца № 1

Fig. 5. Full strain difference diagram for specimen No. 1

разцов. Исходя из характера диаграмм, полученных в результате проведения эксперимента, можно сделать вывод, что данное соединение до нагрузки 30–35 кН работает близко к линейному в упругой стадии. После прохождения нагрузки 35 кН начинается стремительный рост деформаций и резкое падение нагрузки, что говорит о хрупком характере разрушения образцов. Разрушение происходит из-за скалывания древесины по клеевому шву. Следует отметить, что конструирование подобных узлов необходимо производить с учетом того, что они должны работать в упругой стадии, ограничивая их расчетную несущую способность коэффициентами надежности.

Обработка результатов испытаний

На основании результатов испытаний для каждого образца было определено сопротивление R древесины выдергиванию или продавливанию клеенного вдоль волокон стержня по формуле:

$$R = \frac{N_{\max}}{\pi l d_{\text{отв}}},$$

где R — сопротивление древесины выдергиванию или продавливанию клеенного вдоль волокон стержня по результатам испытаний, МПа; $N_{\max}$ — значение разрушающей нагрузки, Н; l — длина анкеровки (заделки) клеенного стержня, мм; $d_{\text{отв}}$ — диаметр отверстия под клеенный стержень, мм.

Податливость K рассчитали следующим образом:

$$K = \frac{(d_{11-14} + d_{24-21} + d_{31-34})}{3(N_{0,4} - N_{0,1})},$$

где K — податливость клеенного стержня при его выдергивании или продавливании, мм/Н; d_{11-14} , d_{24-21} , d_{31-34} — величины деформации клеенного стержня на трех этапах при изменении нагрузки от 0,1 до $0,4N_{\max}$, мм; $N_{0,4}$ и $N_{0,1}$ — величины нагрузки, соответствующие 0,1 и 0,4 величины разрушающей нагрузки $N_{\max}$ для клеенного стержня, Н.

Вычисленные значения занесены в таблицу.

Значения сопротивления древесины R и податливости K для каждого образца

Wood resistance R and compliance K values for each specimen

Номер образца Number of specimen	R , МПа MPa	K , мм/кН mm/kN
1	4,65	0,0128
2	4,62	0,0125
3	5,44	0,0089
4	4,51	0,0197
5	4,10	0,0253

Нормативные значения R_n и K_n определяются⁶ на основе результатов испытаний в предположении, что полученные результаты подчиняются логнормальному распределению, по формуле:

$$R_n = \exp(R_{\text{cp}} - k_s \cdot S_R),$$

где k_s определяют по табл. Б.1 в зависимости от количества образцов в выборке; R_{cp} рассчитывают по формуле:

$$R_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln R_i;$$

S_R устанавливают по выражению:

$$S_R = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln R_i - R_{\text{cp}})^2}.$$

Тогда нормативное значение сопротивления древесины выдергиванию или продавливанию клеенного вдоль волокон стержня R_n определим следующим образом:

$$R_n = \exp(1,536 - 2,463 \cdot 0,1016) = 3,62 \text{ МПа};$$

$$R_{\text{cp}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \ln R_i = 1,536;$$

$$S_R = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^5 (\ln R_i - 1,536)^2} = 0,1016.$$

Также нормативное значение податливости клеенного вдоль волокон стержня K_n определим:

$$K_n = \exp(-4,2138 - 2,463 \cdot 0,412) = 0,0054 \text{ мм/кН};$$

$$K_{\text{cp}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \ln K_i = -4,2138;$$

$$S_K = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^5 (\ln K_i - (-4,2138))^2} = 0,412.$$

В процессе обработки результатов испытаний были определены сопротивления древесины R и податливости K для каждого образца (табл.). Исходя из полученных значений вычислены нормативное сопротивление древесины $R_n = 3,62$ МПа, а также нормативное значение податливости $K_n = 0,0054$ мм/кН. Следует отметить, что по итогам эксперимента подтвердилось наличие небольших значений податливости в стыковом соединении с клееными вдоль волокон стержнями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что разрушение опытных образцов произошло вследствие скалывания вдоль

⁶ В соответствии с приложением Б ГОСТ Р 58558–2019. Конструкции деревянные. Клеенные стержни. Методы испытаний по определению нормативных значений механических характеристик.

волокон деревянного элемента на границе клеевой шов – деревянный элемент, узел работает в упругой стадии до нагрузки в 30–35 кН, затем происходит рост деформаций и резкое падение нагрузки, что характеризует возникшее разрушение как хрупкое.

Вычисленное после испытаний нормативное расчетное сопротивление клеенного стержня на продавливание ($R_n = 3,62$ МПа) близко к указанному в СП⁷ ($R_{н0}^A = 3,2$ МПа), разница составляет 13 %, что говорит о действительности методических указаний, приведенных в ГОСТ Р 58459–2019,

⁷ Табл. 7.1 СП 382.1325800.2017. Конструкции деревянные клеенные на клеенных стержнях. Методы расчета.

определяющих нормативные значения механических свойств древесины.

В процессе проведения экспериментального исследования подтвердилось наличие податливости у данного типа узлового соединения, которая составила по результатам испытаний 0,0054 мм/кН. Наличие податливости соединения в работе подобного шва говорит о необходимости ее учета в построении расчетных моделей.

В процессе проектирования и конструирования требуется производить детальный анализ конечной жесткости узлов с клееными вдоль волокон стержнями для корректного построения расчетной схемы здания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте : мат. III Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2005.
2. Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс : мат. 12 Междунар. симпозиума. Одесса, 2007.
3. Найчук А.Я., Чернолиз В.С., Иванюк А.Н. Численные исследования прочности деревянных балок со сквозными трещинами, усиленных наклонно клееными стержнями // Ресурсосберегающие материалы, конструкции, здания и сооружения : сб. науч. тр. 2008. № 16 (2). С. 278–281.
4. Орлович Р.Б., Гиль З., Дмитриев П.А. Тенденции в развитии соединений деревянных конструкций в строительстве за рубежом // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2004. № 11 (551). С. 4–9. EDN PIKRGX.
5. Золотов М.С. Исследование напряженно-деформированного состояния анкерного соединения на эпоксидном клее : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харьков, 1971.
6. Зубарев Г.Н., Бойтемиров Ф.А., Головина В.М. Испытание деревянной арки с соединениями на клеенных стержнях // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1983. № 12. С. 15–21.
7. Иванов Ю.М. Длительная несущая способность деревянных конструкций // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1972. № 11. С. 6–12.
8. Иванов Ю.М., Линьков И.М., Сороткин В.М. Исследование влияния армирования на прочность и жесткость деревянных изгибаемых элементов // Разработка и исследование клееных деревянных и фанерных армированных конструкций. 1972. № 24. С. 13–30.
9. Ковальчук Л.М. Склеивание древесных материалов с пластмассами и металлами. М. : Лесная промышленность, 1968. 239 с.
10. Калугин А.В. Клееные деревянные конструкции в современном строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 7–2. С. 32–37. EDN NXOUFJ.
11. Зубарев Г.Н., Логинова М.П., Головина В.М. Испытание и расчет соединений деревянных конструкций : сб. науч. тр. М. : ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1981.
12. Турковский С.Б., Саяпин В.В. Исследование монтажных узловых соединений клееных деревянных конструкций. М. : ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1981.
13. Турковский С.Б., Погорельцев А.А. Создание деревянных конструкций системы ЦНИИСК на основе наклонно клеенных стержней // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 3. С. 6–7. EDN HZIVXP.
14. Поспелов Н.Д., Тумас Е.В. О новых клеештыревых стыках несущих элементов деревянных пролетных строений мостов. Балашиха : СоюздорНИИ, 1970.
15. Вдовин В.М., Ишмаева Д.Д. Экспериментальные исследования жестких узлов балочных структур из клееных деревянных элементов // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 130–136. EDN SFPAAL.
16. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). М. : Стройматериалы, 2013. 300 с.
17. Шмидт А.Б., Дмитриев П.А. Атлас строительных конструкций из клееной древесины и водостойкой фанеры : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2002. 291 с.

18. *Shchelokova T.* A research of stress/strain condition of reinforced timber structures with natural weakenings // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 193. P. 03051. DOI: 10.1051/mateconf/201819303051
19. *Mirski R., Kuliński M., Dziurka D., Thomas M., Antonowicz R.* Strength properties of structural glulam elements from pine (*Pinus sylvestris* L.) timber reinforced in the tensile zone with steel and basalt rods // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 10. P. 2574. DOI: 10.3390/ma14102574
20. *Totsuka M., Jockwer R., Kawahara H., Aoki K., Inayama M.* Experimental study of compressive properties parallel to grain of glulam // *Journal of Wood Science*. 2022. Vol. 68. Issue 1. DOI: 10.1186/s10086-022-02040-7
21. *Jockwer R., Caprio D., Jorissen A.* Evaluation of parameters influencing the load-deformation behaviour of connections with laterally loaded dowel-type fasteners // *Wood Material Science & Engineering*. 2022. Vol. 17. Issue 1. Pp. 6–19. DOI: 10.1080/17480272.2021.1955297
22. *Akter S.T., Serrano E., Bader T.K.* Numerical modelling of wood under combined loading of compression perpendicular to the grain and rolling shear // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 224. P. 112800. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112800
23. *Jockwer R., Dietsch P.* Review of design approaches and test results on brittle failure modes of connections loaded at an angle to the grain // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 171. Pp. 362–372. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.061
24. *Cabrero J.M., Yurrita M.* Performance assessment of existing models to predict brittle failure modes of steel-to-timber connections loaded parallel-to-grain with dowel-type fasteners // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 171. Pp. 895–910. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.037
25. *Bader T.K., Schweigler M., Serrano E., Dorn M., Enquist B., Hochreiner G.* Integrative experimental characterization and engineering modeling of single-dowel connections in LVL // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 107. Pp. 235–246. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.009
26. *Schweigler M., Bader T.K., Hochreiner G., Lemaître R.* Parameterization equations for the nonlinear connection slip applied to the anisotropic embedment behavior of wood // *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 142. Pp. 142–158. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.003
27. *Blaß H.J., Colling F.* Load-carrying capacity of dowelled connections // *INTER Meeting*. 2015. Pp. 48–7–3. Pp. 115–129. URL: <https://www.hs-augsburg.de/homes/colling/holzbau-colling/pdf/2015-INTER.pdf>
28. *Steilner M., Blaß H.J.* A method to determine the plastic bending angle of dowel-type fasteners // *Materials and Joints in Timber Structures*. 2014. Pp. 301–306. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5_28
29. *Franke S., Magnière N.* The embedment failure of European beech compared to spruce wood and standards // *Materials and Joints in Timber Structures*. 2014. Pp. 221–229. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5_21
30. *Franke S., Magnière N.* Discussion of testing and evaluation methods for the embedment behaviour of connections // *INTER Meeting*. 2014. P. 47–7–1. Pp. 93–102.

Поступила в редакцию 15 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 25 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 9 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Филипп Сергеевич Школяр** — кандидат технических наук, старший преподаватель, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 6980-8774, ResearcherID: GLR-0652-2022, ORCID: 0000-0003-2872-0723; shkolyar.fs@gmail.com;

Александр Григорьевич Никитин — студент; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; ResearcherID: HLW-6315-2023; nikitin_dl@mail.ru;

Александра Игоревна Зацепина — приглашенный преподаватель; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; ResearcherID: ACI-5248-2022, ORCID: 0000-0002-5586-504X; zatsepina.aleksandra@yandex.ru.

Вклад авторов:

Школяр Ф.С. — идея, научное руководство, научное редактирование текста.

Никитин А.Г. — сбор материала, проведение эксперимента, обработка материала, написание исходного текста.

Зацепина А.И. — доработка текста, написание и оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. *Modern problems of improvement and development of metal, wooden, plastic structures in construction and transport : materials of the III International scientific and technical conference*. Samara, 2005. (rus.).
2. *Modern building structures made of metal, wood and plastics : materials of the 12th International Symposium*. Odessa, 2007. (rus.).
3. Naychuk A.Ya., Chornoliz V.S., Ivanyuk A.N. Numerical studies of the strength of wooden beams with through cracks reinforced by inclined stuck-in rods. *Resource-saving materials, structures, buildings and structures : collection of scientific works*. 2008; 16(2):278-281. (rus.).
4. Orlovich R.B., Gil Z., Dmitriev P.A. Trends in the development of connections of wooden structures in foreign construction. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2004; 11:4-9. EDN PIKRGX. (rus.).
5. Zolotov M.S. *Investigation of stress-strain state of anchor joint on epoxy glue : autoref. dis. ... candidate of technical sciences*. Kharkov, 1971. (rus.).
6. Zubarev G.N., Boitemirov F.A., Golovina V.M. Test of a wooden arch with joints on glued rods. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1983; 12:15-21. (rus.).
7. Ivanov J.M. Long-term bearing capacity of wooden structures. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1972; 11:6-12. (rus.).
8. Ivanov Yu.M., Linkov I.M., Sorotkin V.M. Study of the influence of reinforcement on the strength and rigidity of wooden bent elements. *Development and study of glued wooden and plywood reinforced structures*. 1972; 24:13-30. (rus.).
9. Kovalchuk L.M. *Gluing wood materials with plastics and metals*. Moscow, Forestry industry, 1968; 239. (rus.).
10. Kalugin A.V. Glued timber structures in modern construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2011; 7-2:32-37. EDN NXOUFJ. (rus.).
11. Zubarev G.N., Loginova M.P., Golovina V.M. *Testing and calculation of connections of wooden structures : collection of scientific works*. Moscow, TsNIISK named after V.A. Kucherenko, 1981. (rus.).
12. Turkovsky S.B., Sayapin V.V. *Research of assembly joints of glued wooden structures*. Moscow, TsNIISK named after V.A. Kucherenko, 1981. (rus.).
13. Turkovsky S.B., Pogoreltsev A.A. Development of wooden structures of "TSNIISK-system" based on inclined stuck-in rods. *Industrial and Civil Engineering*. 2007; 3:6-7. EDN HZIVXP. (rus.).
14. Pospelov N.D., Tumas E.V. *About new adhesive joints of bearing elements of wooden bridge spans*. Balashikha, SoyuzdorNII, 1970. (rus.).
15. Vdovin V.M., Ishmaeva D.D. Experimental studies of rigid nodes of beam structures made of glued wooden elements. *Regional Architecture and Engineering*. 2014; 2:130-136. EDN SFPAAL. (rus.).
16. Turkovsky S.B., Pogoreltsev A.A., Preobrazhenskaya I.P. *Glued wooden structures with nodes on glued rods in modern construction (TsNIISK-system)*. Moscow, Stroymaterialy Publ., 2013; 300. (rus.).
17. Schmidt A.B., Dmitriev P.A. *Atlas of building structures made of glued wood and water-resistant plywood : manual*. Moscow, ASV publishing house, 2002; 291. (rus.).
18. Shchelokova T. A research of stress/strain condition of reinforced timber structures with natural weakenings. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:03051. DOI: 10.1051/mateconf/201819303051
19. Mirski R., Kuliński M., Dziurka D., Thomas M., Antonowicz R. Strength properties of structural glulam elements from pine (*Pinus sylvestris* L.) timber reinforced in the tensile zone with steel and basalt rods. *Materials*. 2021; 14(10):2574. DOI: 10.3390/ma14102574
20. Totsuka M., Jockwer R., Kawahara H., Aoki K., Inayama M. Experimental study of compressive properties parallel to grain of glulam. *Journal of Wood Science*. 2022; 68(1). DOI: 10.1186/s10086-022-02040-7
21. Jockwer R., Caprio D., Jorissen A. Evaluation of parameters influencing the load-deformation behaviour of connections with laterally loaded dowel-type fasteners. *Wood Material Science & Engineering*. 2022; 17(1):6-19. DOI: 10.1080/17480272.2021.1955297
22. Akter S. T., Serrano E., Bader T. K. Numerical modelling of wood under combined loading of compression perpendicular to the grain and rolling shear. *Engineering Structures*. 2021; 224:112800. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112800
23. Jockwer R., Dietsch P. Review of design approaches and test results on brittle failure modes of connections loaded at an angle to the grain. *Engineering Structures*. 2018; 171:362-372. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.061
24. Cabrero J.M., Yurrita M. Performance assessment of existing models to predict brittle failure modes of steel-to-timber connections loaded parallel-to-grain with dowel-type fasteners. *Engineering Structures*. 2018; 171:895-910. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.037
25. Bader T.K., Schweigler M., Serrano E., Dorn M., Enquist B., Hochreiner G. Integrative experimental characterization and engineering modeling of single-dowel connections in LVL. *Construction and Building Materials*. 2016; 107:235-246. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.009
26. Schweigler M., Bader T.K., Hochreiner G., Lemaître R. Parameterization equations for the non-linear connection slip applied to the anisotropic em-

bedment behavior of wood. *Composites Part B: Engineering*. 2018; 142:142-158. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.003

27. Blaß H.J., Colling F. Load-carrying capacity of dowelled connections. *INTER Meeting*. 2015; 48-7-3:115-129. URL: <https://www.hs-augsburg.de/homes/colling/holzbau-colling/pdf/2015-INTER.pdf>

28. Steilner M., Blaß H.J. A method to determine the plastic bending angle of dowel-type fasteners. *Ma-*

terials and Joints in Timber Structures. 2014; 301-306. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5_28

29. Franke S., Magnière N. The embedment failure of European beech compared to spruce wood and standards. *Materials and Joints in Timber Structures*. 2014; 221-229. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5_21

30. Franke S., Magnière N. Discussion of testing and evaluation methods for the embedment behaviour of connections. *INTER Meeting*. 2014; 47-7-1:93-102.

Received May 15, 2023.

Adopted in revised form on May 25, 2023.

Approved for publication on September 9, 2023.

B I O N O T E S: **Filipp S. Shkoliar** — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 6980-8774, ResearcherID: GLR-0652-2022, ORCID: 0000-0003-2872-0723; office@spbstu.ru, shkoliar.fs@gmail.com;

Aleksandr G. Nikitin — student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ResearcherID: HLW-6315-2023; office@spbstu.ru, nikitin_dl@mail.ru;

Aleksandra I. Zatssepina — Visiting lecturer; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ResearcherID: ACI-5248-2022, ORCID: 0000-0002-5586-504X; office@spbstu.ru, zatssepina.aleksandra@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Filipp S. Shkoliar — idea, academic advising, scientific editing of the text.

Aleksandr G. Nikitin — data gathering and processing, experiment making, writing of the original text.

Aleksandra I. Zatssepina — text revision, writing of the article.

Authors report about the absence of conflict of interests.

Изменение состава и свойств дорожного битума при его термостабилизации

Николай Игоревич Шестаков¹, Наталья Владимировна Хохлова²,
Юрий Эммануилович Васильев³, Ульяна Олеговна Менкина³

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

² Московский автомобильно-дорожный колледж им. А.А. Николаева; г. Москва, Россия;

³ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Нефтяной дорожный битум является основным компонентом дорожных покрытий, которые играют важную роль в обеспечении безопасности и комфорта движения транспортных средств. Со временем битум подвергается старению, что приводит к изменению его физических и химических свойств. Такие изменения вызывают снижение качества дорожных покрытий, ухудшение их эксплуатационных характеристик и уменьшение долговечности. Проведен анализ исследований в области термостабилизации битума, что имеет большое значение для оптимизации технологических процессов при высоких температурах. Определен оптимальный состав модифицированных битумов с применением стеариновой кислоты, индустриального масла.

Материалы и методы. Термическая устойчивость битума — важное условие для сохранения его качества на всех этапах жизненного цикла. Рассматривается вопрос термостабилизации битума с использованием стеариновой кислоты Т-18 в комплексе с индустриальным маслом И-20, которые приводят к повышению устойчивости от воздействия внешних факторов. Для установления степени влияния модифицирующих компонентов на свойства битума выполнен двухфакторный ротационный эксперимент с варьированием количества добавок индустриального масла и стеариновой кислоты.

Результаты. Исследованы составы и свойства полученных модифицированных битумов. Анализ полученных результатов показывает, что воздействие стеариновой кислоты на пенетрацию битума примерно в 6 раз выше, чем воздействие индустриального масла, в то время как оба компонента совместно оказывают незначительное влияние на другие исследуемые свойства битума.

Выводы. Для дальнейшего изучения термической устойчивости на оптимальных вариантах битумных композиций выполнены исследования по сохранению массы пленок битума при температурах от 160 до 220 °С. По полученным результатам определено, что эффективность стеариновой кислоты проявляется при повышенных температурах и достигает значений до 25 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: битум, термостабилизация, стеариновая кислота, индустриальное масло, потеря массы, старение битума

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шестаков Н.И., Хохлова Н.В., Васильев Ю.Э., Менкина У.О. Изменение состава и свойств дорожного битума при его термостабилизации // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1926–1936. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1926-1936

Автор, ответственный за переписку: Наталья Владимировна Хохлова, Natalyahoh@bk.ru.

Changes in the structure and properties of road bitumen during its thermal stabilization

Nikolay I. Shestakov¹, Natalia V. Khokhlova², Yuri E. Vasiliev³, Uliana O. Menkina³

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

² Moscow Automobile and Road College named after A.A. Nikolaev; Moscow, Russian Federation;

³ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Petroleum bitumen is the main component of road surfaces, which play an important role in ensuring the safety and comfort of vehicle traffic. Over time, bitumen undergoes ageing, which leads to changes in its physical and chemical properties. Such changes cause a decrease in the quality of road surfaces, deterioration of their performance characteristics and reduction of durability. The analysis of research in the field of bitumen thermal stabilization, which is of great importance

for optimization of technological processes at high temperatures, was carried out. The optimal composition of modified bitumen using stearic acid, industrial oil was determined.

Materials and methods. Bitumen undergoes serious changes during technological processes, during the transition from the bulk to the film state under the influence of high temperatures. Thus, thermal stability of bitumen is an important condition for preserving its quality at all stages of its life cycle. The issue of bitumen thermal stabilization with the use of stearic acid T-18 in combination with industrial oil I-20, which lead to increased resistance from external factors, is considered. To establish the degree of influence of modifying components on bitumen properties, a two-factor rotatable experiment with varying the amount of industrial oil and stearic acid additives, was performed.

Results. The compositions and properties of the obtained modified bitumen were studied. The analysis of the obtained results shows that the effect of stearic acid on bitumen penetration is about 6 times higher than the effect of industrial oil, while both components together have insignificant effect on the other studied properties of bitumen.

Conclusions. In order to further study thermal stability on the optimal versions of bitumen compositions, studies on mass retention of bitumen films at temperatures from 160 to 220 °C were performed. According to the obtained results, it was found that the effectiveness of stearic acid is manifested at higher temperatures and reaches values up to 25 %.

KEYWORDS: bitumen, thermal stabilization, stearic acid, industrial oil, weight loss, bitumen ageing

FOR CITATION: Shestakov N.I., Khokhlova N.V., Vasiliev Yu.E., Menkina U.O. Changes in the structure and properties of road bitumen during its thermal stabilization. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1926-1936. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1926-1936 (rus.).

Corresponding author: Natalia V. Khokhlova, Natalyahoh@bk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Нефтяной битум — один из наиболее широко востребованных материалов в дорожном строительстве. Являясь органическим вяжущим веществом, дорожный битум подвержен изменению физических, химических и, как следствие, эксплуатационных свойств при высоких температурах, что приводит к деформациям и разрушению дорожного покрытия. Для того чтобы предотвратить такие негативные последствия используются технологии термостабилизации этого материала.

Процесс изменения битума под воздействием высокой температуры — сложный и многопараметрический процесс, который происходит на молекулярном уровне. При нагревании битума его молекулы начинают быстро изменяться [1, 2], что приводит и к изменению его физико-химических свойств.

Одним из основных процессов, происходящих при изменении битума под воздействием высокой температуры, является окисление. При этом происходит реакция между молекулами битума и кислородом из воздуха, что вызывает образование окисных продуктов и изменение химического и группового состава битума [3]. Как правило, это влечет за собой потерю пластичности и снижение его адгезии к другим материалам, что прямо ведет к старению продукта. Кроме того, при высоких температурах происходит деградация высокомолекулярных компонентов битума, что также может привести к потере его свойств [4]. В результате этого процесса битум может стать более жестким и хрупким, что провоцирует его деформацию и разрушение.

Термостабилизация дорожного битума направлена на увеличение термической стойкости органического вяжущего, в основе процесса лежит добавление в битум модификаторов, которые позволяют ему сохранять физические свойства при воздействии высоких температур в технологических процессах [5, 6].

Для обеспечения термостабильности дорожного битума используются различные добавки, такие как полимеры, адсорбенты или антиоксиданты. Полимеры формируют трехмерную сеть, обладающую высокой термостойкостью, что способствует сохранению формы и прочности дорожного покрытия в процессе эксплуатации [7–9]. Адсорбенты интегрируются в структуру битума и снижают его чувствительность к температурным изменениям, антиоксиданты защищают битум от окисления.

Применение полимеров в битумных смесях для дорожных покрытий было исследовано во многих научных статьях. Например, в работе [10] рассматриваются различные типы полимеров и их влияние на термическую стабильность битума. В другой публикации [11] авторы исследовали эффективность использования полимеров на основе стирола и бутадиена для улучшения термической стабильности битума.

Адсорбенты также служат важными добавками для обеспечения термостабильности битума. Командой ученых изучены различные типы адсорбентов и их влияние на термическую стабильность битума [12]. Авторы обнаружили, что использование адсорбентов на основе глины и кремнезема может значительно повысить термическую стабильность нефтяного битума.

Антиоксиданты также играют значительную роль в обеспечении термостабильности битума. В научных работах [13, 14] анализируются типы антиоксидантов и их влияние на защиту битума от окисления. Указывается, что применение антиоксидантов на основе фенолов и аминофенолов может улучшить защиту битума от окисления. Установлена эффективность применения в качестве термостабилизирующих модификаторов добавок на основе сульфонов и фосфонов [15].

Таким образом, использование различных добавок является эффективным способом обеспечения термостабильности дорожного битума. Исследова-

ния, проведенные в научных статьях, подтверждают эффективность добавок как минерального, так и органического происхождения и с разной степенью влияния. Развитие этого направления позволяет решить не только технологические вопросы, но и экологические, что актуально для строительной отрасли.

Цель исследования — определение оптимального состава модифицированных битумов с применением стеариновой кислоты в качестве термостабилизирующей добавки, индустриального масла в виде пластификатора, а также установление эффективности при температурах, соответствующих технологическим процессам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках данного исследования объектом изучения выбран битум БНД 70/100, соответствующий требованиям ГОСТ 33133–2014, производства АО «Газпромнефть-Московский НПЗ», представлен в табл. 1.

Стеариновая кислота Т-18 — тонкодисперсный порошкообразный материал, поэтому для сни-

жения степени ее сегрегации в битуме необходимо применение жидкого пластификатора. В качестве пластификатора использовалось индустриальное масло И-20. Основные физико-химические показатели стеариновой кислоты Т-18 и индустриального масла И-20 представлены в табл. 2, 3.

Для установления степени воздействия модифицирующих компонентов на свойства битума был выполнен двухфакторный ротатбельный эксперимент.

Определение свойств битума проводилось согласно требованиям ГОСТ 33140–2014. Установление величины пенетрации исследуемых составов битумных композиций при температуре 25 °С проводилось в соответствии с ГОСТ 33136–2014 на автоматическом пенетрометре «Линтел ПН–10Б». Температура размягчения определялась по методике, установленной в ГОСТ 33142–2014, на аппарате «Линтел КИШ-20М4». На цифровом дуктилометре Infratest 1500 мм устанавливали растяжимость битума при температуре 0 °С согласно ГОСТ 33138–2014. Оценка динамической вязкости при температурах 135 и 165 °С проводилась с использова-

Табл. 1. Основные физико-химические показатели БНД 70/100

Table 1. Main physical and chemical parameters of BND 70/100

Глубина проникания иглы при температуре 25 °С, 0,1 мм Needle penetration depth at 25 °C, 0.1 mm	Температура размягчения по кольцу и шару, °С Softening temperature in ring and ball, °C	Растяжимость при 0 °С, см Extensibility, at 0 °C, cm	Температура хрупкости, °С Brittleness temperature, °C	Температура вспышки, °С Flash point, °C
98	44,0	5,03	–20	280

Табл. 2. Основные физико-химические показатели стеариновой кислоты Т-18

Table 2. Main physical and chemical parameters of stearic acid T-18

Показатели / Indicators	Значения / Values
Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	940
Молекулярная масса, г/моль / Molecular weight, g/mol	284,48
Массовая доля неомыляемых веществ, % / Mass fraction of unsaponifiable substances, %	0,5
Кислотное число, мг КОН/г / Acid number, mg KOH/g	192–210
Число омыления, мг КОН/г / Saponification number, mg KOH/g	194–213
Температура самовоспламенения, °С / Self-ignition temperature, °C	395
Температура кипения с разложением, °С / Boiling point with decomposition, °C	376

Табл. 3. Основные физико-химические показатели индустриального масла И-20

Table 3. Main physical and chemical parameters of industrial oil I-20

Показатели / Indicators	Значения / Values
Плотность при температуре 20 °С, кг/м ³ / Density at a temperature of 20 °C, kg/m ³	890
Вязкость кинематическая при 40 °С, мм ² /с / Kinematic viscosity at 40 °C, mm ² /s	29–35
Кислотное число, мг КОН/г / Acid number, mg KOH/g	0,03
Зольность, % / Ash content, %	0,005
Температура вспышки в открытом тигле, °С / Flash point in an open crucible, °C	200

нием ротационного вискозиметра Brookfield, модель DV-II+Pro согласно ГОСТ 33137–2014. В ходе эксперимента были получены данные о вязкости, сП/мП·с, температуре, °С, скорости сдвига/напряжении, % крутящего момента, шпинделе/скорости и состоянии программы шага. Точность измерений составила $\pm 1,0$ %. Параметры старения определяли по методу RTFOT по ГОСТ 33140–2014, суть которого в имитации старения вяжущего при приготовлении и укладке асфальтобетонной смеси. Время проведения испытания — 8 ч.

Планирование двухфакторного ротатбельного эксперимента проводилось в программном комплексе (ПК) Gradient. Обработка полученных результатов и их графическая интерпретация выполнены в ПК STATISTICA version 10. Составы исследуемых органических вяжущих и их физико-механические характеристики приведены в табл. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве комплексных модификаторов битума отдельный интерес представляют жирные кислоты. Например, известно, что линолевая кислота $C_{18}H_{32}O_2$ и линоленовая кислота $C_{18}H_{30}O_2$ регулируют стабильность битума как при высоких, так и при низких температурах. Вместе с тем воздействие стеариновой кислоты на битум изучено менее подробно, хотя представляет высокую потенциальную эффективность за счет своих свойств.

Стеариновая кислота $C_{18}H_{36}O_2$ — это одноосновная карбоновая кислота алифатического ряда, имеющая при комнатной температуре вид бесцветных кристаллов, хорошо растворимых в диэтиловом эфире и нерастворимых в воде. Стеариновая кислота является насыщенной жирной кислотой и широко используется в промышленности в качестве эффективного модифицирующего компонента для органических материалов, улучшая такие свойства полимерных материалов, как механическая прочность, устойчивость к воздействию внешних факторов и температурную стойкость.

Доказана эффективность применения стеариновой кислоты для различных полимерных материалов: исследование [16] показало, что добавление стеариновой кислоты в полиэтилен повышает его механическую прочность и устойчивость к воз-

действию ультрафиолетового излучения. Это объясняется тем, что стеариновая кислота образует стабильные комплексы с полимерными цепями, что повышает их прочность и устойчивость.

Кроме того, стеариновая кислота может использоваться для улучшения свойств других полимерных материалов, таких как полиамиды [17] и полистирол [18]. В каждом случае добавление стеариновой кислоты приводит к повышению механической прочности и устойчивости к воздействию внешних факторов.

Для установления верхней границы варьирования количества добавок индустриального масла И-20 и стеариновой кислоты Т-18 посредством планирования эксперимента был составлен двухфакторный ротатбельный эксперимент. Планирование двухфакторного ротатбельного эксперимента служит эффективным инструментом в исследовании влияния двух различных факторов (концентрация индустриального масла и стеариновой кислоты) на свойства модифицированного битума. В таком эксперименте каждый из факторов имеет два уровня, и цель эксперимента состоит в том, чтобы определить не только как каждый фактор влияет на исследуемый процесс, но и как они взаимодействуют друг с другом.

В качестве факторов выбраны: X_1 — количество индустриального масла И-20 по отношению к массе битума; X_2 — количество стеариновой кислоты Т-18 по отношению к массе битума. Основные уровни факторов X_1 и X_2 — 3 и 0,3, шаг варьирования — 1 и 0,1 соответственно. В качестве функции отклика рассматривается изменение температуры размягчения, растяжимость, динамическая вязкость при 135 и 165 °С, пенетрация полученных составов битума, а также после старения под воздействием высокой температуры и воздуха.

По результатам проведенных экспериментальных исследований с помощью ПК Gradient и STATISTICA version 10 составлены математические модели, которые отражают влияние двух различных компонентов на характер изменения определяемых функций отклика.

В табл. 5 представлены коэффициенты полученных моделей.

Графическая интерпретация полученных поверхностей отклика для различных свойств битума приведена на рис. 1–5.

Табл. 4. Составы и свойства модифицированных битумов

Table 4. Compositions and properties of modified bitumen

Содержание добавок, % от массы битума Additives content, % of bitumen weight	Составы / Compositions									
	К	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Индустриальное масло И-20 Industrial oil I-20	—	1	5	1	5	0,172	5,83	3	3	3
Стеариновая кислота Т-18 Stearic acid T-18	—	0,1	0,1	0,5	0,5	0,3	0,3	0,172	0,583	0,3

Содержание добавок, % от массы битума Additives content, % of bitumen weight	Составы / Compositions									
	К	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Выходные параметры / Output parameters</i>										
Глубина проникания иглы при температуре 25 °С, 0,1 мм Needle penetration depth at 25 °C, 0.1 mm	98	123	192	133	199	109	227	147	173	170
Температура размягчения по кольцу и шару, °С Softening temperature in ring and ball, °C	44	42	41,3	44,5	36,5	42	36,3	40,4	39,5	40
Растяжимость, при 0 °С, см Extensibility, at 0 °C, cm	5,03	5,96	7,48	12,05	10,25	5,7	12,5	7,64	9,11	9,3
Динамическая вязкость при 135 °С, Па·с Dynamic viscosity at 135 °C, Pa·s	0,29	0,315	0,24	0,31	0,25	0,342	0,21	0,24	0,255	0,26
Динамическая вязкость при 165 °С, Па·с Dynamic viscosity at 165 °C, Pa·s	0,025	0,087	0,075	0,1	0,08	0,105	0,065	0,08	0,075	0,076
<i>Вяжущее, состаренное по методу RTFOT / Astringent aged by the RTFOT method</i>										
Температура размягчения по кольцу и шару, °С Softening temperature in ring and ball, °C	48,8	47,6	45	48	43,4	49,2	44,4	45,4	43,6	47,1
Динамическая вязкость при 135 °С, Па·с Dynamic viscosity at 135 °C, Pa·s	0,545	0,505	0,49	0,34	0,34	0,525	0,305	0,435	0,4	0,425
Динамическая вязкость при 165 °С, Па·с Dynamic viscosity at 165 °C, Pa·s	0,145	0,13	0,135	0,095	0,105	0,145	0,085	0,12	0,105	0,115

Табл. 5. Таблица коэффициентов математических моделей для определяемых свойств

Table 5. Table of coefficients of mathematical models for defined properties

Номер опыта Experience number	B_0 / v_0	B_1 / v_1	B_2 / v_2	B_{11} / v_{11}	B_{12} / v_{12}	B_{22} / v_{22}
Глубина проникания иглы при температуре 25 °С, 0,1 мм Needle penetration depth at 25 °C, 0.1 mm	170,0000	37,3810	6,7212	-1,1875	-0,0750	-5,6875
Температура размягчения по кольцу и шару, °С Softening temperature in ring and ball, °C	40,0000	-2,0951	-0,4466	-0,0438	-1,8250	0,3563
Растяжимость при 0 °С, см / Extensibility, at 0 °C, cm	9,300	1,1671	1,3674	-0,0506	-0,8300	-0,4131
Динамическая вязкость при 135 °С, Па·с Dynamic viscosity at 135 °C, Pa·s	0,2600	-0,0402	0,0033	0,0038	0,0033	-0,0020
Динамическая вязкость при 165 °С, Па·с Dynamic viscosity at 165 °C, Pa·s	0,0760	-0,0011	0,0014	0,0056	-0,0020	0,0018
<i>Вяжущее, состаренное по методу RTFOT / Astringent aged by the RTFOT method</i>						
Температура размягчения по кольцу и шару, °С Softening temperature in ring and ball, °C	47,1000	-1,7485	-0,4685	-0,0625	-0,5000	-1,1225
Динамическая вязкость при 135 °С, Па·с Dynamic viscosity at 135 °C, Pa·s	0,4250	-0,0408	-0,0456	-0,0044	0,0038	-0,0031
Динамическая вязкость при 165 °С, Па·с Dynamic viscosity at 165 °C, Pa·s	0,0115	-0,0087	-0,0108	0,0006	0,0013	-0,0006

Примечание: v_0 — свободный член, равный отклику системы на начальной стадии эксперимента; v_1 и v_2 — коэффициенты регрессии, показывающие степень влияния концентраций индустриального масла и стеариновой кислоты соответственно на выходные параметры отклика; v_{12} — коэффициент, указывающий на наличие эффекта взаимодействия двух модифицирующих компонентов (парного взаимодействия); v_{11} и v_{22} — коэффициенты, характеризующие долю изменчивости зависимой переменной относительно среднего для индустриального масла и стеариновой кислоты соответственно.

Note: v_1 — free term equal to the response of the system at the initial stage of the experiment; v_1 and v_2 — regression coefficients, showing the degree of influence of concentrations of industrial oil and stearic acid, respectively, on the output response parameters; v_{12} — coefficient indicating the presence of interaction effect of two modifying components (pairwise interaction); v_{11} and v_{22} — coefficients characterizing the share of variability of the dependent variable relative to the average for industrial oil and stearic acid, respectively.

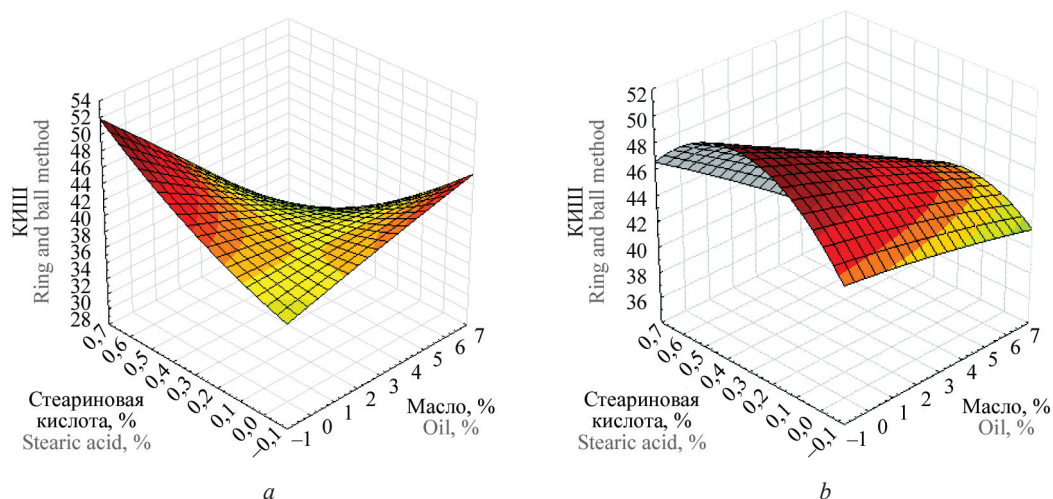
**Рис. 1.** Температуры размягчения до (а) и после (b) старения

Fig. 1. Softening temperatures before (a) and after (b) ageing

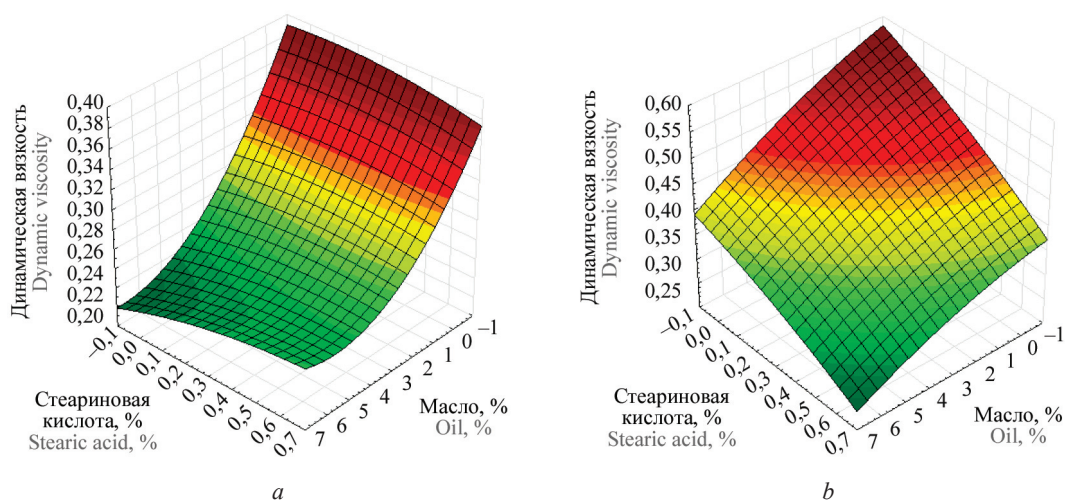
**Рис. 2.** Динамическая вязкость при 135 °C до (а) и после (b) старения

Fig. 2. Dynamic viscosity at 135 °C before (a) and after (b) ageing

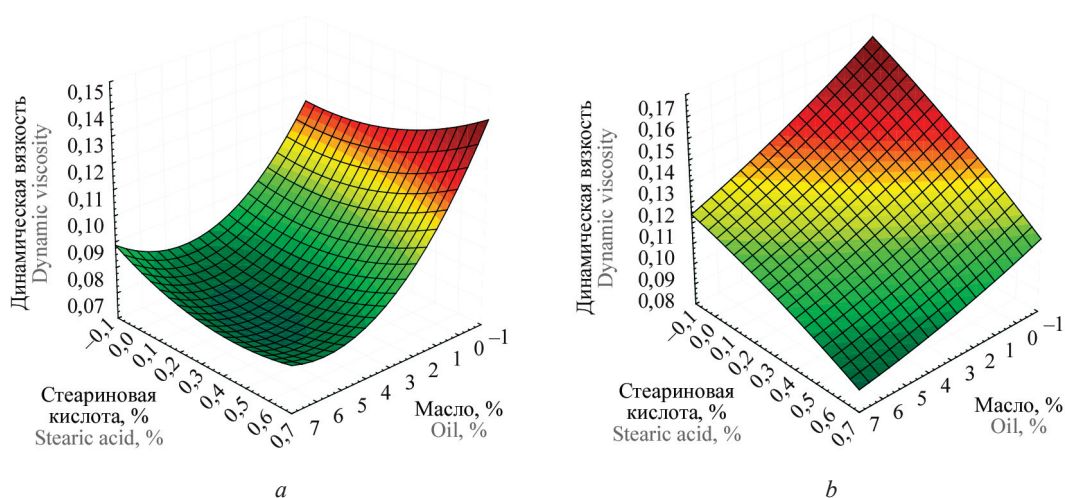
**Рис. 3.** Динамическая вязкость при 165 °C до (а) и после (b) старения

Fig. 3. Dynamic viscosity at 165 °C before (a) and after (b) ageing

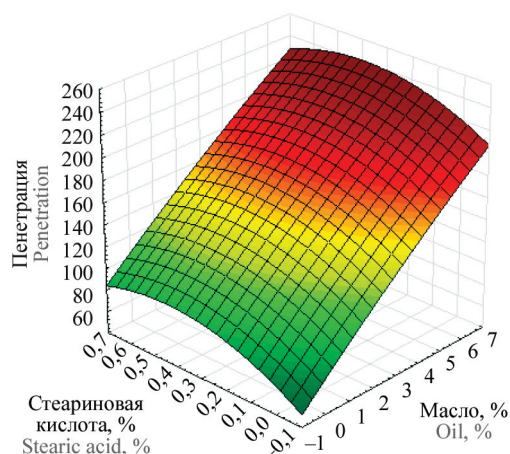


Рис. 4. Глубина проникания иглы при 25 °С, 0,1 мм

Fig. 4. The depth of penetration of the needle at 25 °C, 0.1 mm

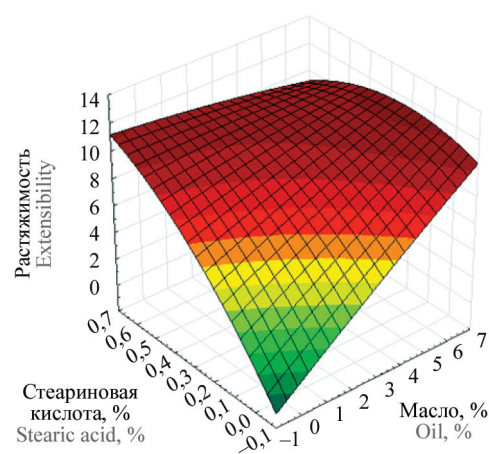


Рис. 5. Растяжимость при 0 °С, см

Fig. 5. Extensibility at 0 °C, cm

Наибольший интерес представляют результаты согласно полученным коэффициентам для пенетрации битума. Коэффициенты v_1 и v_2 имеют положительное значение, причем воздействие стеариновой кислоты на пенетрацию битума примерно в 6 раз выше, чем воздействие индустриального масла. В целом такая картина объективно вписывается в общую тенденцию пластификации битума индустриальным маслом. Вместе с тем при совместном воздействии двух добавок наблюдается уменьшение пенетрации, что можно объяснить активным взаимодействием добавок и структурирующими свойствами в комплексе.

Аналогичная динамика наблюдается и для дуктильности битумных композиций, которая характеризует пластичность битума. Отдельное влияние компонентов ведет к увеличению растяжимости, а совместное действие оказывает противоположный характер. Наблюдаемый эффект коррелирует с эффектом по пенетрации и объясняется общим изменением структуры битума при комплексном воздействии добавок.

Анализ остальных полученных результатов (динамическая вязкость, температура размягчения) показывает, что оба компонента оказывают незначительное влияние на исследуемые свойства битума как по отдельности, так и при комплексном взаимодействии. Это подтверждается малыми численными значениями коэффициентов в уравнениях регрессии. Однако в большинстве случаев коэффициенты, отражающие взаимное влияние, имеют отрицательное значение, что отображает изменения характера воздействия в зависимости от концентрации добавок. Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что изменение содержания индустриального масла И-20 и стеариновой кислоты Т-18 в битуме изменяет основные свойства битума несущественно.

Стеариновая кислота Т-18 является одной из наиболее эффективных термостабилизирующих

добавок для битума [19–21] за счет содержания карбоксильных радикалов. Она обладает высокой термостойкостью и способна защитить битум от деформации и разрушения при высоких температурах.

Переход битума из объемного в пленочное состояние происходит в технологических процессах производства, когда он подвергается термическому воздействию при высоких температурах. В этом случае битум начинает расплавляться и превращаться в пленку, которая покрывает поверхность материала и обеспечивает ему необходимые вяжущие и эксплуатационные свойства. Важно отметить, что качество перехода битума из объемного в пленочное состояние зависит от многих факторов, таких как температура, время воздействия, состав, структура материала и др. Поэтому производители битумных материалов уделяют особое внимание этому процессу и разрабатывают специальные технологии и рецептуры, которые позволяют обеспечить оптимальный переход битума из объемного в пленочное состояние и повысить долговечность и надежность готовых материалов.

Данное утверждение основывается на результате исследований, которые показали, что битум в объемном состоянии имеет более высокую термостабильность и устойчивость к деформации при высоких температурах, чем в тонких пленках. Это связано с тем, что в объемном состоянии битум обладает более высокой массой и толщиной, что обеспечивает более эффективную защиту от воздействия внешних факторов. Важно отметить, что тонкие пленки битума также могут обладать высокой термостабильностью и защищать поверхности от деформации и разрушения при высоких температурах, если они содержат соответствующие добавки, такие как стеариновая кислота Т-18.

Температурная устойчивость битума определяется стандартными методами по ГОСТ 33140–2014 при моделировании производственных процессов,

происходящих с битумом в цикле асфальтобетонного завода. Температура данного метода регламентирована, и для нефтяных дорожных битумов составляет 163 °С. Тем не менее при производстве конкретных видов асфальтобетонов, таких как литые, температура процесса смешения возрастает до значений в диапазоне 190–220 °С. В связи с этим проблемы термостабилизации битума приобретают особую актуальность.

Для исследования поведения термостабилизированных битумных композиций проводили моделирование процессов при температурах выше, чем регламентировано ГОСТ 33140–2014. Сущность метода заключается в нанесении пленки битума на металлическую поверхность площадью 25 см² и выдерживании исследуемых образцов при температурах от 160 до 220 °С с шагом 10 °С в течение 1 ч при каждой температуре.

Для установления степени влияния стеариновой кислоты и индустриального масла на термоста-

билизацию битума в качестве объектов сравнения выбраны композиции, составы которых указаны в табл. 6.

После часовой экспозиции на каждом этапе температур определялась потеря массы исследуемых составов. Полученные результаты представлены на рис. 6.

По полученным результатам установлено, что композиция К2 показывает максимальную потерю массы, что связано с термической деструкцией компонентов добавленного масла-пластификатора. Композиция К3, состоящая из индустриального масла в количестве 3 %, битума и стеариновой кислоты, продемонстрировала результаты, сопоставимые с чистым битумом К1. Если учесть количество добавленного индустриального масла в К3, то очевидно, что введение стеариновой кислоты сохраняет до 3 % общей массы битума при повышении температуры до 220 °С, что при перерасчете на потерю массы составляет 25,9 %.

Табл. 6. Составы битумных композиций для исследования динамики потери массы

Table 6. Compositions of bitumen compositions for the study of mass loss dynamics

Номер композиции Composition Number	Состав композиции Composition of the composition
К1	Контрольный бездобавочный образец битума БНД 70/100 Control additive-free specimen of bitumen BND 70/100
К2	Битум БНД 70/100 + 3 % (от массы битума) индустриального масла Bitumen BND 70/100 + 3 % (by weight of bitumen) of industrial oil
К3	Битум БНД 70/100 + 3 % (от массы битума) индустриального масла + 0,3 % стеариновой кислоты (от массы битума) Bitumen BND 70/100 + 3 % (by weight of bitumen) industrial oil + 0.3 % stearic acid (by weight of bitumen)

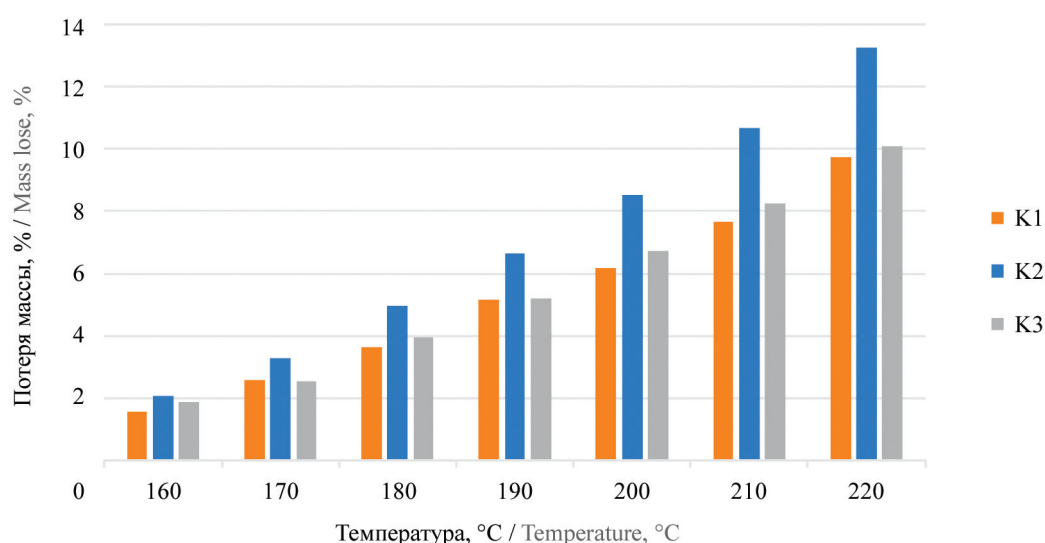


Рис. 6. Динамика потери массы битума в исследуемых составах битумных композиций

Fig. 6. Dynamics of bitumen mass loss in the studied bitumen compositions

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при введении стеариновой кислоты наблюдается повышение температурной устойчивости исследуемых битумов в диапазоне температур 160–220 °С. Функция индустриального масла заключается не столько в пластификации, сколько в возможности более эффективного распределения стеариновой кислоты в расплаве битума. Таким образом, при комплексном воздействии этих добавок происходит пластификация битума, которая подтверждается результатами исследования его пенетрации и дуктильности, и дополнительное

снижение потери массы битума при его нагревании до 220 °С.

В результате исследования было выявлено, что добавление промышленного масла И-20 и стеариновой кислоты Т-18 в дорожный битум не оказывает существенного влияния на его основные свойства, такие как динамическая вязкость и температура размягчения. Однако стеариновая кислота Т-18 является одной из наиболее эффективных термостабилизирующих добавок для битума, обладает высокой термической стабильностью и может эффективно защищать битум от деформации и разрушения при высоких температурах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петрова Л.М., Зайдуллин И.М., Аббакумова Н.А., Хуснутдинов И.Ш., Кашапова Р.Р. Информативность параметров состава и строения битумов для оценки их сопротивления старению // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 10. С. 131–134. EDN NXAIRD.
2. Печеный Б.Г., Курбатов В.Л., Лосев В.П. О механизме старения битумов и методах их испытания // Университетская наука. 2019. № 2 (8). С. 28–32. EDN NESZAL.
3. Okhotnikova E.S., Ganeeva Y.M., Yusupova T.N., Romanov G.V., Frolov I.N. Express-method of determination of the content of resins and asphaltenes in bitumens by thermal analysis // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. Issue 24. Pp. 44758–44763. EDN WPDVMB.
4. Ермолаев Д.В., Мингалеева Г.Р. Механизм термического разложения асфальтенов природных битумов // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 12. С. 27–31. EDN UBLWFZ.
5. Ерофеев В.Т., Ликомаскина М.А., Афонин В.В., Архипова А.И. Стойкость асфальтобетонов в условиях воздействия биосреды // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 10. С. 1358–1371. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1358-1371
6. Shekhovtsova S., Korolev E. Interfacial phenomena at the interface in the system “Carbon Primary Materials-Water Solutions of Surfactants” for cement materials // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 2. P. 556. DOI: 10.3390/ma15020556
7. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Mineral carriers for nanoscale additives in bituminous concrete // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. Pp. 80–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1040.80
8. Grengg C., Mittermayr F., Baldermann A., Böttcher M.E., Leis A., Koraimann G. et al. Microbiologically induced concrete corrosion: A case study from a combined sewer network // Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 77. Pp. 16–25. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.06.011
9. Радовский Б.С., Телтаев Б.Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям // Автомобильные дороги. 2013. № 8. С. 50–60.
10. Bulatović V.O., Rek V., Marković K.J. Effect of polymer modifiers on the properties of bitumen // Journal of Elastomers & Plastics. 2014. Vol. 46. Issue 5. Pp. 448–469. DOI: 10.1177/0095244312469964
11. Teltayev B., Amirbayev E., Radovskiy B. Evaluating the effect of polymer modification on the low-temperature rheological properties of asphalt binder // Polymers. 2022. Vol. 14. Issue 13. P. 2548. DOI: 10.3390/polym14132548
12. Acevedo S., Castro A., Negrin J.G., Fernandez A., Escobar G., Piscitelli V. et al. Relations between asphaltene structures and their physical and chemical properties: The rosary-type structure // Energy & Fuels. 2007. Vol. 21. Issue 4. Pp. 2165–2175. DOI: 10.1021/ef070089v
13. Rossi C.O., Caputo P., Ashimova S., Fabozzi A., D’Errico G., Angelico R. Effects of Natural anti-oxidant agents on the bitumen aging process: An EPR and rheological investigation // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Issue 8. P. 1405. DOI: 10.3390/app8081405
14. Зайдуллин И.М., Петрова Л.М., Якубов М.Р., Борисов Д.Н. Изменение состава асфальтенов при старении битума в присутствии антиоксидантов // Журнал прикладной химии. 2013. Т. 86. № 7. С. 1137–1142. EDN AYVSZL.
15. Ojum C., Kuna K., Thom N.H., Airey G.D. An investigation into the effects of accelerated curing on cold recycled bituminous mixes // Asphalt Pavements. 2014. Pp. 1177–1188. DOI: 10.1201/b17219-144
16. Shaban S.M. Effect of stearic acid on the mechanical properties and UV stability of LDPE // Journal of Applied Polymer Science. 2009. Vol. 113. Issue 4. Pp. 2114–2122.
17. Kim S.K. Effect of stearic acid on the mechanical properties and thermal stability of polyamide 6 //

Journal of Applied Polymer Science. 2011. Vol. 119. Issue 6. Pp. 3483–3490.

18. Lee K.S. Effect of stearic acid on the mechanical properties and thermal stability of polystyrene // Journal of Applied Polymer Science. 2011. Vol. 120. Issue 5. Pp. 2705–2711.

19. Ширкунов А.С., Рябов В.Г., Кудинов А.В., Нечаев А.Н., Дегтянников А.С. Получение нефтяных дорожных битумов с повышенной стойкостью против старения // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2010. № 5 (83). С. 89–94. EDN NTOHRJ.

20. Опанасенко О.Н., Лукиш О.В., Жигалова О.Л., Крутько Н.П., Чернецкая В.М., Козинец Т.А. Влияние природы функциональных групп химических модификаторов на термическую стабильность нефтяного битума // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2015. № 1. С. 101–106. EDN TLCRLT.

21. Шеховцова С.Ю., Высоцкая М.А., Королев Е.В. Критериальная оценка термодеструктивных процессов в асфальтобетоне на основе окисленных и остаточных битумов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 5 (713). С. 58–70. EDN XZOIJN.

Поступила в редакцию 8 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 25 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 26 сентября 2023 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Николай Игоревич Шестаков** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2893-7386, Scopus: 57205223447, ORCID: 0000-0002-6809-4993; Nik.shestakov.1990@mail.ru, SHestakovNI@mgsu.ru;

Наталья Владимировна Хохлова — аспирант кафедры градостроительства, преподаватель специальных дисциплин; **Московский автомобильно-дорожный колледж им. А.А. Николаева;** 105082, г. Москва, Бакунинская, д. 81; SPIN- код: 4600-7174, ORCID: 0000-0003-4471-1827; Natalyahoh@bk.ru;

Юрий Эммануилович Васильев — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой дорожно-строительных материалов; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ);** 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 285866, Scopus: 57205604432, ResearcherID: I-8197-2013, ORCID: 0000-0002-1634-0152; vashome@yandex.ru, yu.vasilev@madi.ru;

Ульяна Олеговна Менькина — ассистент, аспирант кафедры дорожно-строительных материалов; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ);** 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; SPIN-код: 7165-0852; Uliana.mienkina@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Petrova L.M., Zajdullin I.M., Abbakumova N.A., Husnutdinov I.SH., Kashapova R.R. Informativeness of the parameters of the composition and structure of bitumen to assess their resistance to aging. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2011; 10:131-134. EDN NXAIRD. (rus.).

2. Pechenyi B.G., Kurbatov V.L., Losev V.P. On the mechanism of bitumen aging and methods of their testing. *University Science*. 2019; 2(8):28-32. EDN NESZAL. (rus.).

3. Okhotnikova E.S., Ganeeva Y.M., Yusupova T.N., Romanov G.V., Frolov I.N. Express-method of determination of the content of resins and asphaltenes in bitumens by thermal analysis. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10(24):44758-44763. EDN WPDVMB.

4. Ermolaev D.V., Mingaleeva G.R. Mechanism of thermal decomposition of asphaltenes of natural bi-

tumen. *Bulletin of the Technological University*. 2015; 18(12):27-31. EDN UBLWFZ. (rus.).

5. Erofeev V.T., Likomaskina M.A., Afonin V.V., Arkhipova A.I. A study on resistance of asphalt concrete exposed to the effect of mycelial fungi. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(10):1358-1371. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1358-1371 (rus.).

6. Shekhovtsova S., Korolev E. Interfacial phenomena at the interface in the system “Carbon Primary Materials-Water Solutions of Surfactants” for cement materials. *Materials*. 2022; 15(2):556. DOI: 10.3390/ma15020556

7. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Mineral carriers for nanoscale additives in bituminous concrete. *Advanced Materials Research*. 2014; 1040:80-85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1040.80

8. Grengg C., Mittermayr F., Baldermann A., Böttcher M.E., Leis A., Koraimann G. et al. Micro-

biologically induced concrete corrosion: A case study from a combined sewer network. *Cement and Concrete Research*. 2015; 77:16-25. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.06.011

9. Radovsky B.S., Teltaev B.B. Viscoelastic characteristics of bitumen and their assessment by standard indicators. *Highways*. 2013; 8:50-60. (rus.).

10. Bulatović V.O., Rek V., Marković K.J. Effect of polymer modifiers on the properties of bitumen. *Journal of Elastomers & Plastics*. 2014; 46(5):448-469. DOI: 10.1177/0095244312469964

11. Teltayev B., Amirbayev E., Radovskiy B. Evaluating the Effect of Polymer Modification on the Low-Temperature Rheological Properties of Asphalt Binder. *Polymers*. 2022; 14(13):2548. DOI: 10.3390/polym14132548

12. Acevedo S., Castro A., Negrin J.G., Fernandez A., Escobar G., Piscitelli V. et al. Relations between asphaltene structures and their physical and chemical properties: The rosary-type structure. *Energy & Fuels*. 2007; 21(4):2165-2175. DOI: 10.1021/ef070089v

13. Rossi C.O., Caputo P., Ashimova S., Fabozzi A., D'Errico G., Angelico R. Effects of natural antioxidant agents on the bitumen aging process: An EPR and rheological investigation. *Applied Sciences*. 2018; 8(8):1405. DOI: 10.3390/app8081405

14. Zaidullin I.M., Petrova L.M., Yakubov M.R., Borisov D.N. Variation of the composition of asphaltene in the course of bitumen aging in the presence of antioxidants. *Journal of Applied Chemistry*. 2013; 86(7):1137-1142. EDN AYVSZL. (rus.).

15. Ojum C., Kuna K., Thom N.H., Airey G.D. An investigation into the effects of accelerated curing on cold recycled bituminous mixes. *Asphalt Pavements*. 2014; 1177-1188. DOI: 10.1201/b17219-144

16. Shaban S.M. Effect of stearic acid on the mechanical properties and UV stability of LDPE. *Journal of Applied Polymer Science*. 2009; 113(4):2114-2122.

17. Kim S.K. Effect of stearic acid on the mechanical properties and thermal stability of polyamide 6. *Journal of Applied Polymer Science*. 2011; 119(6):3483-3490.

18. Lee K.S. Effect of stearic acid on the mechanical properties and thermal stability of polystyrene. *Journal of Applied Polymer Science*. 2011; 120(5):2705-2711.

19. Shirkunov A.S., Ryabov V.G., Kudinov A.V., Nechaev A.N., Degtyannikov A.S. Production of petroleum road bitumen with increased resistance against aging. *Oil and Gas Studies*. 2010; 5(83):89-94. EDN NTOHRJ. (rus.).

20. Opanasenko O.N., Luksha O.V., Zhigalova O.L., Krutko N.P., Chernetskaya V.M., Kozinets T.A. The effect of chemical modifiers' functional groups on the oil bitumen thermal stability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*. 2015; 1:101-106. EDN TLCRLT. (rus.).

21. Shekhovtsova S.Yu., Vysotskaya M.A., Korolev E.V. Criterial estimation of thermal destructive processes in asphalt concrete on the basis of oxidized and residual bitumen. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2018; 5(713):58-70. EDN XZOIJN. (rus.).

Received June 8, 2023.

Adopted in revised form on September 25, 2023.

Approved for publication on September 26, 2023.

BIONOTES: **Nikolay I. Shestakov** — Candidate of Technical Sciences, 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: 2893-7386, Scopus: 57205223447, ORCID: 0000-0002-6809-4993; Nik.shestakov.1990@mail.ru, SHestakovNI@mgsu.ru;

Natalia V. Khokhlova — postgraduate, lecturer of special disciplines; **Moscow Automobile and Road College named after A.A. Nikolaev**; 81 Bakuninskaya st., Moscow, 105082, Russian Federation; SPIN-code: 4600-7174, ORCID: 0000-0003-4471-1827; Natalyahoh@bk.ru;

Yuri E. Vasiliev — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Road Construction Materials; **Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 285866, Scopus: 57205604432, ResearcherID: I-8197-2013, ORCID: 0000-0002-1634-0152; vashome@yandex.ru, yu.vasilev@madi.ru;

Uliana O. Menkina — assistant, postgraduate student of the Department of Road Construction Materials; **Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; SPIN-code: 7165-0852; Uliana.mienkina@mail.ru.

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

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 004.93'1:004.932

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1937-1956

Дешифрирование депрессивных строительных объектов по данным спутниковой съемки и подспутникового мониторинга

Маретта Леоновна Казарян¹, Андрей Александрович Рихтер²,
Михаил Андраникович Шахрамьян^{3,4}, Сергей Михайлович Григорьев³

¹ Северо-Осетинская государственная медицинская академия (СОГМА); г. Владикавказ, Россия;

² Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»;
г. Москва, Россия;

³ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет);
г. Москва, Россия;

⁴ Государственный университет просвещения (ГУП); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследуются депрессивные строительные объекты (ДСО) и наличие их на территории Арктики. Применение технологий дистанционного зондирования Земли из космоса является незаменимым для обеспечения подспутникового мониторинга по определению аварийных, поврежденных и заброшенных строительных объектов в труднодоступных регионах. Цель исследования — возможность дешифрирования ДСО по данным аэрокосмического мониторинга. Для арктических территорий дистанционные методы актуальны из-за неблагоприятных метеорологических условий, а также из-за депрессивного характера большинства населенных пунктов. Депрессивные строительные объекты служат одним из основных признаков обследуемых территорий. В мировой практике существуют определенные методы по дешифрированию депрессивных сооружений. Это иерархический метод глубокого обучения на базе снимков Google Street View, информационное моделирование исторических зданий, фотограмметрия с помощью БПЛА, 3D-съемки.

Материалы и методы. Используются спутниковые изображения высокого пространственного разрешения, отображающие территории с различными условиями освещения, ландшафта и компонентного состава поверхности Арктики. Предмет исследования — комплексный метод визуального дешифрирования ДСО.

Результаты. Представлены области и признаки дешифрирования, актуальность дешифрирования депрессивных объектов в Арктическом регионе. Приведены примеры аварийных и заброшенных объектов и их дешифровочные признаки на спутниковых, наземных и аэрофотоснимках. Показан экологический аспект ДСО, связанных с продуцированием свалок и определенными механизмами поведения по отношению к землепользованию.

Выводы. Рассмотренные методы дешифрирования ДСО по данным аэрокосмического мониторинга позволят проводить их кадастровый учет, картографирование и систематизацию, оценивать количественные и качественные характеристики этих объектов и депрессивность исследуемых регионов. Это наиболее актуально для Арктического региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительный объект, здание, заброшенное здание, недостроенное здание, разрушенное здание, поврежденное здание, аварийное здание, дешифрирование, дешифровочные признаки, изображение, спутниковое изображение, космический мониторинг, семантическая сегментация, Арктика, Арктический регион

Благодарности. Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет бюджетных средств по государственному заданию Финансового университета при Правительстве Российской Федерации.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Казарян М.Л., Рихтер А.А., Шахрамьян М.А., Григорьев С.М. Дешифрирование депрессивных строительных объектов по данным спутниковой съемки и подспутникового мониторинга // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1937–1956. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1937-1956

Автор, ответственный за переписку: Маретта Леоновна Казарян, maretta@bk.ru.

Deciphering of emergency construction objects using satellite imagery and sub-satellite monitoring data in the Arctic

Maretta L. Kazaryan¹, Andrey A. Richter², Mikhail A. Shakhramanyan^{3,4}, Sergey M. Grigoriev³

¹ North-Ossetian State Medical Academy (SOGMA); Vladikavkaz, Russian Federation;

² Aerospace Monitoring Research Institute "AEROSPACE"; Moscow, Russian Federation;

³ Financial University under the Government of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation;

⁴ State University of Enlightenment (SUE); Mytishchi, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This paper studies depressed construction sites and their presence on the territory of Arctic. Application of earth remote sensing technologies from space is indispensable for providing sub-satellite monitoring to identify emergency, damaged and abandoned construction objects in hard-to-reach regions. The purpose of the study is the possibility of deciphering depressed construction objects according to aerospace monitoring data. For the Arctic territories remote methods are relevant because of unfavorable meteorological conditions of contact methods, as well as because of the depressed nature of most settlements. Depressed construction sites are one of the main features of the surveyed territories. In the world practice, there are certain methods for deciphering depressed structures. These are hierarchical deep learning method based on Google Street View images, information modelling of historical buildings, photogrammetry using UAVs, 3D shooting.

Materials and methods. The research is carried out on the basis of satellite images of high spatial resolution, depicting territories with different lighting conditions, landscape and component composition of the Arctic surface. The subject of the research is a complex method of visual decoding of depressed construction objects.

Results. The areas and signs of deciphering, the relevance of deciphering of these objects in the Arctic region are presented. Examples of emergency and abandoned objects and their deciphering signs on satellite, ground and aerial photographs are given. The ecological aspect of depressed construction objects associated with the production of landfills and certain mechanisms of behavior in relation to land use is shown.

Conclusions. The methods of interpretation of depressed construction objects based on aerospace monitoring data considered in the paper allow to carry out their cadastral registration, mapping and systematization, to estimate quantitative and qualitative characteristics of these objects and depressiveness of the regions under study. This is most relevant for the Arctic region.

KEYWORDS: building object, emergency construction, destroyed object, abandoned building, 3-D model, recognition, decoding, satellite image, space monitoring, semantic segmentation, Arctic

Acknowledgements. The article was prepared based on the results of research carried out at the expense of budgetary funds under the state assignment of the Financial University.

FOR CITATION: Kazaryan M.L., Richter A.A., Shakhramanyan M.A., Grigoriev S.M. Deciphering of emergency construction objects using satellite imagery and sub-satellite monitoring data in the Arctic. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1937-1956. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1937-1956 (rus.).

Corresponding author: Marettak L. Kazaryan, marettak@bk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционные методы мониторинга земной поверхности обладают рядом преимуществ перед контактными методами [1–3]:

1. Масштабность. Идентификация и анализ состояния земной поверхности и ее подсистем одновременно и на огромных территориях.
2. Автоматизация. С помощью методов цифровой обработки изображений и компьютерного зрения процесс дешифрирования различных объектов и процессов, их признаков на земной поверхности автоматизируется.
3. Бесконтактность. Наличие регионов, труднодоступных (по разным причинам) для контактных исследований, приводит к необходимости применения для этих регионов бесконтактных исследований.
4. Детальность. Полезная информация, выявляемая при обработке аэрокосмических изображений, является объективной и может быть вычислена в каждой точке земной поверхности.

Для арктических территорий дистанционные методы особенно актуальны, прежде всего, из-за неблагоприятных метеорологических условий для контактных методов, а также из-за депрессивного характера большинства населенных пунктов. Депрессивность может выражаться: в технологической изолированности от «большой» инфраструктуры; неразвитости транспортных путей и транспорта; социально-экономическом упадке. Одним из основных признаков депрессивности обследуемой территории, дешифри-

руемой по данным спутникового и подспутникового мониторинга, служит наличие депрессивных строительных объектов (ДСО). При этом вводится определенный набор критериев, описывающих депрессивность территории по данным мониторинга, в том числе количественных характеристик ДСО.

В мировой практике в области дешифрирования ДСО можно выделить публикации [4–8]. В работе [4] описаны особенности пространственного «поведения» заброшенных объектов и территорий. Так, было показано, что заброшенные дома группируются и территориально распространяются, а пустующая и заброшенная недвижимость ограничивается конкретными районами, а не разбросана по всему городу. Автор отмечает, что было проведено мало исследований по пространственным аспектам оставления зданий; теории о том, почему оставление может быть кластерным, отсутствуют в литературе. Предполагается, что заброшенные дома группируются в кластеры, так как кластеризуются предикторы или причины заброшенности зданий.

В труде [8] к историческому объекту Palazzo del Littorio in Caronno Pertusella (VA) применена технология информационного моделирования исторических зданий НВИМ. Данный объект — хрестоматийный случай для комплексного обследования и документирования различных видов структурных повреждений. Он находится в состоянии деградации, но не настолько серьезной, чтобы помешать проекту по сохранению вместе с проектом полной реконвер-

сии его функции. Информация, связанная с автоматическим распознаванием различных текстур стен и возможных механизмов разрушения, порожденных взломом каркаса, обнаруживается благодаря качеству изображений, полученных в результате фотограмметрической съемки высокой четкости.

Разработан иерархический метод глубокого обучения по обнаружению заброшенных строительных объектов на базе снимков Google Street View (GSV), для которых характерны открытый доступ, глобальный охват и наземный режим фотографирования [5, 6]. Этапы метода:

1) классификация на основе сцены, которая может извлекать глобальные визуальные особенности ДСО, была реализована путем тонкой настройки предварительно обученной модели глубокой сверточной нейронной сети (CNN);

2) классификация на базе патчей, которая может выделить специфические локальные особенности ДСО. Патчи были сгенерированы из изображений GSV на основе автоматически обнаруженных локальных объектов, за которыми следовали пометки по трем категориям: участки зданий, участки растительности и др. Две глубокие модели CNN использованы для выявления поврежденных участков фасада здания и заросших участков растительности соответственно;

3) ДСО на индивидуальном уровне обнаруживаются путем интеграции результатов классификации сцен и результатов классификации участков в модель дерева решений.

Быстрая методология количественной оценки ущерба крыше в исторических зданиях, предложенная вскоре после того, как произойдет легкое сейсмическое событие, представлена в труде [7] с целью оценки необходимости временных вмешательств для предотвращения дальнейшего ущерба. Съемка основана на фотограмметрии с БПЛА, хорошо известной методике, которая позволяет проводить осмотр и документировать в цифровом виде даже в труднодоступных или опасных местах. Исследование направлено на анализ возможности автоматизированного картирования повреждений крыши с использованием процедуры классификации изображений на основе контролируемого машинного обучения. Процедура суммируется в эффективном рабочем процессе, где фотограмметрия БПЛА сочетается с другими методами 3D-съемки, такими как наземная фотограмметрия и лазерное сканирование, для предоставления исчерпывающей документации и количественных данных об историческом здании.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемое исследование важно ввиду наличия и расширения депрессивных территорий по всей планете, причинами чего является ряд со-

циально-экономических, политических и метеорологических факторов. Исследование отличается от существующих в мировой практике комплексным визуальным подходом к дешифрированию ДСО. Такой подход характеризуется: универсальностью используемой входной информации; учетом видов ДСО, не ревизируемых существующими методами; комплементарностью и полнотой; наличием непрерывной обратной связи и контроля в процессе выявления и параметризации новых объектов; отсутствием потребности в специальном программном обеспечении и проприетарных ресурсах.

Предметом исследования в настоящей работе является комплексный метод визуального дешифрирования ДСО (рис. 1).

Входная информация — типы изображений, классы ДСО. Каждому типу входных изображений и классу ДСО соответствует свой набор дешифровочных признаков. Для тестового региона (вся наблюдаемая область) устанавливаются области, относящиеся к объекту дешифрирования. В данных областях, прежде всего характеризуемых высокой степенью вероятности обнаружения ДСО, выявляются объекты по данным наборам признаков. При этом в разном сочетании типов изображений и классов ДСО имеет место комплементарность «ветвей» обнаружения объектов.

Каждый выявленный объект параметризуется (по геометрическим, структурным, экологическим и экономическим параметрам) и картографируется. В частности, к геометрическим относятся площадь и объем здания, параметры завала; к структурным — материалы и разметки повреждений конструкций объекта; к экологическим — площадь и концентрация мусорного покрова, образованного при деструкции строительного объекта (СО); к экономическим — концентрация заброшенных объектов на заданной площади.

Процедура обнаружения, параметризации и картографирования производится в различные моменты наблюдаемого периода времени. Наблюдение осуществляется, с одной стороны, нового обнаруженного ДСО в его временной окрестности, с другой — пространственной окрестности обнаруженных объектов для выявления новых ДСО.

Депрессивные строительные объекты

В «здоровом» состоянии СО полноценно функционирует, т.е. он выполняет социально значимые функции и в нем протекают социально значимые процессы (жилые, общественные, промышленные, инженерно-технические и др.). В «болезненном» (депрессивном) состоянии полноценного или вообще функционирования СО нет. В этом случае на него воздействуют только естественные факторы окружающей среды, что приводит в конечном счете к самообрушению здания, сооружения в зависимости от его механизмов саморегуляции, гомеостаза

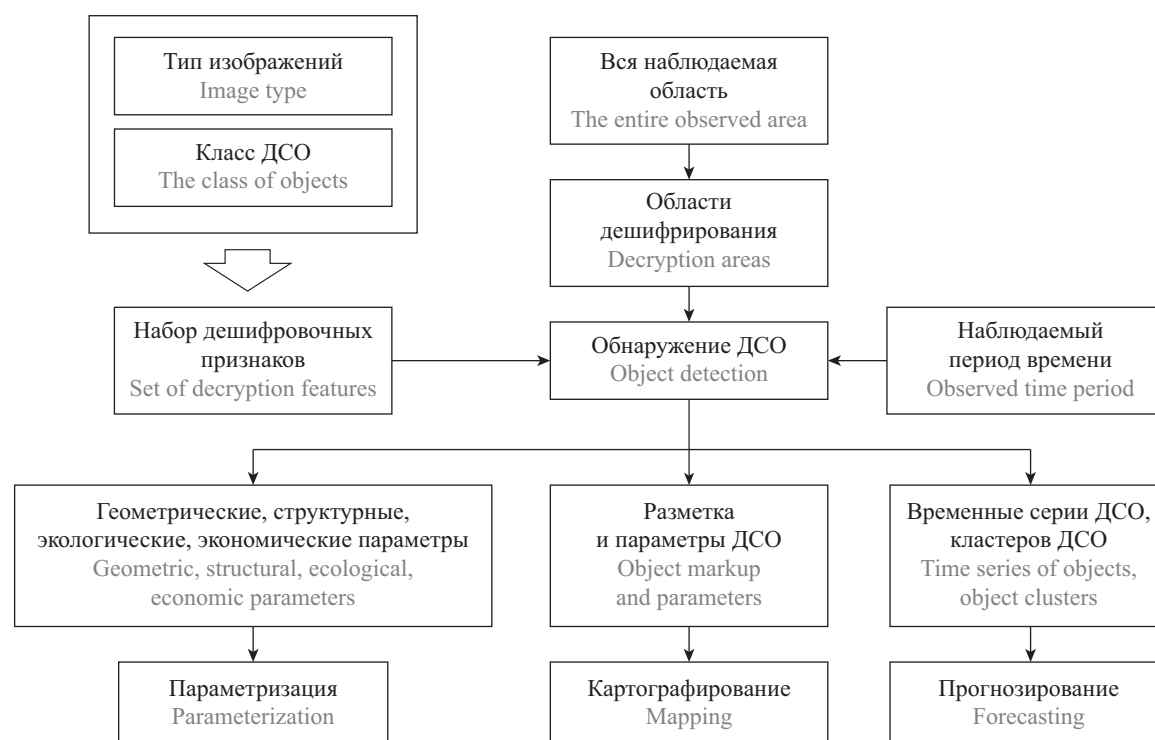


Рис. 1. Общая схема комплексного метода визуального дешифрирования ДСО

Fig. 1. General scheme of the complex method of visual interpretation of DCO

(чем выше параметры прочности, тем дольше объект простоят) [9]. Если не заниматься депрессивными строительными отходами, они превращаются в объекты захоронения отходов, для выявления которых и анализа их компонентного состава в настоящее время разработаны методы и технологии космического мониторинга [10–17].

Введем (депрессивные) состояния СО:

1. Недостроенное — состояние объекта незавершенного строительства, при котором его конструирование к некоторому моменту времени приведено к определенной промежуточной стадии (строительство заморожено), т.е. объект не доведен до конечного состояния, утвержденного в его проектно-технической документации.

2. Аварийное — состояние объекта завершено строительства, при котором он функционирует (качество функционирования объективно ниже, чем требуется), но при этом имеет место высокий риск возникновения местных и общего разрушений.

3. Поврежденное — состояние СО, измененное под внешним воздействием — природным (землетрясения, наводнения, природные пожары и др.) или антропогенным (техногенные пожары и взрывы, прорывы канализационных или водопроводных труб и др.), в основном под воздействием чрезвычайных ситуаций (ЧС) [18].

4. Заброшенное — состояние объекта завершено строительства, при котором он с некоторого момента времени прекратил свое функционирование.

На рис. 2 приведены виды ДСО с точки зрения визуального дешифрирования по данным спутниковой, воздушной или наземной съемки. Курсивом отмечены СО, которые к депрессивным не относятся.

Как видно, к ДСО относятся как здания, так и сооружения. Находиться они могут на разных стадиях жизненного цикла (ЖЦ), которые условно сведены к четырем: монтаж, эксплуатация, прекращение эксплуатации, демонтаж.

По категории технического состояния зданий выделяются: I–III (по ГОСТ Р 53778–2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния») и I–V (СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений»)^{1, 2}.

Степени повреждения могут отличаться в зависимости от видов внешних воздействий (ЧС или снос СО), но в целом их можно свести к степеням (по землетрясениям): 0 — нет повреждений; 1 — легкие повреждения; 2 — средние повреждения; 3 — тяжелые повреждения; 4 — разрушения; 5 — обвалы² [18].

Виды СО «здоровые», категории I по ГОСТ Р 53778–2010, категорий I и II по СП 13-102-2003, нулевой степени повреждения к ДСО не относятся.

¹ Электронный фонд правовых и нормативных документов. URL: <https://docs.cntd.ru>

² Лидер Проект. URL: <https://lidermsk.ru>



Рис. 2. Классификация ДСО с точки зрения визуального дешифрирования

Fig. 2. Classification of DCO in terms of visual interpretation

Дешифровочные признаки депрессивных строительных объектов

На рис. 3, а показана взаимосвязь областей, относящихся к объекту дешифрирования, сокращенно ОД (в нашем случае — ДСО): U — вся наблюдаемая область (страна, район, регион и т.д.); U_A — активная область (с высокой вероятностью присутствия ОД); U_P — пассивная область (с низкой вероятностью); U_T — технологическая область (вся территория, наблюдаемая на изображениях); U_O — область, включающая все ОД заданного класса; u_{OT} — ОД, которые фактически технологически обнаружены; p_1 — ОД, который может быть технологически обнаружен; p_2 — не может быть обнаружен; p_3 — мимикрирующий ОД; p — обнаруженный ОД; u — окрестность ОД, в которой могут лежать другие объекты данного класса (по принципу «поиска грибов в лесу»); u' — область, по которой строится прогноз. Данная область может включать как отдельный объект, так и кластеры объектов, выявленные в разные последовательные моменты времени.

Аналогично для временных интервалов (рис. 3, б): $\Delta t = [t_n, t_k]$ — весь ЖЦ объекта (кластера объектов) от момента появления t_n до момента исчезновения t_k ; Δt_{d1} , Δt_{d2} , Δt_{d3} — периоды депрессивных состояний

СО (на этапе строительства, эксплуатации, прекращения эксплуатации); Δt_T — технологический временной интервал (весь временной интервал, по которому территория наблюдается на изображениях); $\Delta t_{OT} = [t_{нач}, t_{кон}]$ — фактически наблюдаемый период времени от начала $t_{нач}$ до окончания $t_{кон}$; $\Delta t_{вр}$ — временная серия наблюдения области u' (период основания прогноза). Интервалы могут пересекаться по-разному, в частности, точки t' и t'' — моменты времени, лежащие на интервале горизонта прогноза в «прошлое» и «будущее», могут быть как в пределах, так и за пределами интервала Δt_T и даже Δt [9].

При этом имеют место соотношения:

$$\begin{aligned}
 U &= U_A + U_P, u_{OT} \leq U_{OT} < U_O < U, \\
 U_{OT} &= U_O U_T, \{u_i\} < u_{OT}, 1 \leq i \leq n; \\
 p_1 &< U_{OT}, p_2 < U_O - U_{OT}, p < U_{OT}, \\
 u &> p, p_3 < u'_{OT}, u'_{OT} &= U_{OT} - u_{OT}.
 \end{aligned} \quad (1)$$

В соотношениях (1): «сложение» — операция объединения множеств; «вычитание» — операция разности множеств; «умножение» — операция пересечения множеств; «равно» — равенство множеств; «меньше» — принадлежность; «больше» — включение; «меньше или равно» — подмножество или совпадение.

Мимикрирующий ОД — это ОД, не обнаруженный технологически ввиду невозможности его различить на изображении по дешифровочным признакам (ДП). То есть он виден технологическими инструментами съемки (находится в U_T), но не различается от фоновых объектов по ДП.

К формам мимикрии ДСО можно отнести невозможность (или трудность) отличия ДСО от: 1) обычных «живых» СО; 2) строящихся СО; 3) деревьев (ввиду скрытия объекта кронами или его зарастания).

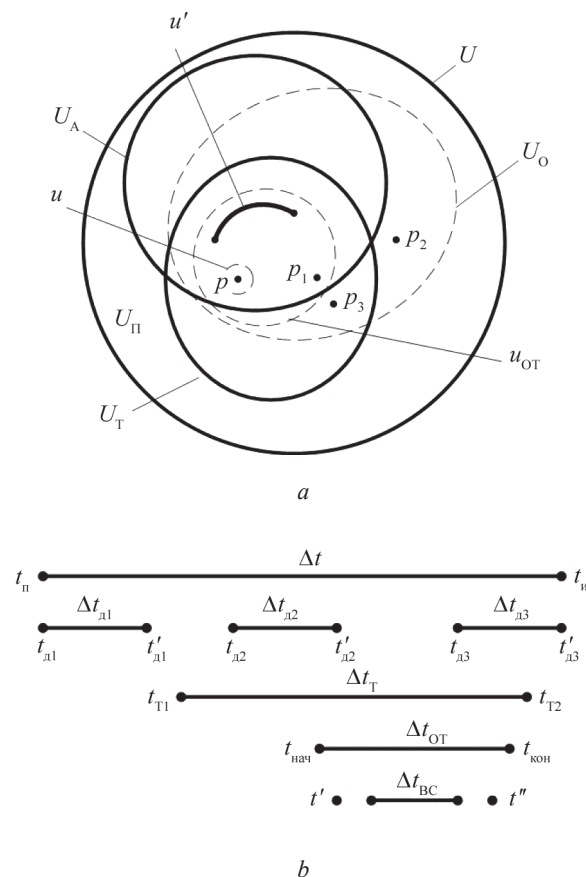


Рис. 3. Схема областей (а) и интервалов времени (б) дешифрования

Fig. 3. Scheme of areas (a) and time intervals (b) of decoding

На рис. 4 приведен пример мимикрирующего объекта класса ДСО: 70-й квартал, д. 16, г. Темиртау, Карагандинская область, Казахстан. Как видно, данный депрессивный СО по ДП не отличается от других СО и его различить по данным ДП нельзя, он «мимикрирует» на изображении. Часто недостроенные ДСО могут иметь «мимикрирующие» свойства.

На рис. 5 представлена классификация ДП, принятая в рассматриваемой концепции визуального дешифрования ДСО. На рис. 5: прямые ДП описывают ОД, косвенные ДП описывают фон, которому соответствует ОД.



Рис. 4. Пример мимикрирующего объекта класса ДСО (Яндекс карты)

Fig. 4. An example of a mimicking object of the DCO class (Yandex-maps)

Считаем, что ОД можно установить двойную импликацию в виде:

$$i\alpha_i \rightarrow p \rightarrow i\beta_i \quad (2)$$

где α_i — достаточные ДП; β_i — необходимые ДП. Достаточные ДП — признаки, которые могут однозначно установить принадлежность объекта к определенному классу, отличающие его от объектов других классов. Необходимые ДП — признаки, которые присущи объекту данного класса, но могут быть присущи и объектам других классов, не имеющих пересечений с этим классом. Дизъюнкция достаточных признаков означает, что для идентификации класса объекта достаточно одного из условий из множества $\{\alpha_i\}$ (но это не обязательно полное множество возможных условий идентификации). Дизъюнкция необходимых признаков означает, что объекты класса могут иметь какие-нибудь «черты» из множества $\{\beta_i\}$ (но возможно и другие, не входящие в это множество).

В табл. 1, 2 приведены основные экстерьерные ДП аварийных и заброшенных зданий.

Дешифрирование аварийных зданий по данным воздушной и наземной съемки

Руководствуясь ДП табл. 1, находясь в точке вне ОД, выявлены ДСО (здания) по данным воздушной и наземной съемки по веб-картам Яндекс в рамках технологической области. U_T ограничена территорией и режимами наблюдения (вдоль отснятых дорог в режиме просмотра улиц); U — участок Балашихинского района, время наблюдения — 2017–2021 гг. [9].

На рис. 6 показана разметка ДП (см. табл. 1) на изображениях некоторых аварийных зданий.

В более редких случаях аварийные здания с «толстыми» ДП выявляются по воздушным панорамным снимкам. На рис. 7 изображен объект p и ракурсы $\{q_i, s_i\}$ (q_i — точка; s_i — направление), адрес объекта — ул. Свободы, д. 10/12, мкр. Кера-

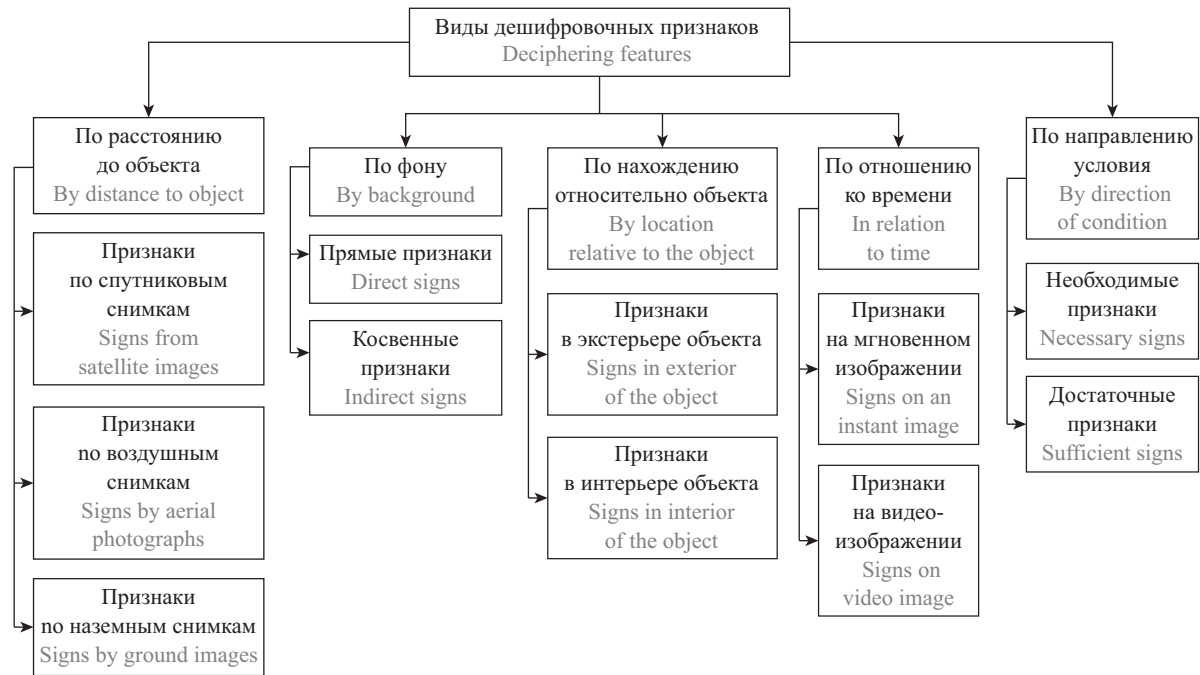


Рис. 5. Виды дешифровочных признаков объектов дешифрирования

Fig. 5. Types of DF of deciphering objects

Табл. 1. Основные экстерьерные ДП аварийных зданий

Table 1. The main exterior DF of emergency houses

Дешифровочные признаки / Decryption features
Сгнивающие деревянные конструкции (балконы, оконные или дверные наличники, прямки и др.) Decaying wooden structures (balconies, window or door frames, pits, etc.)
Наличие деревянных конструкций на бетонной, кирпичной или монолитной основе The presence of wooden structures on a concrete, brick or monolithic basis
Наличие искусственных укреплений / The presence of artificial fortifications
Деформирование конструкций (наличников, несущих, облицовочных) Deformation of structures (platbands, load-bearing, facing)
Откол отделочного покрытия, обнажение кирпича на стенах Spalling of the finishing coating, exposure of bricks on the walls
Повреждения или разрушения дымоходов и труб в вентиляционной системе Damage or destruction of chimneys and pipes in the ventilation system
Наличие обнаженных оконных или дверных проемов / Presence of exposed window or door openings
Ненадёжность закрепления конструкций (карниз или козырек крыши, подвесное крепление балкона и т.д.) Unreliability of fastening structures (cornice or roof visor, suspension fastening of a balcony, etc.)
Откол кусков бетона, обвал кирпичной кладки / Spalling of pieces of concrete, collapse of brickwork
Плохое закрепление электропроводки на стене / Poor wiring on the wall
Повреждения или разрушения желобов или труб в водосточной системе Damage or destruction of gutters or pipes in the drainage system
Латание участков стен или крыш (цементом, кирпичом, листовым металлом и др.) Patching sections of walls or roofs (cement, brick, sheet metal, etc.)
Повреждения кровли крыши (шифера, черепицы, рубероида и др.) Damage to the roof of the roof (slate, tiles, roofing material, etc.)
Трещины на стенах и отмостках / Cracks in walls and decks
Обвал участков стен и крыш / Collapse of sections of walls and roofs

...

Табл. 2. Основные экстерьерные ДП заброшенных СО

Table 2. Main exterior DFs of abandoned CO

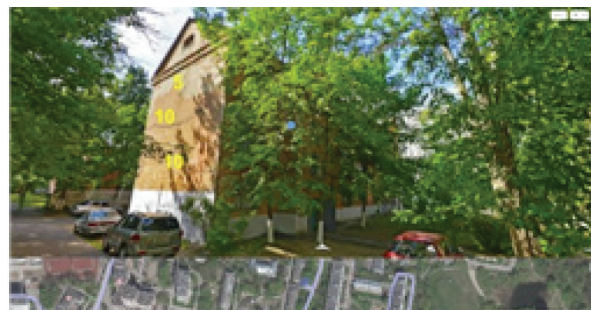
Дешифровочные признаки / Deciphering features
Достаточные признаки / Sufficient features
Растительность на объекте (зарастание объекта) / Vegetation on the object (overgrowing of the object)
Строительный мусор по периметру объекта / Construction debris around the perimeter of the facility
Частичное или полное обрушение крыши / Partial or complete roof collapse
Обнажение внутренности объекта (помещений) / Exposure of the interior of the object (rooms)
Ржавые конструкции (для сооружений из металла) / Rusty structures (for metal structures)
Наличие открытых или глухих проёмов и отсутствие закрытых (оконные, дверные, арочные) The presence of open or blind openings and the absence of closed ones (window, door, arched)
Частичное или полное обрушение стен / Partial or complete wall collapse
Наличие свалки на объекте или по его периметру / The presence of a landfill at the facility or along its perimeter
...
Необходимые признаки / Necessary features
Наличие свалки в окрестности объекта, свалки на месте объекта The presence of a landfill in the vicinity of the object, a landfill at the site of the object
Наличие растительности по периметру объекта / The presence of vegetation around the perimeter of the object
Видимое отсутствие дорог, подведенных к объекту (ввиду их разрушения, зарастания или отсутствия) Apparent absence of roads leading to the object (due to their destruction, overgrowth or absence)
Отсутствие признаков техногенной «жизни» в окрестности объекта (автомобилей, парковок и др.) The absence of signs of technogenic “life” in the vicinity of the object (cars, parking lots, etc.)
Наличие надписей или изображений на стенах, крыше или полу объекта The presence of inscriptions or images on the walls, roof or floor of the facility
Загрязнение или разрушение стекол / Dirty or broken glass
Наличие заброшенных объектов в окрестности объекта / The presence of abandoned objects in the vicinity of the object
...

мик; объект p' и ракурсы $\{q'_i, s'_i\}$ (q'_i — точка; s'_i — направление), адрес объекта — Кооперативная ул., д. 35, мкр. Железнодорожный (г. Балашиха, Московская область). Как видно, по таким снимкам хорошо дешифрируются крупные «дефекты» крыши, а также крупные «дефекты» на стенах, в особенности оконные и дверные проемы. Оконные проемы на объекте p в точке съемки q_1 заколочены (глухие

проемы), а на объекте p' в точке съемки q'_1 на них нет оконных рам (открытые проемы). Признаком наличия «жизни» в здании p' является наличие открытых оконных и дверного проемов везде, кроме трех на втором этаже, где вставлены окна (закрытые проемы). Изображения p' не показаны с видов q'_4, q'_5, q'_6 , так как они неинформативны: q'_4 — объект скрыт кронами деревьев, q'_5 и q'_6 — высотными зданиями.



a



b

Рис. 6. (начало) Примеры аварийных зданий (Яндекс карты): а — ул. Евстафьева, д. 13а (2018 г.); б — мкр. Кучино, ул. Почтовая, д. 3 (2018 г.)

Fig. 6. (starting) Examples of emergency houses (Yandex maps): a — 13a Evstafieva st. (2018); b — microdistrict Kuchino, Pochtovaya st., 3 (2018)



Рис. 6. (окончание) Примеры аварийных зданий (Яндекс карты): *c* — ул. Зеленая, д. 7 (2018 г.); *d* — ул. Зеленая, д. 5 (2018 г.); *e* — мкр. Ольгино, ул. Жилгородок, д. 17 (2017 г.); *f* — мкр. Ольгино, ул. Жилгородок, д. 30 (2018 г.); *g* — ул. Орджоникидзе, д. 15 (2018 г.); *h* — мкр. Кучино, ул. Почтовая, д. 2А (2018 г.)

Fig. 6. (ending) Examples of emergency houses (Yandex maps): *c* — Zelenaya st., 7 (2018); *d* — Zelenaya st., 5 (2018); *e* — microdistrict Olgino, Zhilgorodok st., 17 (2017); *f* — microdistrict Olgino, Zhilgorodok st., 30 (2018); *g* — microdistrict Ordzhonikidze, D. 15 (2018); *h* — microdistrict Kuchino, Pochtovaya str., 2A (2018)

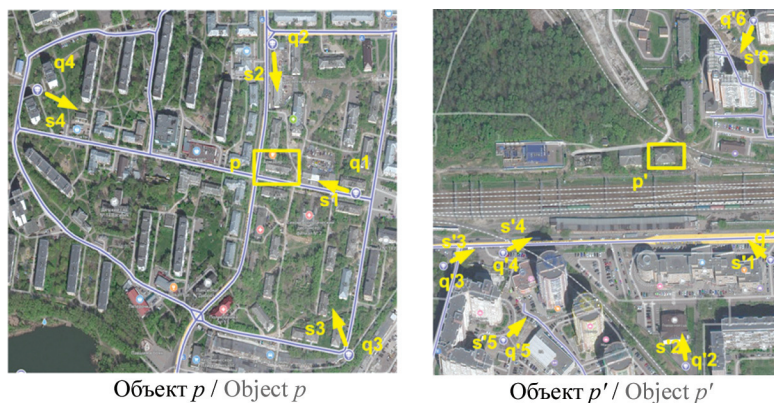


Рис. 7. (начало) Примеры съемки аварийных объектов с разных ракурсов по данным воздушной панорамной съемки (Яндекс карты)

Fig. 7. (starting) Examples of shooting emergency objects from different angles according to aerial panoramic shooting (Yandex-maps)



Рис. 7. (окончание) Примеры съемки аварийных объектов с разных ракурсов по данным воздушной панорамной съемки (Яндекс карты)

Fig. 7. (ending) Examples of shooting emergency objects from different angles according to aerial panoramic shooting (Yandex-maps)

Дешифрирование заброшенных зданий по данным спутниковой и воздушной съемки

На рис. 8, 9 приведены примеры заброшенных зданий, обнаруженных в Балашихинском районе Московской области (область наблюдения), выявленных по спутниковым снимкам

и сопоставленных с наземными и воздушными панорамными снимками в Яндекс картах. Как видно, заброшенные СО дешифрируются и на спутниковых снимках тоже. $\approx$ — примерный адрес объекта (при необнаружении точного адреса).

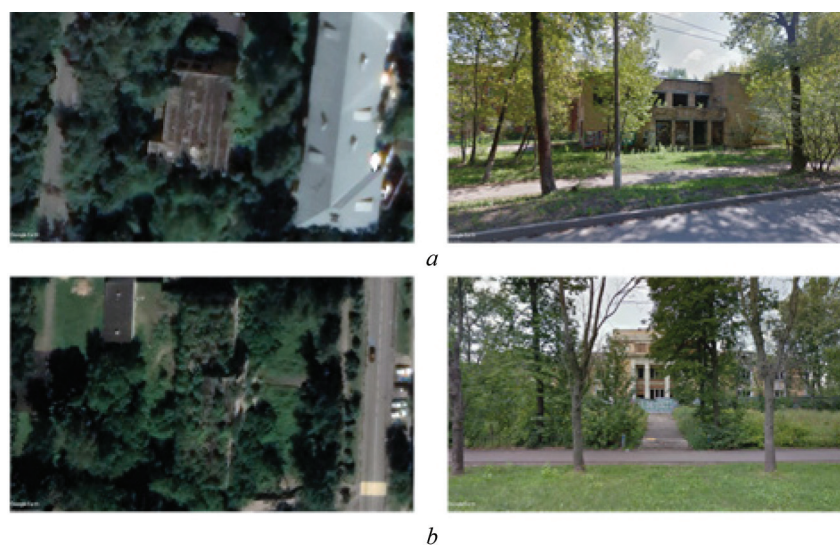


Рис. 8. (начало) Примеры заброшенных зданий по спутниковым и наземным панорамным снимкам (Яндекс карты): a — ул. Орджоникидзе, д. 6; b — ул. Флёрова, д. 3А

Fig. 8. (starting) Examples of abandoned houses from satellite and ground-based panoramic images (Yandex Maps): a — Ordzhonikidze st., 6; b — 3A Flerova st.



Рис. 8. (окончание) Примеры заброшенных зданий по спутниковым и наземным панорамным снимкам (Яндекс карты): *a* — ул. Орджоникидзе, д. 6; *b* — ул. Флёрова, д. 3А; *c* — Почтовая ул., д. 4к1, мкр. Кучино (≈); *d* — Советская ул., д. 48 (≈); *e* — Зеленая ул., д. 5 (≈); *f* — Аптекарская ул., д. 9/1, мкр. Салтыковка (≈)

Fig. 8. (ending) Examples of abandoned houses from satellite and ground-based panoramic images (Yandex Maps): *a* — Ordzhonikidze st., 6; *b* — 3A Flerova st.; *c* — 4k1 Postal st., microdistrict Kuchino (≈); *d* — Sovetskaya st., 48 (≈); *e* — Zelenaya str., 5 (≈); *f* — Aptekarskaya st., 9/1, microdistrict Saltykovka (≈)



Рис. 9. (начало) Примеры заброшенных зданий по спутниковым и воздушным панорамным снимкам (Яндекс карты): *a* — Кооперативная ул., д. 37, мкр. Железнодорожный

Fig. 9. (starting) Examples of abandoned houses from satellite and aerial panoramic images (Yandex Maps): *a* — Cooperative st. 37, microdistrict Zheleznodorozhny

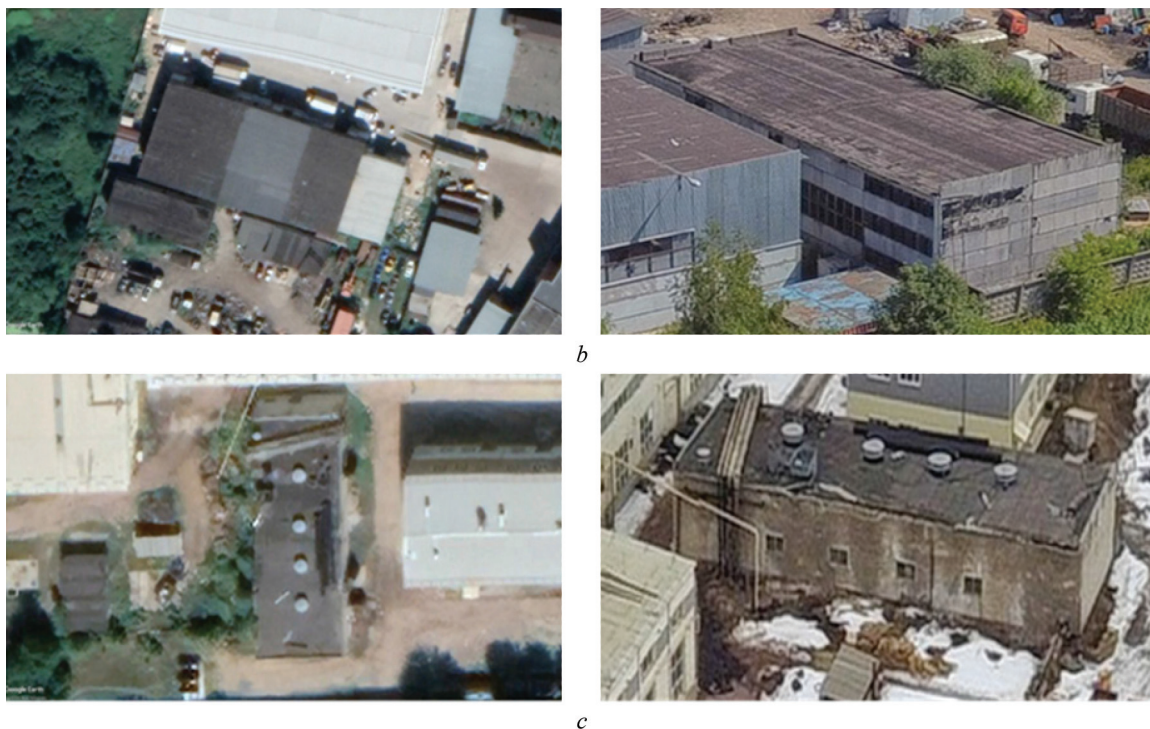


Рис. 9. (окончание) Примеры заброшенных зданий по спутниковым и воздушным панорамным снимкам (Яндекс карты): *b* — Промышленная ул., д. 49, мкр. Саввино; *c* — Советская ул., д. 83, к. 2, мкр. Железнодорожный (≈)

Fig. 9. (ending) Examples of abandoned houses from satellite and aerial panoramic images (Yandex Maps): *b* — Promyshlennaya st., 49, microdistrict Savvino; *c* — Sovetskaya st., 83, k. 2, microdistrict Railway (≈)

Экологический аспект депрессивных строительных объектов

В Арктике находится огромное количество ДСО. Могут «умирать» не только отдельные СО, но и образовываться целые «вымершие» или почти «вымершие» населенные пункты, ставшие жертвами экономической регрессии: заброшенные или исчезнувшие деревни, поселки, агломерации, промышленные зоны, города-призраки. Например, пос. Кадьякчан в Сусуманском районе Магаданской области стал городом-призраком в 2010 г. Территорий с высокой вероятностью возникновения и «размножения» ДСО в Арктическом регионе огромное множество. К ним относятся: 1) зоны высокого риска природных или антропогенных ЧС; 2) периферийные и изолированные населенные пункты, окраины городов; 3) локации временной социально-экономической активности или устойчивого уменьшения этой активности (например, населенные пункты «при» рудниках или закрытых градообразующих предприятиях); 4) дотационные регионы (с зависимой экономикой); 5) ДСО имеют значительный экологический аспект [9].

ДСО являются источником свалок. На рис. 10 отражены основные механизмы образования свалок за счет ДСО. Завал — один из основных видов

свалок, возникающий при обвале СО, в результате сноса, саморазрушения или ЧС.

На рис. 11 приведен пример динамики разрушения (деструкции) небольшого массива СО (г. Норильск, ул. Заводская, железнодорожное депо, юго-восточная окраина). Иллюстрируются в рамках наблюдаемого периода времени спутниковой съемки от $t_{\text{нач}}$ — июнь 2002 г. до $t_{\text{кон}}$ — сентябрь 2022 г. последовательных кадров. На рисунке имеется 10 объектов, которые один за другим разрушаются, например: (2) начал разрушаться после (5); (9) практически не разрушен; (5) и (6) разрушаются практически синхронно. В самый ранний момент наблюдения $t_{\text{нач}}$ объекты (2), (5), (7), (8) уже находились в процессе разрушения, а в самый поздний момент наблюдения $t_{\text{кон}}$ объекты (3) и (9) еще не разрушены. То есть за пределами наблюдения динамика разрушений не видна, но происходит. (2) и (7) разрушаются с более высокой скоростью, чем другие. Конечным состоянием разрушения объекта является свалка (см. объекты (2) и (7) в момент $t_{\text{кон}}$).

ДСО коррелируют с особенностями отношения к землепользованию в нашей стране, представленными определенной системой механизмов поведения.

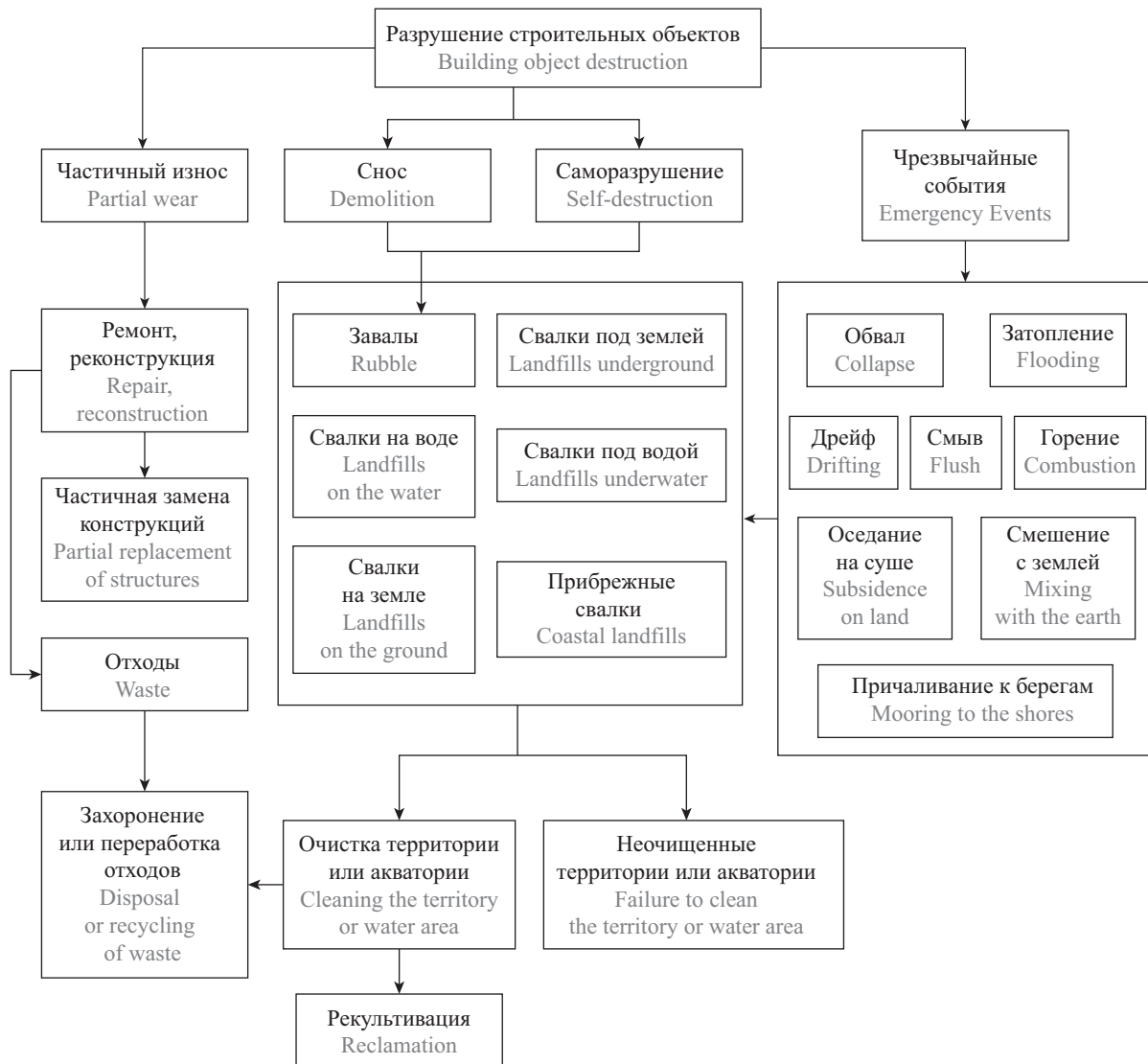


Рис. 10. Механизмы образования свалок от ДСО

Fig. 10. Mechanisms for the formation of landfills from DCO



$t_{\text{нач}} / t_{\text{ин}}$



$t_{\text{кон}} / t_{\text{фин}}$

a

Рис. 11. (начало) Динамика разрушения массива СО: а — на границах наблюдаемого периода с обозначениями объектов 1–10 (Google Earth)

Fig. 11. (starting) The dynamics of the destruction of the CO array: a — at the boundaries of the observed period with designations of objects 1-10 (Google Earth)

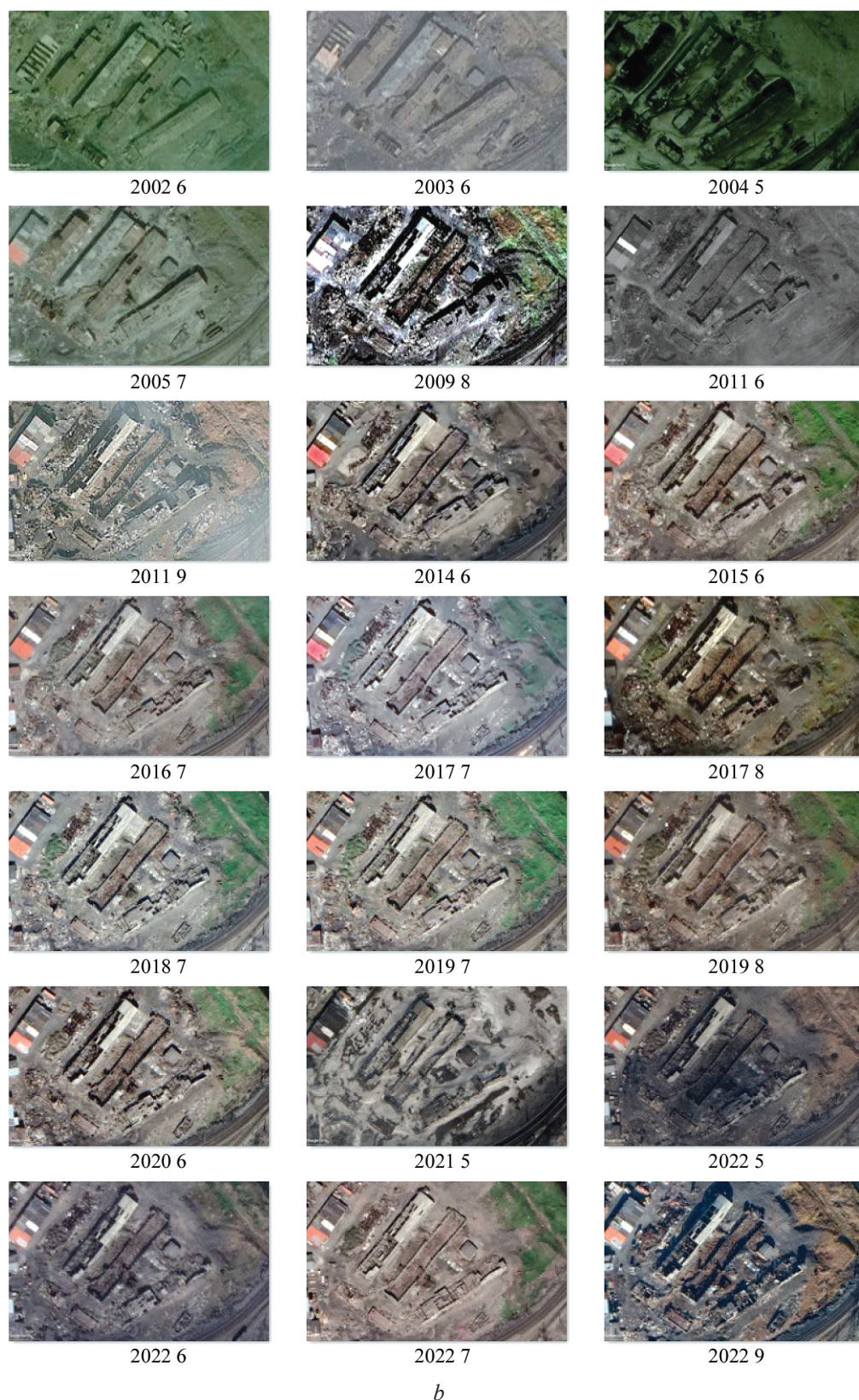


Рис. 11. (окончание) Динамика деструкции массива СО: *b* — раскадровка (названия кадров в формате «год месяц») (Google Earth)

Fig. 11. (ending) The dynamics of the destruction of the CO array: *b* — storyboard (frame names in year-month format) (Google Earth)

Приведем некоторые из этих механизмов поведения:

1. Отстройка «временных» объектов, снос незаконных или якобы незаконных объектов, создание «временных» фирм, контор, снос одних объектов и постройка других. Все это аргументируется порчей городского ландшафта, потребностями в очередных торговых центрах или «человейниках», необходимостью в производствах и т.д.

2. Осваивание новых природных пространств (вырубка леса, расширение кавальеров и т.д.), а также воздвижение новых зданий вместо реконструкции уже существующих в заброшенных зонах.

3. Сохранение заброшенной территории в ее состоянии в течение многих лет, отсутствие каких-либо мер по ее рекультивации или реконструкции. Усугубление неблагоприятной экологической ситуации за счет отсутствия мер по рекультивации заброшенной территории.

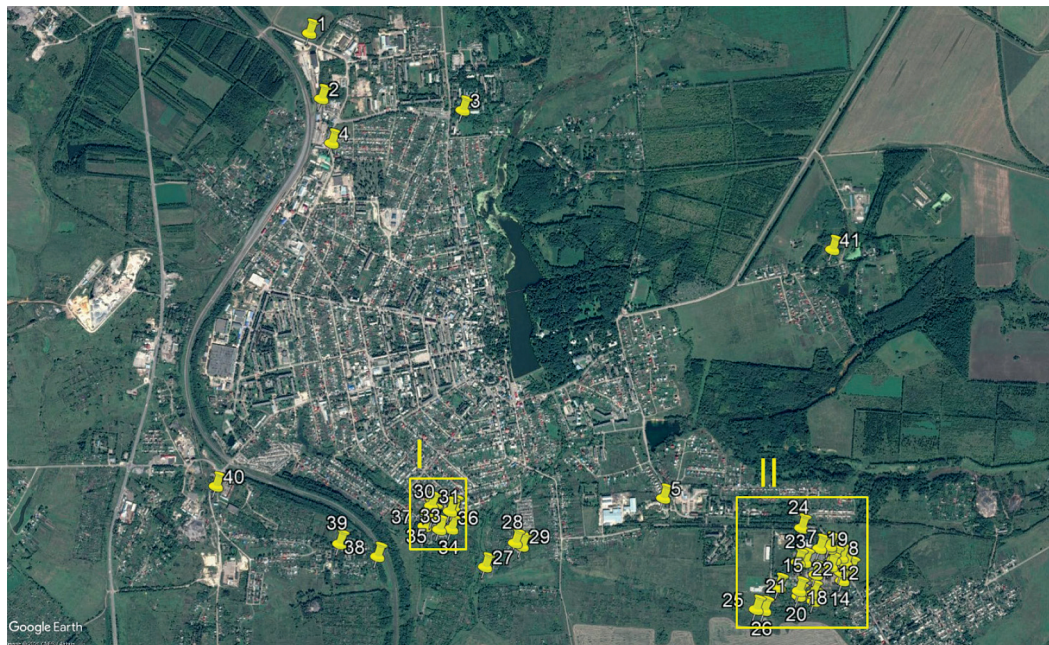
4. Прекращение, заморозка строительства, недоброкачественное строительство новых объектов ввиду невозможности их дофинансирования или афер застройщиков.

Выявление заброшенных зданий в Тульском регионе

Приведем примеры обнаружения заброшенных СО в городах Тульского региона. Исследование показало большое количество заброшенных СО, в частности, в таких городах, как: Богородицк, Косая Гора, Киреевск, Суворов, Товарковский, Новомосковский, Ефремов.

На рис. 12 представлен сценарий 1 — разметка заброшенных СО в г. Богородицк, обнаружен 41 объект.

На рис. 13 приведен сценарий 2 — разметка заброшенных СО в г. Киреевск, обнаружено 82 объекта.



а



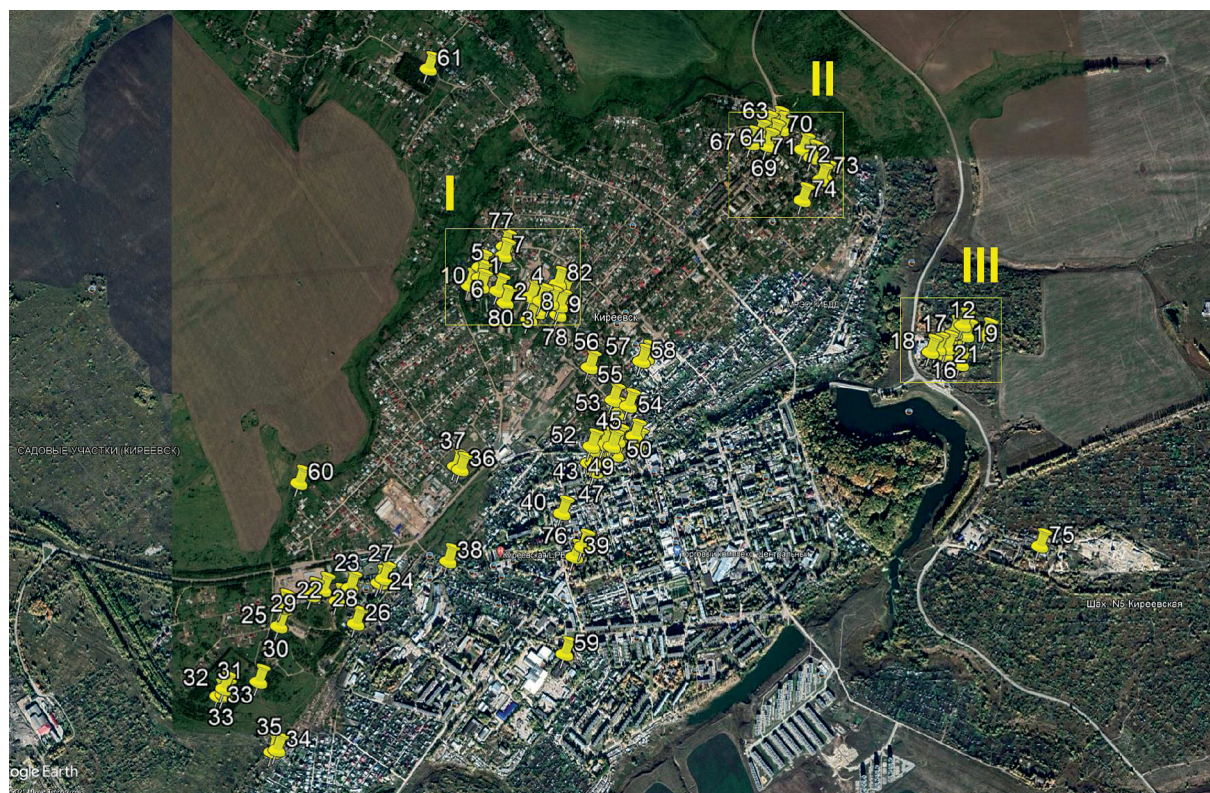
б



с

Рис. 12. Разметка заброшенных СО: а — общий вид; б — фрагмент I; с — фрагмент II (г. Богородицк, Тульская область) (Google карты)

Fig. 12. Marking of abandoned COs: а — general view; б — Fragment I; с — Fragment II (Bogoroditsk, Tula Region) (Google Maps)



а



b



с

Рис. 13. Разметка заброшенных СО: а — общий вид; б — фрагмент I; с — фрагмент II (г. Киреевск, Тульская область) (Google-карты)

Fig. 13. Marking of abandoned COs: a — general view; b — Fragment I; c — Fragment II (Kireevsk, Tula Region) (Google Maps)

На рис. 14 приведен сценарий 3 — пример промзоны Косогорского металлургического завода, пос. Косая Гора, г. Тула, «населенной» огромным количеством заброшенных СО (только на представленном участке территории завода обнаружено 38 объектов), включающих в высокой плотности ржавеющие металлические сооружения.

На рис. 12–14 показаны фрагменты I–III — кластеры (агломерации) заброшенных объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результатами на данный момент являются определение наборов дешифровочных признаков

различных классов ДСО, установление состояния окружающей среды, картографирование ДСО на множестве областей интереса, не только Арктического региона, рекомендации по проведению дешифрирования ДСО, их параметризации и оценки влияния на окружающую среду (экологического, экономического и социального). Для применения комплексного визуального подхода нет необходимости в обладании специальными компьютерными навыками, используются открытые ресурсы, таким образом обеспечивая широкую аудиторию неравнодушных к состоянию природной и городской среды.



Рис. 14. Разметка заброшенных СО: *a* — общий вид; *b* — фрагмент I; *c* — фрагмент II (Косогорский металлургический завод, пос. Косая Гора, г. Тула) (Google карты)

Fig. 14. Marking of abandoned COs (Kosogorsky metallurgical plant, Kosaya Gora settlement, Tula): *a* — general view; *b* — fragment I; *c* — fragment II (Kosogorsky Metallurgical Plant, village Oblique Mountain, Tula) (Google-maps)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан метод визуального дешифрирования недостроенных, аварийных, поврежденных и заброшенных строительных объектов.

С учетом экономической регрессии, дотационного характера огромных территорий России проблема депрессивных строительных объектов в нашей стране актуальна как никогда, и в частности, в арктическом регионе. В России огромное количество заброшенных строительных объектов (зданий, сооружений, строений), среди которых: электрические подстанции, гидростанции, радиотелескопы,

башни и градирни, мосты и железнодорожные колеи и т.д. Среди заброшенных объектов и территорий можно встретить в прошлом промышленно значимые объекты.

Возможность дешифрирования депрессивных строительных объектов по данным аэрокосмического мониторинга позволяет в масштабе страны и планеты в целом проводить их кадастровый учет, картографирование и систематизацию, оценивать количественные и качественные характеристики этих объектов и депрессивности исследуемых регионов, что является важной задачей экологического мониторинга.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Казарян М.Л., Рихтер А.А., Шахрамьян М.А., Недков Р. Космический мониторинг объектов захоронения твердых бытовых отходов и промышленных отходов (ТБО и ПО): теоретико-методические и социально-экономические аспекты : монография. М. : НИЦ ИНФРА-М, 2019. 278 с. DOI: 10.12737/monography_5c4efa771779a4.89852001. EDN ZAIMOL.
2. Рязанова Н.Е., Сорокин П.А. Опыт применения дистанционного зондирования растительности при исследовании динамики экосистем российской Арктики // Науки о земле: вчера, сегодня, завтра : мат. III Междунар. науч. конф. 2017. С. 7–12. EDN ZBJMLL.
3. Заров Е.А. Исследование Арктики из космоса // GoArctic. 2018. URL: <https://goarctic.ru/news/issledovanie-arktiki-iz-kosmosa/>
4. Morckel V.C. Spatial characteristics of housing abandonment // Applied Geography. 2014. Vol. 48. Pp. 8–16. DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.01.001
5. Zou S., Wang L. Detecting individual abandoned houses from google street view: A hierarchical deep learning approach // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2021. Vol. 175. Pp. 298–310. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.03.020
6. Zou S., Wang L. Mapping individual abandoned houses across cities by integrating VHR remote sensing and street view imagery // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. Vol. 113. P. 103018. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103018
7. Fiorillo F., Perfetti L., Cardani G. Automated Mapping of the roof damage in historic buildings in seismic areas with UAV photogrammetry // Procedia Structural Integrity. 2023. Vol. 44. Pp. 1672–1679. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.01.214
8. Fiorillo F., Cardani G., Balin S. Scan-to-NBIM: integrated survey and information modelling for the documentation of structural damage // DENNE. 2022.
9. Рихтер А.А., Шахрамьян М.А. Направления проектных работ в области космического экологического мониторинга и трехмерного моделирования : монография. М. : ИНФРА-М, 2022. 277 с. DOI: 10.12737/1858257
10. Kazaryan M., Shakhramanyan M., Richter A., Getsov P., Gramatikov P. Global system for space monitoring of environmental littering // Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences. 2022. Vol. 75. Issue 7. Pp. 1028–1036. DOI: 10.7546/CRABS.2022.07.11
11. Mason D.C., Dance S.L., Cloke H.L. Floodwater detection in urban areas using Sentinel-1 and WorldDEM data // Journal of Applied Remote Sensing. 2021. Vol. 15. Issue 3. DOI: 10.1117/1.JRS.15.032003
12. Gao Y., Gao M., Damdinsuren B., Dorjsuren M. Early drought warning based on chlorophyll fluorescence and normalized difference vegetation index in Xilingol League of China // Journal of Applied Remote Sensing. 2021. Vol. 15. Issue 3. DOI: 10.1117/1.JRS.15.032006
13. Lung H., Huang A., Goldberg M. Special section guest editorial: satellite remote sensing for disaster monitoring and risk assessment, management, and mitigation // Journal of Applied Remote Sensing. 2021. Vol. 15. Issue 3. DOI: 10.1117/1.JRS.15.032001
14. Meddeber L., Zouagui T., Berrached N. Efficient photometric and geometric stitching approach for remote sensing images based on wavelet transform and local invariant // Journal of Applied Remote Sensing. 2021. Vol. 15. Issue 3. DOI: 10.1117/1.JRS.15.034502
15. Akhavan Z., Hasanlou M., Hosseini M., Becker-Reshef I. Soil moisture retrieval improvement over agricultural fields by adding entropy–alpha dual-polarimetric decomposition features // Journal of Applied Remote Sensing. 2021. Vol. 15. Issue 3. DOI: 10.1117/1.JRS.15.034516
16. Cai R., Shang G. Flexible 3-D Gabor features fusion for hyperspectral imagery classification // Journal of Applied Remote Sensing. 2021. Vol. 15. Issue 3. DOI: 10.1117/1.JRS.15.036508
17. Massout S., Smara Y. Panchromatic and multispectral image fusion using the spatial frequency and the à trous wavelet transform // Journal of Applied Remote Sensing. 2021. Vol. 15. Issue 3. DOI: 10.1117/1.JRS.15.036510
18. Шантала В.Г., Радоуцкий В.Ю., Шантала В.В. Основы моделирования чрезвычайных ситуаций : учебное пособие. Белгород : БГТУ, 2010. 165 с. EDN QKJYVJ.

Поступила в редакцию 11 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 23 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 31 октября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Маретта Леоновна Казарян** — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры химии и физики; **Северо-Осетинская государственная медицинская академия (СОГМА)**; 362019, Республика Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ, ул. Пушкинская, д. 40; Scopus: 54782632100, ORCID: 0000-0001-9728-7818; marettak@bk.ru;

Андрей Александрович Рихтер — кандидат технических наук, научный сотрудник; Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС» (НИИ «АЭРОКОСМОС»); 105064, г. Москва, Гороховский пер., д. 4; Scopus: 57020744500, ORCID: 0000-0001-9728-7818; urfin17@yandex.ru;

Михаил Андраникович Шахрамьян — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасность жизнедеятельности; Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет); 125167, г. Москва, пр-т Ленинградский, д. 49/2; Государственный университет просвещения (ГУП); 141014, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24; Scopus: 57193489919, ORCID: 0000-0001-9728-7818; 7283763@mail.ru;

Сергей Михайлович Григорьев — кандидат военных наук, доцент, доцент кафедры безопасность жизнедеятельности; Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет); 125167, г. Москва, пр-т Ленинградский, д. 49/2; Scopus: 57226469332; sgrigorev@fa.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kazaryan M.L., Rikhter A., Shakhramanyan M., Nedkov R. *Monitoring and forecasting of socio-economic development of regions based on the analysis of satellite images (for example, solid waste disposal facilities and their impact on the environment)*. Moscow, SIC INFRA-M Publ., 2019; 278. DOI: 10.12737/monography_5c4efa771779a4.89852001. EDN ZAIMOL. (rus.).
2. Ryazanova N.E., Sorokin P.A. Experience in using remote sensing of vegetation in studying the dynamics of ecosystems in the Russian Arctic. *Geosciences: yesterday, today, tomorrow : materials of the III International Scientific Conference*. 2017; 7-12. EDN ZBJMLL. (rus.).
3. Zarov E.A. Exploring the Arctic from space. *GoArctic*. 2018. URL: <https://goarctic.ru/news/issledovanie-arktiki-iz-kosmosa/> (rus.).
4. Morckel V.C. Spatial characteristics of housing abandonment. *Applied Geography*. 2014; 48:8-16. DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.01.001
5. Zou S., Wang L. Detecting individual abandoned houses from google street view: A hierarchical deep learning approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2021; 175:298-310. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.03.020
6. Zou S., Wang L. Mapping individual abandoned houses across cities by integrating VHR remote sensing and street view imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022; 113:103018. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103018
7. Fiorillo F., Perfetti L., Cardani G. Automated Mapping of the roof damage in historic buildings in seismic areas with UAV photogrammetry. *Procedia Structural Integrity*. 2023; 44:1672-1679. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.01.214
8. Fiorillo F., Cardani G., Balin S. Scan-to-HBIM: integrated survey and information modelling for the documentation of structural damage. *DENNE*. 2022.
9. Richter A.A., Shakhramanyan M.A. *Directions of design work in the field of space environmental monitoring and three-dimensional modeling : monograph*. Moscow, INFRA-M Publ., 2022; 277. DOI: 10.12737/1858257 (rus.).
10. Kazaryan M., Shakhramanyan M., Richter A., Getsov P., Gramatikov P. Global system for space monitoring of environmental littering. *Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences*. 2022; 75(7):1028-1036. DOI: 10.7546/CRABS.2022.07.11
11. Mason D.C., Dance S.L., Cloke H.L. Floodwater detection in urban areas using Sentinel-1 and WorldDEM data. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2021; 15(3). DOI: 10.1117/1.JRS.15.032003
12. Gao Y., Gao M., Damdinsuren B., Dorjsuren M. Early drought warning based on chlorophyll fluorescence and normalized difference vegetation index in Xilingol League of China. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2021; 15(3). DOI: 10.1117/1.JRS.15.032006
13. Lung H., Huang A., Goldberg M. Special Section Guest Editorial: Satellite Remote Sensing for Disaster Monitoring and Risk Assessment, Management, and Mitigation. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2021; 15(3). DOI: 10.1117/1.JRS.15.032001
14. Meddeber L., Zouagui T., Berrached N. Efficient photometric and geometric stitching approach for remote sensing images based on wavelet transform and local invariant. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2021; 15(3). DOI: 10.1117/1.JRS.15.034502
15. Akhavan Z., Hasanlou M., Hosseini M., Becker-Reshef I. Soil moisture retrieval improvement over agricultural fields by adding entropy-alpha dual-polarimetric decomposition features. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2021; 15(3). DOI: 10.1117/1.JRS.15.034516
16. Cai R., Shang G. Flexible 3-D Gabor features fusion for hyperspectral imagery classification. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2021; 15(3). DOI: 10.1117/1.JRS.15.036508

17. Massout S., Smara Y. Panchromatic and multispectral image fusion using the spatial frequency and the à trous wavelet transform. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2021; 15(3). DOI: 10.1117/1.JRS.15.036510

18. Shaptala V.G., Radoutsky V.Yu., Shaptala V.V. *Fundamentals of modeling emergency situations: tutorial*. Belgorod, BSTU, 2010; 165. EDN QKJYVJ. (rus.)

Received October 11, 2023.

Adopted in revised form on October 23, 2023.

Approved for publication on October 31, 2023.

Bionotes: **Marettak L. Kazaryan** — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry and Physics; **North-Ossetian State Medical Academy (SOGMA)**; 40 Pushkinskaya st., Republic of North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, 362019, Russian Federation; Scopus: 54782632100, ORCID: 0000-0001-9728-7818; marettak@bk.ru;

Andrey A. Richter — Candidate of Technical Sciences, Researcher; **Aerospace Monitoring Research Institute "AEROSPACE"**; 4 Gorokhovskiy lane, Moscow, 105064, Russian Federation; Scopus: 57020744500, ORCID: 0000-0001-9728-7818; urfin17@yandex.ru;

Mikhail A. Shakhramanyan — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Life Safety; **Financial University under the Government of the Russian Federation**; 49/2 Leningradsky Ave., Moscow, 125167, Russian Federation; **State University of Enlightenment (SUE)**; 24 Vera Voloshina st., Mytishchi, 141014, Russian Federation; Scopus: 57193489919, ORCID: 0000-0001-9728-7818; 7283763@mail.ru;

Sergey M. Grigoriev — Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Life Safety; **Financial University under the Government of the Russian Federation**; 49/2 Leningradsky Ave., Moscow, 125167, Russian Federation; Scopus: 57226469332; sgrigorev@fa.ru.

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

Authors declare that there is no conflict of interest.

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 556.046:556.166.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1957-1965

Сравнение способов определения слоя суточных осадков для расчета максимальных расходов дождевых паводков (на примере Калининградской области)

Владимир Аркадьевич Наумов, Наталья Равиловна Ахмедова

Калининградский государственный технический университет (КГТУ); г. Калининград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для подготовки документов территориального планирования при проектировании и строительстве следует учитывать требования организации безопасной среды жизнедеятельности, оценивать риски проявления негативного воздействия поверхностных вод, в том числе возможность затопления территории застройки. С этой целью выполняют инженерно-гидрометеорологические изыскания, определяют максимальные расчетные расходы и уровни воды в ближайших водных объектах. При проведении гидрологических расчетов важная роль отводится количественным показателям осадков, в том числе максимальным суточным осадкам. Рассмотрен способ повышения точности моделирования максимального суточного слоя ливневых осадков на примере метеостанций Калининградской области.

Материалы и методы. В среде MathCAD обработаны массивы данных результатов наблюдений за осадками по четырём метеостанциям: Советск (26614), Балтийск (26701), Калининград (26702), Железнодорожный (26706). Основным источником результатов наблюдений — специализированные массивы данных для климатических исследований за период 1977–2021 гг.

Результаты. Определены значимая стохастическая связь между суммами годовых осадков для указанных метеостанций и слабая — между максимальными за год значениями 24-часовых сумм осадков. Рассчитаны числовые параметры рядов максимальных сумм осадков на четырех метеостанциях Калининградской области за 1977–2021 гг. Вычислено относительное превышение значений максимальных 24-часовых сумм осадков над значениями максимальных суточных сумм по метеостанциям Советск, Балтийск, Калининград, Железнодорожный.

Выводы. Установлено, что с помощью 8-срочных наблюдений за осадками можно повысить точность расчета максимальных сумм суточных (24-часовых) осадков. Полученные результаты могут быть использованы при анализе осадков и расчете максимальных расходов дождевых паводков на реках с площадью водосбора менее 200 км².

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инженерные изыскания для строительства, максимальный расход дождевых паводков, максимальный суточный слой осадков, суточные суммы осадков, Калининградская область, статистические параметры, метеорологические сутки, гидрологические расчеты

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. Сравнение способов определения слоя суточных осадков для расчета максимальных расходов дождевых паводков (на примере Калининградской области) // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1957–1965. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1957-1965

Автор, ответственный за переписку: Наталья Равиловна Ахмедова, isfendi@mail.ru.

Comparison of methods for determining the layer of daily precipitation for calculation of the maximum expenses of rain floods (on the example of the Kaliningrad region)

Vladimir A. Naumov, Natal'ya R. Ahmedova

Kaliningrad State Technical University (KSTU); Kaliningrad, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. To prepare territorial planning documents, during design and construction it is necessary to take into account the requirements for organizing a safe living environment, assess the risks of negative impact of surface waters, including the possibility of flooding of the development area. For this purpose, engineering and hydrometeorological surveys are carried out, the maximum estimated flow rates and water levels in the nearest water bodies are determined. When performing hydrological calculations, an important role is given to quantitative indicators of precipitation, including maximum daily pre-

precipitation. The article considers a method of increasing the accuracy of modelling the maximum daily rainfall on the example of meteorological stations in the Kaliningrad region.

Materials and methods. Data arrays of the results of precipitation observations at four weather stations — Sovetsk (26614), Baltiysk (26701), Kaliningrad (26702), Zheleznodorozhny (26706) were processed in Mathcad. The main source of observational results is specialized datasets for climate research for the period from 1977 to 2021.

Results. A significant stochastic relationship between the annual precipitation amounts for the indicated meteorological stations and a weak one between the maximum values of 24-hour precipitation amounts for the year were determined. Numerical parameters of the series of maximum precipitation amounts at four meteorological stations in the Kaliningrad region for 1977–2021 years are calculated. The relative excess of the values of the maximum 24-hour precipitation over the values of the maximum daily amounts at the weather stations Sovetsk, Baltiysk, Kaliningrad, Zheleznodorozhny was calculated.

Conclusions. It has been established that with the help of 8-term observations of precipitation, it is possible to increase the accuracy of calculation of the maximum amounts of daily (24-hour) precipitation. The results obtained can be used in the analysis of precipitation and calculation of the maximum discharges of rain floods on rivers with a catchment area of less than 200 km².

KEYWORDS: engineering surveys for construction, maximum flow of rain floods, maximum daily precipitation layer, daily sums of precipitation, Kaliningrad region, statistical parameters, meteorological days, hydrological calculations

Acknowledgements. The work was supported financially by the Russian Science Foundation and the Government of the Kaliningrad region within the framework of scientific project No. 22-27-20016.

FOR CITATION: Naumov V.A., Ahmedova N.R. Comparison of methods for determining the layer of daily precipitation for calculation of the maximum expenses of rain floods (on the example of the Kaliningrad region). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1957-1965. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1957-1965 (rus.).

Corresponding author: Natal'ya R. Ahmedova, isfendi@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наметился сдвиг в методологии оценок гидрологических последствий прогнозируемого изменения климата — от расчетов с помощью моделей климата к расчетам с применением региональных гидрологических моделей (РГМ) [1–5]. В работе [1] констатируется, что РГМ позволяют рассчитать характеристики водного режима рек за исторический период точнее и оценивать их возможные изменения в будущем с меньшей неопределенностью, чем модели климата.

Например, в схеме комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО)¹ с опорой на данные наблюдений до 2009 г. и модели климата утверждается, что водность рек Калининградской области (КО) в ближайшие 10–20 лет возрастет от 9 до 12 %. Но результаты наблюдений последних 10 лет и расчет по РГМ показали уменьшение среднегодовых расходов рек КО на фоне увеличения осадков и суммарного испарения [6]. Был дан прогноз: в ближайшей перспективе при сохранении существующей тенденции изменения климата среднегодовые расходы рек КО могут незначительно уменьшиться, при этом возможно заметное изменение внутригодового распределения стока [7]. Так, исторический максимум расхода воды в р. Преголе (возле г. Гвардейска КО) 849 м³/с был зафиксирован не в период весеннего половодья, а во время годового паводка (01.11.2017).

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 бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов от 09.12.2014 № 171.

В РГМ важную роль играет корректный учет осадков, определение максимального (за год) суточного слоя ливневых осадков (МССО) H_c является востребованным в инженерной гидрологии. В соответствии с действующим СП 33-101-2003 величина максимального суточного слоя ливневых осадков вероятностью превышения $P = 1\%$ ($H_{c1\%}$) необходима для расчета стока дождевых паводков с малых водосборов. Малыми водосборами, для которых возможно применение формулы предельной интенсивности (формула III типа)², являются такие, площадь которых ограничена величиной в 200 км² для всех природных зон.

Проблеме подбора закона распределения, адекватно описывающего статистику МССО, посвящено большое количество исследований [8–17]. Применение классических методов моделирования ММСО, использующих асимптотическое распределение экстремальных значений, подробно проанализировано в обзоре [11]. Фишер и Типпет, а позже Гнеденко показали, что асимптотически существуют только три типа распределений экстремальных значений — распределение Гумбеля (EVI), распределение Фреше (EVII) и обратное распределение Вейбулла (EVIII). Эти три асимптотических распределения были объединены фон Мизесом в обобщенное распределение экстремальных значений (GEV).

Первыми исследованиями, в которых асимптотические распределения экстремальных значений использовались для моделирования появления максимальных годовых суточных осадков, были исследования Дженкинсона, а затем Гумбеля. Главное

² СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М. : Госстрой России, 2004. 74 с.

преимущество асимптотических законов заключается в том, что они не требуют знания распределения генеральной совокупности. Распределение Гумбеля (EVI) было самой популярной моделью для экстремальных значений, особенно при анализе максимумов осадков. Однако было обнаружено, что распределение Гумбеля недооценивает экстремальные количества осадков, и высказано предположение, что GEV всегда следует использовать вместо распределения Гумбеля, если только не имеется достаточной информации, подтверждающей последнее [10].

В ряде работ изучалось, какой из этих трех асимптотических законов наиболее подходит для представления статистической изменчивости МССО. В публикации [16], используя всемирную базу данных, было показано, что EVII является наиболее подходящим асимптотическим распределением для описания МССО. Применимость теории асимптотических экстремальных значений к годовым максимумам осадков, как для суточных, так и для более коротких периодов, была поставлена под сомнение в труде [17]. Причиной является сравнительно медленная сходимости распределения годовых максимумов к асимптотическим законам. Следовательно, годовые МССО зависят от диапазона распределения генеральной совокупности, который значительно ниже его верхнего предела. Результаты показывают, что асимптотические законы часто не обеспечивают наилучшего соответствия статистическим показателям. Распределение GEV, конечно, можно использовать для определения экстремальных количеств осадков аналогично использованию любого другого распределения вероятностей. В этом случае, однако, следует иметь в виду, что оценка параметров GEV не будет иметь прямой связи со статистическими свойствами генеральной совокупности.

Другой подход к моделированию МССО связан с применением канонических законов распределения (экспоненциального, логарифмически нормального, гамма-распределения и других) к исходному массиву наблюдений за осадками. В работе [11] такие методы называют точными (exact). Хотя речь идет лишь о повышении точности моделей на основе канонических законов распределения. В то время как асимптотические распределения привлекательны для использования, поскольку они не требуют информации о нижележащем процессе, результаты нескольких авторов показывают, что их прогнозы менее надежны, чем точные, за пределами наблюдаемых значений потому, что последние включают информацию обо всех событиях выпадения осадков, а не только о максимумах [11]. Однако такое усложнение моделей не всегда приемлемо с точки зрения применения к задачам инженерной гидрологии.

В данной статье авторы остановились на достаточно простом способе повышения точности моделирования МССО. Во всех нормативных документах

и утвержденных рекомендациях МССО определяется в каждом году из массива наблюдений за метеорологические (календарные) сутки. Но в публикации [18] было показано, что такой подход может привести к заметному занижению значений максимальных сумм осадков. Например, в СП³ по метеостанциям (МС) Калининграда приводится наибольшее значение МССО за период наблюдений (1966–2018) — 118 мм, оно было зафиксировано 10.08.2005. Тогда как за 24 ч с 18:00 (здесь и далее сроки наблюдений приводятся по Гринвичу) 09.08.2005 в Калининграде выпало осадков 138,5 мм.

В настоящее время сложилась практика, при которой сумму суточных осадков фиксируют по метеорологическим суткам. Так, в Северо-Западном управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, включая КО, граница метеорологических суток установлена 18:00 по Всемирному скоординированному времени. Физический смысл использования суточного слоя осадков в расчетах неявно предполагает сумму осадков за 24 ч вне зависимости от начала отсчета указанного периода. Далее будем использовать понятия 24-часовая сумма осадков R_{24} и максимальное за год значение 24-часовых сумм осадков H_{24} , в отличие от календарных суточных, соответственно, R_c и H_c .

В работе [18] был предложен метод компьютерной обработки результатов 8-срочных наблюдений за осадками, который позволяет избежать ошибок, подобных приведенной выше.

Цель исследования — на примере метеостанций КО сравнить максимальные суточные и 24-часовые суммы осадков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовано изменение суммы годовых осадков в Кенигсберге/Калининграде за полтора века наблюдений. Источниками послужили монография [19] (до 1948 г.) и специализированные массивы данных для климатических исследований⁴ (1948–2022). Ряд сумм годовых осадков не является однородным. С середины XIX в. наблюдался заметный рост количества осадков, но параболический тренд показывает, что этот рост замедлялся, а концу 70-х годов прошлого века практически прекратился. Мало того, после многоводного 2017 г. последовало подряд 5 лет меньшей водности. Кроме климатических изменений, на такую разницу могли повлиять заниженные результаты наблюдений за осадками в предыдущий период из-за отсутствия учета потерь осадкомеров.

³ СП 131.13330.2020. Строительная климатология. М. : Стандартинформ, 2020. 150 с.

⁴ ФГБУ ВНИИ гидрометеорологической информации. Специализированные массивы данных для климатических исследований.

Базовые массивы данных по основным метеорологическим элементам (измеряемые каждые 3 ч) можно получить в электронной форме на интернет-ресурсе. ФГБУ ВНИИ гидрометеорологической информации в рамках реализации концепции глобальной рамочной основы для климатического обслуживания обеспечено функционирование открытого полноценного доступа к специализированным климатическим массивам данных. Массив данных «8-срочные наблюдения на станциях» содержит метеорологические элементы по большому количеству МС России.

Наземная наблюдательная сеть Калининградского Центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды состоит из семи МС. В базе есть данные по четырем станциям (табл. 1).

Если исключить годы с большими пробелами в результатах наблюдений, то по четырем МС можно воспользоваться массивами с данными по осадкам на четырех указанных в табл. 1 станциях с 1977 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 2 приведены рассчитанные значения коэффициентов парной корреляции (КПК) между H_{24} на разных станциях (выше главной диагонали). Ниже главной диагонали для сравнения приведены значения КПК между суммами годовых осадков.

Стохастическую связь между суммами годовых осадков можно считать значимой. Например, КПК Калининград – Советск равен 0,775. Стохастическая

связь между H_{24} метеостанций КО области слабая, нередко она практически отсутствует. Поэтому характеристики максимальных сумм осадков нужно рассчитывать отдельно по каждой станции. При анализе максимальных суточных и 24-часовых сумм осадков в Калининграде и Железнодорожном выяснилось, что за многие годы величина H_{24} заметно превышала H_C . Наибольшее различие между этими величинами на МС Железнодорожный (на 85 %) было зафиксировано в 1987 г. Рассмотрим этот случай подробнее.

На рис. 1, а показаны 3-часовые суммы осадков МС Железнодорожный в июне 1987 г. По применяемой методике фиксируется сумма осадков за метеорологические сутки, поэтому наибольшее значение 1987 г. получилось 6 июня $H_C = 23,9$ мм. Если начать отсчет с 9, 12 или 15 ч 05.06.1997, то за 24 ч получим наибольшую величину $H_{24} = 44,3$ мм (рис. 1, б), так как в указанный период попадают осадки за время с 15 до 21 ч 5 июня.

Не следует думать, что это уникальное явление, характерное лишь для КО. В СП⁵ для МС Мурманск приведено значение $H_C = 58$ мм, зафиксированное в 1977 г. Анализ результатов 8-срочных наблюдений за осадками указанной МС дал значение $H_{24} = 66,7$ мм в 2007 г.

Далее будем рассматривать ряды максимальных сумм суточных и 24-часовых осадков МС КО

⁵ СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Издание официальное. М. : Стандартинформ, 2020. 150 с.

Табл. 1. Метеостанции Калининградской области⁴

Table 1. Weather stations of the Kaliningrad region⁴

Номер метеостанции Weather station number	Название Name	Координаты Coordinates	Имеются результаты наблюдений за осадками There are results of observations of precipitation	
			Суточные Daily rainfall	8-срочные 8 urgent
26614	Советск Sovetsk	55.08 с. ш. 21.93 в. д. 55.08 p. w. 21.93 c. d.	с 1947 г. / since 1947	с 1977 г. / since 1977
26701	Балтийск Baltiysk	54.65 с. ш. 19.90 в. д. 54.65 p. w. 19.90 c. d.	с 1960 г. / since 1960	с 1966 г. / since 1966
26702	Калининград Kaliningrad	54.72 с. ш. 20.62 в. д. 54.72 p. w. 20.62 c. d.	с 1947 г. / since 1947	с 1966 г. / since 1966
26706	Железнодорожный Zheleznodorozhny	54.38 с. ш. 21.30 в. д. 54.38 p. w. 21.30 c. d.	с 1977 г. / since 1977	с 1977 г. / since 1977

Табл. 2. Коэффициенты парной корреляции между суммами осадков (1977–2021)

Table 2. Pair correlation coefficients between precipitation totals (1977–2021)

Метеостанция Weather station	Советск Sovetsk	Балтийск Baltiysk	Калининград Kaliningrad	Железнодорожный Zheleznodorozhny
Советск / Sovetsk	1	0,214	0,378	0,437
Балтийск / Baltiysk	0,423	1	0,286	–0,036
Калининград / Kaliningrad	0,775	0,635	1	0,322
Железнодорожный / Zheleznodorozhny	0,750	0,344	0,698	1

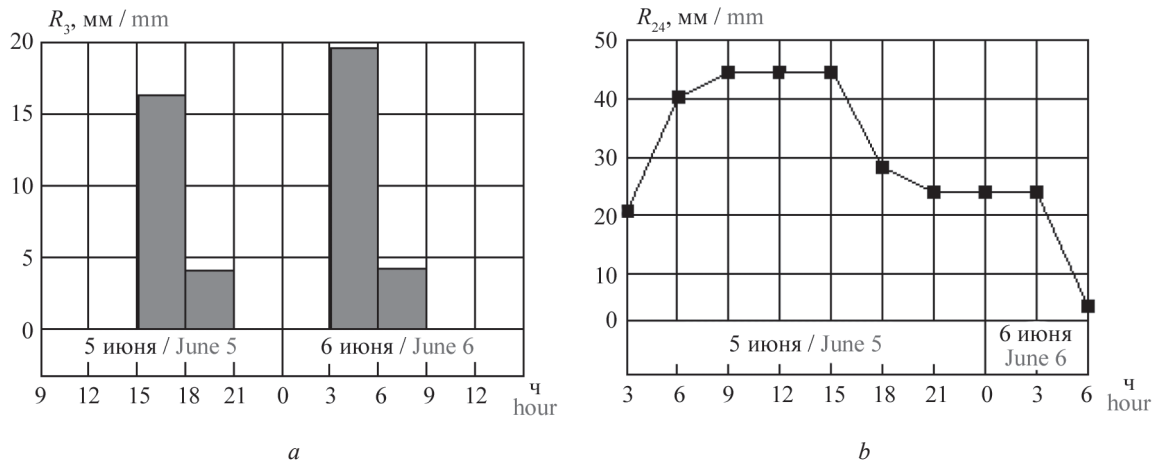


Рис. 1. Суммы осадков 5, 6 июня 1987 г. (МС Железнодорожный): *a* — 8-срочные (3-часовые); *b* — 24-часовые
Fig. 1. Precipitation sums on June 5, 6, 1987 (Zheleznodorozhny): *a* — 8 urgent (3-hour); *b* — 24-hour

за 45 лет наблюдений (1977–2021). Линейный тренд по МС Советск и Железнодорожный получился слабо возрастающим, МС Балтийск — убывающим, МС Калининград — практически совпадает со средним значением. Проверка по критериям Фишера и Стьюдента показала, что все эти ряды можно считать однородными при уровне значимости 0,05.

Как известно, аналитическая кривая обеспеченности характеризуется тремя стандартными статистическими параметрами: средним значением H_s , коэффициентом вариации C_v , коэффициентом асимметрии C_s , которые рассчитываются по известным формулам:

$$H_s = \Sigma H_i / n; \quad (1)$$

$$C_v = \frac{(\Sigma (H_i / H_s - 1)^2)}{(n - 1)^{0.5}}; \quad (2)$$

$$C_s = n \Sigma \frac{(H_i / H_s - 1)^3}{((n - 1) \cdot (n - 2) \cdot C_v^3)}, \quad (3)$$

где H_i — МССО в i -м году, мм; n — длина ряда наблюдений (в рассматриваемом случае $n = 45$).

Наибольшая разница числовых параметров рядов H_s и H_{24} получилась по МС Балтийск. Для максимальных сумм осадков МС Балтийск наиболее подходящим теоретическим распределением оказалось трехпараметрическое гамма-распределение (Крицкого – Менкеля) с плотностью вероятности:

$$f_r(k) := \frac{1}{b \cdot \Gamma(a)} \cdot \left(\frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)} \right)^{a/b} \times \\ \times k^{a/b-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)} \cdot k \right)^{1/b} \right], \quad (4)$$

где $k = H_i / H_s$ — модульный коэффициент; Γ — гамма-функция, a , b — параметры распределения, найденные методом наибольшего правдоподобия, путем решения численным методом системы уравнений (6), (5) из работы [20]:

$$\lambda_2 + \ln \left(\frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)} \right) - \frac{b}{\Gamma(a)} \times \\ \times \left(\int_0^\infty t^{a-1} \cdot \ln(t) \cdot \exp(-t) dt \right) = 0 \quad (5)$$

$$a \cdot \lambda_2 - \left(\frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)} \right)^{1/b} \times \\ \times \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \left[\ln(k_i) \cdot (k_i)^{1/b} \right] \right] + b = 0, \quad (6)$$

где вспомогательный параметр рассчитывается по формуле (7):

$$\lambda_2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \ln(k_i). \quad (7)$$

По рис. 2 теоретические кривые хорошо согласуются с данными наблюдений, видно насколько кривая H_{24} проходит выше, чем H_s .

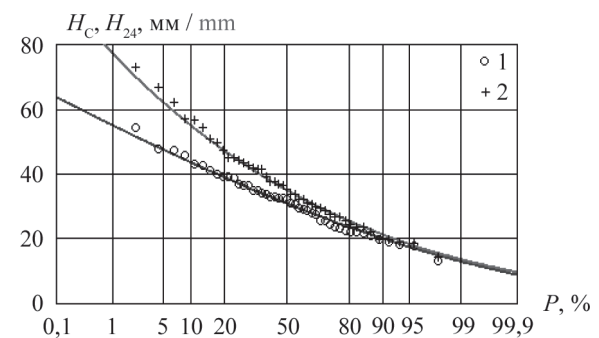


Рис. 2. Кривые обеспеченности максимальных сумм осадков (МС Балтийск), 1977–2021: точки — эмпирические; 1 — суточные; 2 — 24-часовые; линии — теоретические (Крицкого – Менкеля)

Fig. 2. Probability curves for maximum precipitation amounts (Baltiysk), 1977–2021: points — empirical; 1 — daily; 2 — 24-hour; lines — theoretical (Kritsky – Menkel)

Наименьшая разница числовых параметров рядов H_c и H_{24} получилась по МС Железнодорожный. Для максимальных сумм осадков МС Железнодорожный наиболее подходящим теоретическим распределением оказалось непрерывное биномиальное распределение (Пирсона III типа):

$$f_p(k) = \begin{cases} \frac{\exp(-\beta(k-k_{\min})) \cdot \beta^\alpha (k-k_{\min})^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} & \text{при } k \geq k_{\min} \\ 0 & \text{при } k < k_{\min}, \end{cases} \quad (8)$$

где параметры распределения в выражении (6) были рассчитаны по формулам, приведенным в труде [21]:

$$\alpha = \left(\frac{2}{Cs}\right)^2; \quad \beta = \frac{2}{(Cs \cdot Cv)}; \quad k_{\min} = \frac{1-2Cv}{Cs}. \quad (9)$$

Рассчитанные по формуле (9) значения параметров: для H_c $\alpha = 3,949$; $\beta = 6,103$; $k_{\min} = 0,353$; для H_{24} $\alpha = 6,422$; $\beta = 7,798$; $k_{\min} = 0,176$.

На рис. 3 разница между кривыми не столь значительна, как на рис. 2, но она четко прослеживается, за исключением сумм осадков с обеспеченностью выше 90 %. Следует отметить отклонение вверх от теоретических кривых точек, соответствующих наибольшим значениям как H_c , так и H_{24} . Это же было отмечено и на двух оставшихся МС (Советск и Калининград). Для максимальных сумм осадков указанных МС наиболее подходящим теоретическим распределением оказалось трехпараметрическое логарифмически нормальное.

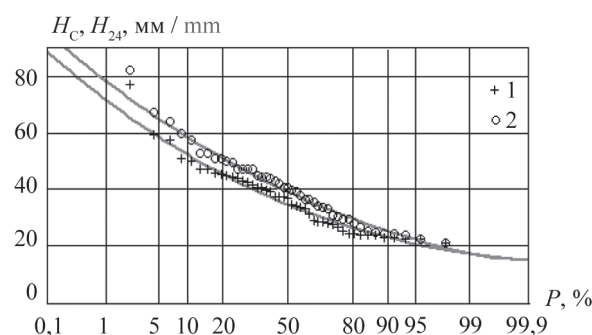


Рис. 3. Кривые обеспеченности максимальных суточных (1) и 24-часовых (2) сумм осадков (МС Железнодорожный): точки — эмпирические; линии — теоретические (Пирсона III типа)

Fig. 3. Probability curves for maximum daily (1) and 24-hour (2) total precipitation (Zheleznodorozhny): points are empirical, lines are theoretical (Pearson type III)

В табл. 3 показаны числовые параметры рядов максимальных сумм осадков на четырех МС за 1977–2021 гг. Относительное превышение параметров максимальных 24-часовых сумм осадков над максимальными суточными суммами рассчитано по формулам:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1\%} &= (H_{24-1\%}/H_{c1\%} - 1) \cdot 100; \\ \varepsilon_{\max} &= (H_{24\max}/H_{c\max} - 1) \cdot 100. \end{aligned} \quad (10)$$

Табл. 3. Числовые параметры рядов максимальных сумм осадков (1977–2021)

Table 3. Numerical parameters of the series of maximum precipitation amounts (1977–2021)

Параметр Parameter	Советск Sovetsk	Балтийск Baltiysk	Калининград Kaliningrad	Железнодорожный Zheleznodorozhny
<i>Максимальные, за год, суточные суммы осадков</i> <i>Maximum, in a year, daily precipitation amounts</i>				
Среднее H_c , мм / Average H_c , mm	34,5	31,2	39,5	36,3
Наибольшее H_c , мм / The largest H_c , mm	71,8	54,2	118	76,8
Cv	0,391	0,296	0,417	0,326
Cs	1,102	0,270	2,793	1,006
$H_{c1\%}$, мм $H_{c1\%}$, mm	76,5	54,9	101	72,0
<i>Максимальные, за год, 24-часовые суммы осадков</i> <i>Maximum, in a year, 24-hour precipitation amounts</i>				
Среднее H_{24} , мм / Average H_{24} , mm	38,8	36,7	44,3	40,6
Наибольшее H_{24} , мм / The largest H_{24} , mm	84,3	73,3	138	82,4
Cv	0,387	0,371	0,437	0,325
Cs	1,397	0,664	2,707	0,737
$H_{24-1\%}$, мм / $H_{24-1\%}$, mm	88,5	77,3	117	78,7
<i>Относительное превышение 24-часовых сумм осадков над суточными</i> <i>Relative excess of 24-hour precipitation amounts over daily</i>				
$\varepsilon_{\max}$, %	17,4	34,5	17,1	7,3
$\varepsilon_{1\%}$, %	15,7	40,8	15,8	9,3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, на примере МС КО показано, как с помощью 8-срочных наблюдений за осадками можно повысить точность определения максимальных сумм суточных (24-часовых) осадков.

Во всех рассмотренных случаях максимальные 24-часовые суммы осадков обеспеченности $P = 1\%$ оказались выше соответствующих значений, определенных по результатам наблюдений за метеоро-

логические сутки. Наибольшее превышение (более 40 %) было обнаружено по МС Балтийск.

При высокой обеспеченности ($P > 90\%$) максимальные 24-часовые суммы осадков не отличаются от значений, найденных по массиву результатов суточных наблюдений.

Полученные данные могут быть использованы при выполнении инженерных гидрометеорологических изысканий для расчета максимальных расходов дождевых паводков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гельфан А.Н., Гусев Е.М., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Мотовилов Ю.Г., Насонова О.Н. и др. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 2. Влияние изменения климата на водный режим рек России в XXI веке // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 270–285. DOI: 10.31857/S0321059622030051. EDN FBYFJJ.
2. Bormann H., Diekkruiger B. Possibilities and limitations of regional hydrological models applied within an environmental change study in Benin (West Africa) // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2003. Vol. 28. Issue 33–36. Pp. 1323–1332. DOI: 10.1016/j.pce.2003.09.008
3. Golian S., Murphy C., Meresa H. Regionalization of hydrological models for flow estimation in ungauged catchments in Ireland // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2021. Vol. 36. P. 100859. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100859
4. Horton P., Schaeftli B., Kauzlaric M. Why do we have so many different hydrological models? A review based on the case of Switzerland // WIREs Water. 2022. Vol. 9. Issue 1. DOI: 10.1002/wat2.1574
5. Jiang C., Parteli E.J.R., Xia Q., Yin X., Shao Y. A regional hydrological model for arid and semi-arid river basins with consideration of irrigation // Environmental Modelling & Software. 2022. Vol. 157. P. 105531. DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105531
6. Наумов В.А., Нелюбина Е.А. Межгодовая изменчивость элементов водного баланса бассейна трансграничной реки Ангапы // Природообустройство. 2022. № 3. С. 95–100. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-95-100. EDN ACBMSN.
7. Наумов В.А. Максимальные годовые расходы воды малых рек Славского района Калининградской области // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12. № 4. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-367-383. EDN HQBZOW.
8. Клименко Д.Е., Коребанов Е.П. Картирование суточного слоя осадков обеспеченностью $P = 1\%$ на территории деятельности Уральского УГМС при расчетах стока дождевых паводков по формуле предельной интенсивности // Географический вестник. 2012. № 3 (22). С. 54–63.
9. Клименко Д.Е., Черепанова Е.С., Кузьминых А.Ю. Оценка параметров распределений экстремальных ливней при учете нескольких событий в году // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 4. С. 438–446. DOI: 10.31857/S0321-0596464438-446. EDN ONRVGP.
10. Coles S., Pericchi L.R., Sisson S. A fully probabilistic approach to extreme rainfall modeling // Journal of Hydrology. 2003. Vol. 273. Issue 1–4. Pp. 35–50. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00353-0
11. De Michele C. Advances in deriving the exact distribution of maximum annual daily precipitation // Water. 2019. Vol. 11. Issue 11. P. 2322. DOI: 10.3390/w11112322
12. Ma H.-Y., Klein S. A., Lee J., Ahn M.-S., Tao C., Gleckler P.J. Superior daily and sub-daily precipitation statistics for intense and long-lived storms in global storm-resolving models // Geophysical Research Letters. 2022. Vol. 49. Issue 8. DOI: 10.1029/2021GL096759
13. Miró J.J., Lemus-Canovas M., Serrano-Notivol R., Cantos J.O., Estrela M.J., Martin-Vide J. et al. A component-based approximation for trend detection of intense rainfall in the Spanish Mediterranean coast // Weather and Climate Extremes. 2022. Vol. 38. P. 100513. DOI: 10.1016/j.wace.2022.100513
14. Morales J., García-Barrón L., Aguilar-Alba M., Sousa A. Hazard characterization of the annual maximum daily precipitation in the southwestern Iberian peninsula (1851–2021) // Water. 2022. Vol. 14. Issue 9. P. 1504. DOI: 10.3390/w14091504
15. Palagin E.D., Strelkov A.K., Pavluhin A.A. Rain precipitation parameters for the design of surface effluent treatment facilities from the territory of industrial enterprises // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 720. Issue 1. P. 012021. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012021
16. Papalexiou S.M., Koutsoyiannis D. Battle of extreme value distributions: A global survey on extreme daily rainfall // Water Resources Research. 2013. Vol. 49. Issue 1. Pp. 187–201. DOI: 10.1029/2012wr012557

17. Veneziano D., Langousis A., Lepore C. New asymptotic and preasymptotic results on rainfall maxima from multifractal theory // *Water Resources Research*. 2009. Vol. 45. Issue 11. DOI: 10.1029/2009wr008257

18. Наумов В.А. Использование специализированных массивов данных для климатических исследований // *Вестник научно-методического совета по природообустройству и водопользованию*. 2020. № 18. С. 52–59. EDN DMCZOE.

19. Барина Г.М. Калининградская область. Климат. Калининград : Янтарный сказ, 2002. 194 с.

20. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Л. : Гидрометеиздат, 1974. 424 с.

21. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб. : Изд-во РГГМУ, 2007. 279 с.

Поступила в редакцию 27 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 10 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 6 октября 2023 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. Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Y.G., Nasonova O.N. et al. Runoff of Russian rivers under current and projected climate change: A review 2. Climate change impact on the water regime of Russian rivers in the XXI century. *Water Resources*. 2022; 49(3):270-285. DOI: 10.31857/S0321059622030051. EDN FBYFJJ. (rus.).

2. Bormann H., Diekkruiger B. Possibilities and limitations of regional hydrological models applied within an environmental change study in Benin (West Africa). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2003; 28(33-36):1323-1332. DOI: 10.1016/j.pce.2003.09.008

3. Golian S., Murphy C., Meresa H. Regionalization of hydrological models for flow estimation in ungauged catchments in Ireland. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2021; 36:100859. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100859

4. Horton P., Schaeffli B., Kauzlaric M. Why do we have so many different hydrological models? A review based on the case of Switzerland. *WIREs Water*. 2022; 9(1). DOI: 10.1002/wat2.1574

5. Jiang C., Parteli E.J.R., Xia Q., Yin X., Shao Y. A regional hydrological model for arid and semi-arid river basins with consideration of irrigation. *Envi-*

ronmental Modelling & Software. 2022; 157:105531. DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105531

6. Naumov V.A., Nelyubina E.A. Interannual variability of elements of the water balance of the basin of the transboundary river Angrapa. *Environmental Engineering*. 2022; 3:95-100. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-95-100. EDN ACBMSN. (rus.).

7. Naumov V.A. Maximum annual water discharges of small rivers in Slavsky district Kaliningrad region. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2022; 12(4). DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-367-383. EDN HQBZOW. (rus.).

8. Klimenko D.E., Korepanov E.P. Mapping of daily layer precipitation security $P = 1\%$ for territories activity Urals management of hydrometeorology at calculations of the drain rain high waters for the formula of limiting intensity. *Geographical Bulletin*. 2012; 3(22):54-63. (rus.).

9. Klimenko D.E., Cherepanova E.S., Kuz'minykh A.Y. Evaluating parameters of the distributions of extreme storms with several events per year taken into account. *Water Resources*. 2019; 46(4):438-446. DOI: 10.31857/S0321-0596464438-446. EDN ONRVGP. (rus.).

10. Coles S., Pericchi L.R., Sisson S. A fully probabilistic approach to extreme rainfall modeling. *Jour-*

nal of Hydrology. 2003; 273(1-4):35-50. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00353-0

11. De Michele C. Advances in deriving the exact distribution of maximum annual daily precipitation. *Water*. 2019; 11(11):2322. DOI: 10.3390/w11112322

12. Ma H.-Y., Klein S.A., Lee J., Ahn M.-S., Tao C., Gleckler P.J. Superior daily and sub-daily precipitation statistics for intense and long-lived storms in global storm-resolving models. *Geophysical Research Letters*. 2022; 49(8). DOI: 10.1029/2021GL096759

13. Miró J.J., Lemus-Canovas M., Serrano-Notivoli R., Cantos J.O., Estrela M.J., Martin-Vide J. et al. A component-based approximation for trend detection of intense rainfall in the Spanish Mediterranean coast. *Weather and Climate Extremes*. 2022; 38:100513. DOI: 10.1016/j.wace.2022.100513

14. Morales J., García-Barrón L., Aguilar-Alba M., Sousa A. Hazard characterization of the annual maximum daily precipitation in the southwestern Iberian peninsula (1851–2021). *Water*. 2022; 14(9):1504. DOI: 10.3390/w14091504

15. Palagin E.D., Strelkov A.K., Pavluhin A.A. Rain precipitation parameters for the design of surface effluent treatment facilities from the territory of

industrial enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 720(1):012021. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012021

16. Papalexiou S.M., Koutsoyiannis D. Battle of extreme value distributions: A global survey on extreme daily rainfall. *Water Resources Research*. 2013; 49(1):187-201. DOI: 10.1029/2012wr012557

17. Veneziano D., Langousis A., Lepore C. New asymptotic and preasymptotic results on rainfall maxima from multifractal theory. *Water Resources Research*. 2009; 45(11). DOI: 10.1029/2009wr008257

18. Naumov V.A. Using specialized data sets for climate research. *Bulletin of the Scientific and Methodological Council for Environmental Engineering and Water Use*. 2020; (18):52-59. EDN DMCZOE. (rus.).

19. Barinova G.M. *Kaliningrad region. Climate*. Kaliningrad, Amber Tale, 2002; 194. (rus.).

20. Rozhdestvensky A.V., Chebotarev A.I. *Statistical Methods in Hydrology*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 2009; 424. (rus.).

21. Sikan A.V. *Methods of statistical processing of hydrometeorological information*. St. Petersburg, Publishing House of the Russian State Humanitarian University, 2007; 279. (rus.).

Received August 27, 2023.

Adopted in revised form on September 10, 2023.

Approved for publication on October 6, 2023.

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, 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.

Экспериментальные исследования кожухотрубного теплообменника с цилиндрическими турбулизаторами потока

Николай Юрьевич Никулин, Юлия Васильевна Елистратова

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
(БГТУ им. В.Г. Шухова); г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Перспективным направлением современных систем теплоснабжения является активное применение теплообменников. Теплообменники кожухотрубной конструкции достаточно распространены. Поэтому актуальна модернизация таких теплообменников с целью повышения основного параметра — коэффициента теплопередачи. Разработан теплообменник, у которого трубки оснащены пластинами с цилиндрическими турбулизаторами — ребрами цилиндрической формы. Проведены экспериментальные исследования нового теплообменника в условиях, соответствующих реальной системе теплоснабжения.

Материалы и методы. Использовался натурный стенд, который представляет собой независимую систему отопления здания. Основное оборудование стенда — электронагреватель мощностью 5 кВт, потребитель — радиаторы, исследуемый теплообменник с турбулизаторами, контрольно-измерительные приборы. Планирование эксперимента основано на температурном графике отпуска теплоты от котельной и температурном графике потребителя. Выполнены математическая обработка результатов, проверка значимости уравнений и коэффициентов.

Результаты. Для теплообменника с турбулизаторами экспериментальным способом получены значения коэффициента теплопередачи при различных температурах наружного воздуха периода отопления. Расхождения с расчетными данными составили не более 10 %, что допустимо. Получены зависимости коэффициента теплопередачи от температурного напора при скоростях теплоносителя в межтрубном пространстве 0,16 и 0,32 м/с. Результаты математической обработки показали, что эти зависимости являются адекватными, статистически значимо описывают результаты проведенных исследований. Установлено, что при скорости 0,16 м/с в среднем за отопительный период коэффициент теплопередачи исследуемого теплообменника с турбулизаторами получился больше на 22 %, чем у серийного; при скорости 0,32 м/с — на 23 % больше.

Выводы. Экспериментальные исследования подтвердили, что благодаря турбулизации теплоносителя коэффициент теплопередачи теплообменника с турбулизаторами в среднем увеличился на 23 %. Габариты такого теплообменника будут значительно меньше, чем серийного (ГОСТ 27590–2005). Конструкция теплообменной трубки с цилиндрическими турбулизаторами рекомендована для использования в кожухотрубных теплообменниках, а также для воздухоподогревателей, калориферов, экономайзеров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплообменник, кожухотрубный, турбулизация, теплоноситель, коэффициент теплопередачи, теплоснабжение, турбулизатор, эксперимент

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова. Исследования проводились в рамках гранта Президента Российской Федерации для ведущей научной школы № НШ-25.2022.4 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никулин Н.Ю., Елистратова Ю.В. Экспериментальные исследования кожухотрубного теплообменника с цилиндрическими турбулизаторами потока // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1966–1976. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1966-1976

Автор, ответственный за переписку: Николай Юрьевич Никулин, Nick_973gt@mail.ru.

Experimental studies of shell and tube heat exchanger with cylindrical flow turbulators

Nikolaj Yu. Nikulin, Yulia V. Elistratova

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
(BSTU named after V.G. Shukhov); Belgorod, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Heat exchangers are important equipment in modern heat supply. This equipment is very common. Modernization of shell-and-tube heat exchangers is an important direction. The purpose of modernization is to increase the heat transfer coefficient. A heat exchanger which tubes are equipped with plates was developed. Cylindrical turbulators (ribs) are located on the plates. The experiment is important for the development of a new heat exchanger. The experimental conditions correspond to the real heat supply system.

Materials and methods. The full-scale stand was used for the experiment. The stand represents an independent heating system of the building. The planning of the experiment is based on the temperature schedule of the boiler house and the temperature schedule for the consumer. Mathematical processing of the results was carried out.

Results. For a heat exchanger (with turbulators), the values of the heat transfer coefficient were obtained at different outdoor temperatures during the heating period. The dependences of the heat transfer coefficient on the temperature difference are obtained. This was done at coolant velocities in the annular space of 0.16 and 0.32 m/s. Discrepancies are adequate, statistically significantly describe the results of the experiment. The heat transfer coefficient of the heat exchanger (with turbulators) turned out to be greater than that of the serial one. This parameter is 22 % more at a speed of 0.16 m/s, 23 % more at a speed of 0.32 m/s on average for the heating period.

Conclusions. The heat transfer coefficient increased for the heat exchanger with turbulators by an average of 23 %. The turbulence of the coolant affects this increase. The dimensions will be much smaller for such a heat exchanger than for an apparatus with smooth tubes. Tube with cylindrical turbulators is recommended for use in different equipment. This can be used in shell-and-tube heat exchangers, air heaters, heaters, economizers.

KEYWORDS: heat exchanger, shell-and-tube, turbulization, coolant, heat transfer coefficient, heat supply, turbulator, experiment

Acknowledgements. The work was realized in the framework of the Program "Priority 2030" on the base of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. The work was realized using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov. The research was carried out within the framework of the Grant of the President of the Russian Federation for the leading scientific school No. NSh-25.2022.4 using the equipment of the Center for High Technologies of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION: Nikulin N.Yu., Elistratova Yu.V. Experimental studies of shell and tube heat exchanger with cylindrical flow turbulators. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1966-1976. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1966-1976 (rus.).

Corresponding author: Nikolaj Yu. Nikulin, Nick_973gt@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

За период 2004–2020 гг. потребление тепловой энергии абонентами снизилось с 1382 до 1126 млн Гкал в год. Такой результат получился вследствие нескольких факторов: постоянного увеличения установленных приборов учета тепловой энергии, повышения теплозащитности зданий, постепенного наведения порядка в системах производства, транспорта и распределения теплоты. Последнее связано с осуществлением реконструкции систем теплоснабжения, что сопровождается применением высокоэффективного нового оборудования [1].

В состав такого оборудования включены кожухотрубные теплообменники, которые на протяжении всей истории развития системы теплоснабжения показали целесообразность применения. Использование этих теплообменников обосновано высокой эксплуатационной надежностью, а также сравнительно низкой стоимостью, простотой изготовления, возможностью применения рабочих веществ с разными агрегатными состояниями (водяной пар, отработанные горячие газы). Такое тепломеханическое оборудование позволяет существенно снижать затраты и ресурсы для приготовления теплоносителя, а также повышать качество теплоснабжения в целом.

Поэтому важно проводить научные исследования, направленные на повышение тепловых характеристик кожухотрубных теплообменников. В настоящее время в России и за рубежом имеется опыт разработки высокоэффективного теплообменного оборудования.

Сегодня наиболее распространены два способа повышения тепловых характеристик: организация движения теплоносителя в корпусе теплообменни-

ка и изменение геометрии поверхности теплообмена. Для реализации первого способа используются трубки с частично замкнутым объемом [2], концентрические трубки [3, 4], перегородки в форме спирали [5, 6], перегородки с отверстиями в форме треугольника (для трубок теплообменника) [7, 8], щелевые перегородки [9].

Для изменения геометрии поверхности теплообмена применяются Y-образные вставки с треугольной перфорацией в трубках [10], теплообменник со спиральными трубками [11–13], изменение поверхностной структуры с использованием лазера [14], кручение овальных труб с неравным шагом закрутки [15], пластинчато-ребристые трубки [16], спиральные трубки [17], трубки с лунками в виде полусферы на внутренней и внешней поверхностях [18], однорядные овальные лунки на поверхности [19] и однорядные овально-траншейные лунки [20] и др.

При разработке новой конструкции или модернизации поверхности теплообмена активно проводятся исследования с применением вычислительной гидродинамики и компьютерных технологий. Также актуальным по-прежнему является выполнение и экспериментальных исследований.

На кафедре теплогазоснабжения и вентиляции БГТУ им. В.Г. Шухова в рамках основных направлений научных исследований усовершенствован кожухотрубный теплообменник. За счет технических решений произведено улучшение нагревания жидкости в межтрубном пространстве по сравнению с серийным теплообменником (ГОСТ 27590–2005). В основе использован эффект повышения турбулизации нагреваемой жидкости при обтекании горячей поверхности нагрева. Это способствует снижению

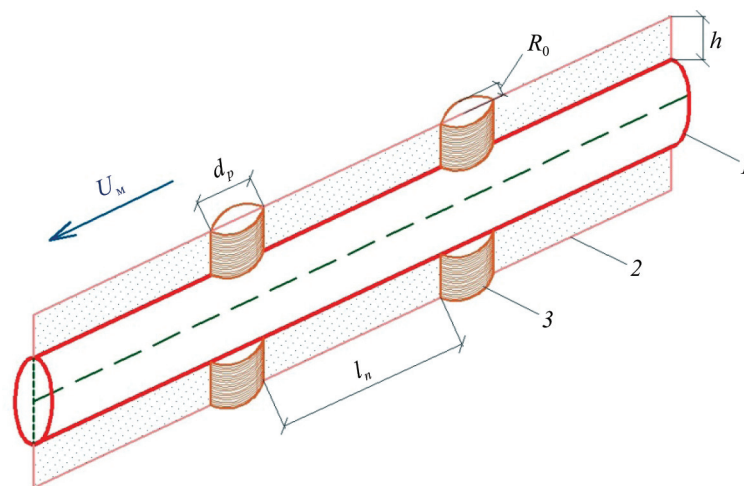


Рис. 1. Измененная поверхность теплообмена кожухотрубного аппарата: 1 — трубка аппарата; 2 — пластина; 3 — цилиндрические турбулизаторы (ребра цилиндрической формы); U_m — скорость жидкости, м/с; R_0 — радиус ребра; d_p — диаметр турбулизатора; l_n — расстояние между турбулизаторами; h — высота пластины

Fig. 1. Changed heat exchange surface of the shell-and-tube apparatus: 1 — apparatus tube; 2 — plate; 3 — cylindrical turbulators (ribs of cylindrical shape); U_v — fluid velocity; R_0 — rib radius; d_p — turbulator diameter; l_n — distance between turbulators; h — plate height

ламинарного слоя у горячей поверхности теплообмена и увеличению передачи теплоты от этой поверхности к нагреваемому теплоносителю.

Таким образом, трубки кожухотрубного аппарата оснащены пластинами с цилиндрическими турбулизаторами. Это ребра, форма которых — цилиндрическая (рис. 1), благодаря чему жидкость турбулизуется [21]. Ребра расположены на таком расстоянии, что ребро и участок пластины между ребрами находятся в зоне повышенной турбулизации. Поверхность ребра и пластины соответственно является горячей. И, как отмечено выше, теплота от пластины и ребра интенсивнее передается к нагреваемой жидкости межтрубного пространства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования работы теплообменника проводились экспериментальным способом. Цель исследований — сравнение коэффициентов теплопередачи двух теплообменников: серийного (ГОСТ 27590–2005) и разработанного (с повышенной турбулизацией потока, т.е. с турбулизаторами (патент РФ № 185391)).

Также при осуществлении исследований важно определить влияние на теплообменник с турбулизаторами следующих параметров теплоносителя:

- температура в греющем контуре, в подающем трубопроводе t_1 , °С;
- скорость нагреваемой воды в межтрубном пространстве аппарата U_m .

Описание работы установки

Исследования коэффициента теплопередачи выполнены на натурном стенде «Независимая си-

стема отопления здания» (рис. 2) [22]. Теплоносителем в системе является умягченная вода.

Система работает следующим образом. Теплоноситель нагревается в электрическом котле (мощностью 5 кВт) до температуры определенного значения. Это значение задается регулятором температуры котла. Затем горячий теплоноситель по подающему трубопроводу поступает в трубку исследуемого теплообменника с турбулизаторами (это греющий контур). Здесь теплоноситель остывает, отдавая теплоту в межтрубное пространство (нагреваемой жидкости). После теплообменника через обратный трубопровод остывшая вода поступает в котел для последующего нагрева до нужной температуры.

Межтрубное пространство аппарата является нагреваемым контуром. Здесь теплоноситель нагревается за счет обтекания горячей поверхности теплообмена (трубка, пластина и турбулизаторы). Далее посредством подающего трубопровода теплоноситель направляется к потребителю теплоты. В данной установке это радиатор системы. Здесь теплоноситель остывает, отдавая теплоту. После остывшая вода направляется (через обратный трубопровод нагреваемого контура) в теплообменник для нагревания.

Температурный режим проведения эксперимента

Температурный режим со стороны котла (греющего контура) принят в соответствии с температурным графиком отпуска тепловой энергии: температура в подающем трубопроводе $t_1 = 95$ °С, в обратном $t_2 = 70$ °С. В нагреваемом контуре температурный режим составляет: в подающем трубопро-

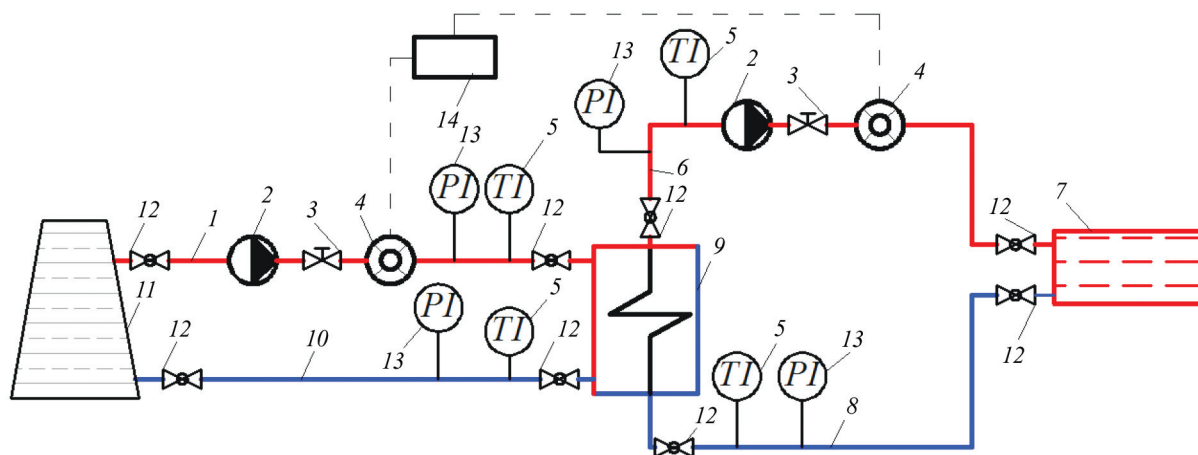


Рис. 2. Натурный стенд «Независимая система отопления здания»: 1 — трубопровод подающий (в трубное пространство) от котла; 2 — насос в греющем контуре; 3 — регулятор потока; 4 — расходомер; 5 — датчик температуры; 6 — подающий трубопровод (нагреваемый контур, выход из межтрубного пространства аппарата); 7 — радиатор; 8 — обратный трубопровод (из радиатора, вход в межтрубное пространство теплообменника); 9 — теплообменник; 10 — обратный трубопровод (выход из трубного пространства к котлу); 11 — котел водогрейный электрический; 12 — кран; 13 — показывающий манометр; 14 — вычислитель количества теплоты

Fig. 2. Natural stand “Independent building heating system”: 1 — supply pipeline from the boiler (into the pipe space); 2 — heating circuit pump; 3 — flow controller; 4 — flow meter; 5 — temperature sensor; 6 — supply pipeline (heated circuit, exit from the intertube space of the apparatus); 7 — radiator; 8 — return pipeline (from the radiator, entrance to the intertube space of the heat exchanger); 9 — heat exchanger; 10 — return pipeline (pipe exit, to the boiler); 11 — electric hot water boiler; 12 — tap; 13 — indicating manometer; 14 — heat calculator

воде $t_1 = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, в обратном $t_2 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температуры теплоносителя указаны для наиболее холодной пятидневки Белгородского региона. При температуре наружного воздуха $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. в переходный период, температуры теплоносителя следующие: $\tau_1 = 43\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau_2 = 37,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_1 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_2 = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В исследованиях применялся кожухотрубный теплообменник с геометрическими размерами, которые представлены в табл. 1.

Табл. 1. Геометрические размеры изготовленного теплообменника

Table 1. Geometric dimensions of the manufactured heat exchanger

Геометрические размеры Geometric dimensions	Значение Meaning
Диаметр корпуса Case diameter	$32 \times 3\text{ мм} / \text{mm}$
Диаметр трубки Tube diameter	$10 \times 1\text{ мм} / \text{mm}$
Диаметр турбулизатора Turbulator diameter	$8\text{ мм} / \text{mm}$
Длина аппарата Machine length	$1\text{ м} / \text{m}$
Высота пластины Plate height	$4\text{ мм} / \text{mm}$

Прямые и косвенные измерения величин экспериментальных исследований

При исследованиях производились прямые измерения. Таким образом измерялась температура теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$:

- 1) на входе в трубку (или греющий контур) τ_1 ;
- 2) на выходе из трубки (или греющий контур) τ_2 ;
- 3) на входе в межтрубное пространство (или нагреваемый контур) t_2 ;
- 4) на выходе из межтрубного пространства (или нагреваемый контур) t_1 .

Для этого использовали датчик температуры ТПС-Pt500 в комплекте с тепловычислителем Взлет ТСПВ-042.

Измерялся также расход теплоносителя в трубном $G_{\text{тр}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, и межтрубном $G_{\text{мтр}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, пространстве. Для этого применялся расходомер Взлет Ду 15 мм с тепловычислителем Взлет ТСПВ-042.

Геометрические параметры пластины и ребра измерялись штангенциркулем ШЦ-1, у которого цена деления составляет $0,1\text{ мм}$.

Также производились косвенные измерения. Количество тепловой энергии за единицу времени, Вт, отданное греющим контуром к нагреваемому, определялось следующим образом:

$$Q = 1,66 \cdot G_{\text{тр}} (\tau_1 - \tau_2). \quad (1)$$

Среднегарифмический температурный напор $\Delta t_{\text{ср}}$, °С, теплообменника (далее — температурный напор) рассчитывался по формуле:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(\tau_1 - t_1) - (\tau_2 - t_2)}{2,3 \lg \frac{\tau_1 - t_1}{\tau_2 - t_2}}. \quad (2)$$

Площадь межтрубного пространства теплообменника, м², (поперечное сечение) определяется по выражению:

$$f_{\text{мтр}} = \frac{\pi(D_{\text{вн}}^2 - d_{\text{тр}}^2)}{4}, \quad (3)$$

где $D_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр корпуса, м; $d_{\text{тр}}$ — внешний диаметр трубки, м. Площадь межтрубного пространства составила 0,00045 м² (с учетом прямых и косвенных измерений).

Средняя скорость воды $U_{\text{м}}$, м/с, в межтрубном пространстве рассчитывается так:

$$U_{\text{м}} = \frac{G_{\text{мтр}}}{3600 f_{\text{мтр}}}, \quad (4)$$

с использованием формулы (3) получим:

$$U_{\text{м}} = \frac{4G_{\text{мтр}}}{3600\pi(D_{\text{вн}}^2 - d_{\text{тр}}^2)}. \quad (5)$$

Коэффициент теплопередачи аппарата K , Вт/(м²·К), рассчитывается по известной формуле:

$$K = \frac{Q}{\Delta t_{\text{ср}} F}, \quad (6)$$

где F — площадь поверхности теплообмена аппарата, которая составляет 0,0552 м². Данная величина посчитана исходя из геометрии поверхности теплообмена.

Количество опытов

Известно, что в системе теплоснабжения температура воды в теплопроводах зависит от температуры наружного воздуха. Поэтому коэффициент теплопередачи теплообменника с турбулизаторами необходимо исследовать на протяжении всего отопительного периода. То есть следует изучить функционирование данного параметра аппарата в наиболее характерных температурных режимах. Прежде всего важно исследовать теплообменник при температурах подающего трубопровода, которые со-

ответствуют началу и концу отопительного сезона. По действующим «Правилам технической эксплуатации тепловых энергоустановок» требуется подавать тепловую энергию для жилых и общественных зданий, когда в течение пяти суток среднесуточная температура наружного воздуха достигает значения +8 °С и менее. При этом подача теплоэнергии завершается, если также в течение пяти суток среднесуточная температура достигает отметки +8 °С и выше.

Стоит учесть, что оборудование в теплоснабжении подбирается на самые неблагоприятные температурные условия окружающей среды. Поэтому логично проанализировать работу аппарата при температуре наиболее холодной пятидневки. Для Белгородского региона это значение составляет –24 °С. Но максимальная температура воды на выходе из котла — 87 °С, что по температурному графику соответствует температуре наружного воздуха –17.

С целью получения объективных результатов исследования использованы дополнительные значения температуры наружного воздуха, расположенные в интервале [–17; +8] °С: –15; –10; –5; 0; +5 °С.

Таким образом, принят диапазон температур наружного воздуха: –17; –15; –10; –5; 0; +5; +8 °С. И для этих температур соответственно по температурному графику отпуска тепловой энергии (95; 70) °С определены температуры теплоносителя в подающем трубопроводе греющего контура. По этим температурам для серийного теплообменника посчитаны по формуле (2) температурный напор и по формуле (5) скорости жидкости $U_{\text{м}}$, $U_{\text{тр}}$. Такие же скорости и температурные напоры использованы для исследования теплообменника с турбулизаторами. Величина температуры на входе в трубное пространство принята одинаковой для серийного и теплообменника с турбулизаторами (табл. 2).

Расчетным способом по СП 41-101-95 определены скорости теплоносителя трубного $U_{\text{тр}}$, м/с, и межтрубного $U_{\text{м}}$, м/с, пространства:

- опыт 1: $U_{\text{тр}} = 1,2$ м/с, $U_{\text{м}} = 0,16$ м/с;
- опыт 2: $U_{\text{тр}} = 1,2$ м/с, $U_{\text{м}} = 0,39$ м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После проведения эксперимента и получения результатов производилась математическая обра-

Табл. 2. Температурный режим эксперимента

Table 2. Temperature regime of the experiment

Температура наружного воздуха, °С Outdoor temperature, °С	+8	+5	0	–5	–10	–15	–17
Температура на входе в трубное пространство, °С (задается на котле) Temperature at the inlet to the pipe space, °С (set on the boiler)	43	47,7	56,9	65,6	74,1	82,3	85,0
Температурный напор (рассчитанный), °С Temperature pressure (calculated), °С	2,53	3,11	4,25	6,12	7,97	9,72	11,0

ботка данных. Для этого применен метод наименьших квадратов. Получены зависимости коэффициента теплопередачи от температурного напора (7) и (8) по итогам обработки результатов соответственно первого и второго опыта:

$$K = 1024 + 50\Delta t_{\text{cp}}; \quad (7)$$

$$K = 1717 + 85\Delta t_{\text{cp}}. \quad (8)$$

Критерий Фишера с уровнем значимости 5 % при этом составил $F_{(6; 5; 5\%)}^T = 5$ (значение, найденное по таблице). В ходе математической обработки по результатам первого опыта критерий Фишера составил $F_1^{\text{он}} = 0,04$, и второго — $F_2^{\text{он}} = 0,08$. Сравнивая табличные и расчетные критерии Фишера $F_{(6; 5; 5\%)}^T > F_1^{\text{он}}$ и $F_{(6; 5; 5\%)}^T > F_2^{\text{он}}$, можно заключить: зависимости (7) и (8) адекватны и описывают

результаты натурных исследований статистически значимо.

Также построен график зависимости коэффициента теплопередачи от температурного напора для серийного (по действующему СП 41-101-95) и теплообменника с турбулизаторами (с использованием экспериментальных данных). Произведен расчет коэффициента теплопередачи теплообменника с турбулизаторами. При этом использованы ранее проведенные теоретические исследования [21, 22] (табл. 3). Применен температурный режим системы, принятый для эксперимента.

Ниже представлены графики зависимости величины коэффициента теплопередачи от температурного напора для двух аппаратов: серийного и разработанного с турбулизаторами (рис. 3).

Табл. 3. Итоги экспериментальных исследований

Table 3. Results of experimental studies

Температура наружного воздуха, °C Outside air temperature, °C	+8	+5	0	–5	–10	–15	–17
Температурный напор серийного теплообменника Δt_{cp} , °C (по СП 41-101-95) Temperature pressure of a serial heat exchanger Δt_m , °C (according to the Code of Practice 41-101-95)	2,58	3,11	4,25	6,12	7,97	9,72	11
<i>1-й опыт: $U_m = 0,16$ м/с / 1st experience: $U_m = 0.16$ m/s</i>							
Температурный напор Δt_{cp} , °C, по данным эксперимента Temperature pressure Δt_m , °C, according to the experiment	2,51	3,51	4,63	6,85	8,18	9,81	11,42
Коэффициент теплопередачи K , Вт/(м²·°C) Heat transfer coefficient K , W/(m²·°C)							
серийного теплообменника serial heat exchanger	933	977	1020	1066	1110	1150	1161
разработанного теплообменника с турбулизаторами, экспериментальный результат developed heat exchanger with turbulators, experimental result	1132	1221	1260	1323	1486	1523	1578
разработанного теплообменника с турбулизаторами, расчетное значение of the developed heat exchanger with turbulators, the calculated value	1224	1304	1381	1467	1559	1632	1660
Различие расчетного значения и экспериментального результата коэффициента теплопередачи для теплообменника с турбулизаторами, % The difference between the calculated value and the experimental result of the heat transfer coefficient for a heat exchanger with turbulators, %	8	6	9	10	5	7	5
<i>2-й опыт: $U_m = 0,32$ м/с / 2nd experience: $U_m = 0.32$ m/s</i>							
Температурный напор Δt_{cp} , °C, по данным эксперимента Temperature pressure Δt_m , °C, according to the experiment	2,43	3,25	4,89	6,05	7,72	9,07	11,56
Коэффициент теплопередачи K , Вт/(м²·°C) Heat transfer coefficient K , W/(m²·°C)							
серийного теплообменника serial heat exchanger	1599	1661	1759	1860	1917	1982	1983
разработанного теплообменника с турбулизаторами, экспериментальный результат developed heat exchanger with turbulators, experimental result	1867	1913	2216	2286	2447	2503	2608

Температура наружного воздуха, °C Outside air temperature, °C	+8	+5	0	–5	–10	–15	–17
разработанного теплообменника с турбулизаторами, расчетное значение developed heat exchanger with turbulators, the calculated value	1948	1985	2119	2273	2367	2459	2530
Различие расчетного значения и экспериментального результата коэффициента теплопередачи для теплообменника с турбулизаторами, % The difference between the calculated value and the experimental result of the heat transfer coefficient for a heat exchanger with turbulators, %	4	4	5	1	3	2	3

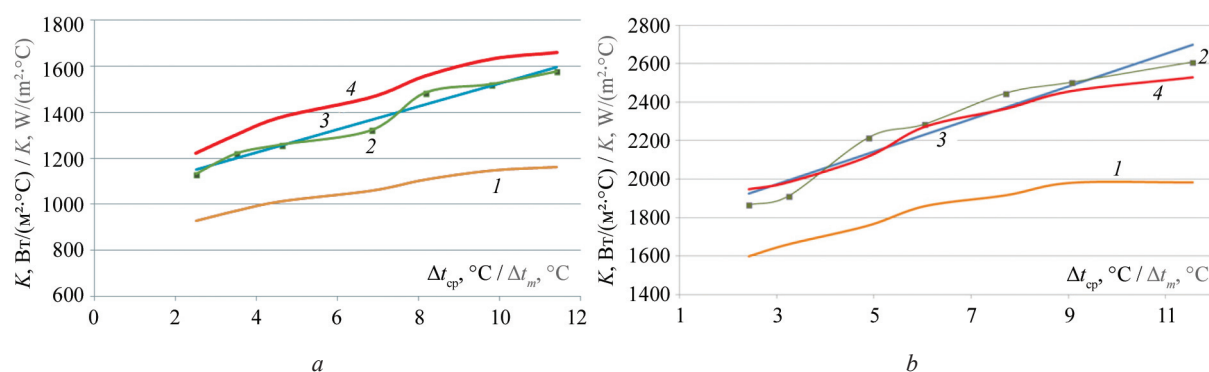


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопередачи от температурного напора в первом опыте для кожухотрубных теплообменников: 1 — серийного (составлена на основании расчета по СП 41-101-95); 2 — с турбулизаторами (составлена на основании экспериментальных данных); 3 — по результатам обработки данных эксперимента; 4 — по расчетным данным разработанного с турбулизаторами

Fig. 3. Dependence of the heat transfer coefficient on the temperature pressure in the first experiment for shell-and-tube heat exchangers: 1 — serial (it is compiled on the basis of the calculation according to the Code of Practice (Russia) 41-101-95); 2 — with turbulators (it is based on experimental data); 3 — it was compiled based on the results of processing the experimental data; 4 — it is compiled according to the calculated data developed with turbulators

Проанализируем зависимость коэффициента теплопередачи от температурного напора в один из характерных периодов наступления отрицательных температур от 0 до –5 °C. В этот интервал попадает и среднее значение температуры воздуха отопительного периода Белгородского региона, что составляет –1,8 °C. Таким образом, при снижении температуры от 0 до –5 °C коэффициент теплопередачи серийного аппарата возрастает на 4,5 %. При этих же условиях коэффициент теплопередачи теплообменника с турбулизаторами повышается на 8,8 %. В промежутке наиболее низких температур от –10 до –17 °C коэффициент теплопередачи серийного аппарата возрастает на 4,6 %, а с турбулизаторами — на 6,5 %. То есть увеличение передачи тепловой энергии от греющего контура к нагреваемому в теплообменнике с турбулизаторами происходит интенсивнее. В среднем за отопительный период коэффициент теплопередачи аппарата с турбулизаторами выше на 22 %, по сравнению с серийным.

Важно обозначить, что коэффициент теплопередачи у аппарата с турбулизаторами растет интенсивнее, чем у серийного (при росте температурного напора). При скорости теплоносителя в межтрубном пространстве 0,16 м/с фактором для этого может служить конвекция, т.е. имеет место интенсификация вихревого движения. Это происходит из-за увеличения разности температур между (нагретой) поверхностью теплообмена и (нагреваемым) теплоносителем.

Во втором опыте рассмотрим также снижение температуры наружного воздуха от 0 до –5 °C. При этом возрастание коэффициента теплопередачи серийного теплообменника составляет 5,7 %. Это незначительно больше, чем у исследуемого с турбулизаторами, т.е. 4,6 %. Но в интервале снижения температур от –10 до –17 °C возрастание коэффициента теплопередачи теплообменника с турбулизаторами составляет 7 %, что больше, по сравнению с серийным (у которого 3,4 %). Следовательно, в этом случае влияние конвекции на теплоотдачу

в теплообменнике с турбулизаторами выше (т.е. при больших температурах теплоносителя). В среднем коэффициент теплопередачи разработанного аппарата выше на 23 %, по сравнению серийным.

Анализируя проведенные эксперименты, можно заключить, что увеличение коэффициента K (с ростом температурного напора) для теплообменника с турбулизаторами происходит в целом интенсивнее, чем у серийного.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Принимая к сведению исследования авторов [13], полученные результаты экспериментальных исследований, можно сделать следующее заключение. К повышению коэффициента теплопередачи в разработанном теплообменнике приводит турбулизация потока нагреваемой жидкости (в межтрубном пространстве). Интенсивность влияния турбулизации зависит от величины температурного напора, а значит от разности температур между нагретой поверхностью теплообмена и нагреваемого теплоносителя. Чем выше параметр $\Delta t_{\text{ср}}$, тем значи-

тельное влияние турбулизации на величину коэффициента K . Это можно объяснить тем, что в таком случае выше разность температур между нагретой поверхностью и нагреваемым теплоносителем. Следовательно, имеет место интенсификация вихревого движения, в том числе и за счет тепловой конвекции. В целом с повышением температурного напора растет и коэффициент теплопередачи.

Получены также зависимости коэффициента теплопередачи от среднего температурного напора по результатам данных эксперимента и математической обработки.

При одном и том же значении температурного напора коэффициент теплопередачи теплообменника с турбулизаторами выше в среднем на 23 %, по сравнению с серийным.

Исследования показали, что эффект повышенной турбулизации увеличивает коэффициент теплопередачи тепломеханического оборудования. Такие технические решения перспективно использовать при разработке воздухоподогревателей, калориферов, экономайзеров, парогенераторов и другого теплообменного оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2020 г. // Новости теплоснабжения. 2022. № 3 (231). С. 12–22.
2. Жаров А.В., Павлов А.А., Фавстов В.С., Горшков Р.В. Исследование процессов в теплообменнике-утилизаторе теплоты отработанных газов дизельной когенерационной установки транспортного средства методами компьютерной гидродинамики // Фундаментальные исследования. 2013. № 10–15. С. 3321–3327. EDN SWOBNV.
3. Букин В.Г., Хо В.Х. Повышение эффективности теплообмена в кожухотрубных испарителях судовых холодильных установок // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2013. № 1. С. 90–94. EDN PWXXIN.
4. Rădulescu S., Negoită L.I., Onuțu I. Analysis of the heat transfer in double and triple concentric tube heat exchangers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 147. P. 012148. DOI: 10.1088/1757-899X/147/1/012148
5. Ajithkumar M.S., Ganesh T., Math M.C. Analysis to study the effects of inclined baffles on fluid flow in a shell and tube heat exchanger // International Journal of Research in Advent Technology. 2014. Vol. 2. Issue 7. Pp. 164–175. DOI: 10.22055/jacm.2020.32925.2103
6. Mellal M., Benzeguir R., Sahel D., Ameer H. Hydro-thermal shell-side performance evaluation of a shell and tube heat exchanger under different baffle arrangement and orientation // International Journal of Thermal Sciences. 2017. Vol. 121. Pp. 138–149. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.011
7. Swapnil S.K., Barve Shivprakash B. Effect of different types of baffles on heat transfer & pressure drop of shell and tube heat exchanger : a review // International Journal of Current Engineering and Technology. 2017. Vol. 7. Pp. 358–362.
8. Gurram V.T., Rao K.V.N. Numerical investigation on heat transfer and fluid flow of shell-side for shell and tube heat exchanger with hexagonal vent baffle by using CFD // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. Issue 5. Pp. 995–1009.
9. Patil P.C., Deshmukh M.S. Performance improvement of heat exchanger using slotted baffle // International Journal of Current Engineering and Technology. 2011. Vol. 5. Pp. 161–164. DOI: 10.14741/ijcet/22774106/spl.5.6.2016.31
10. Pandey L., Singh S. Numerical analysis for heat transfer augmentation in a circular tube heat exchanger using a triangular perforated Y-shaped insert // Fluids. 2021. Vol. 6. Issue 7. DOI: 10.3390/fluids6070247

11. Xu S., Zheng J., Jian Y. Spiral tube type fused salt direct-flow heat exchanger // State Intellectual Property Office of the P.R.C. 2021. Vol. 185. Pp. 95–101.
12. Xu W., Liu Z., Huang S., Zhuang Y. Evaluation and development of a predictive model for conjugate phase change heat transfer of energy storage system partially filled with porous media // Energy Storage and Saving. 2022. Vol. 1. Issue 4. Pp. 293–308. DOI: 10.1016/j.enss.2022.08.001
13. Круглов Г.А., Бакунин В.В., Андреева М.В. Теоретические исследования взаимосвязи степени турбулизации потока с коэффициентом теплоотдачи // Вестник КрасГАУ. 2015. № 6 (105). С. 67–73. EDN UDTLYH.
14. Jalil S.A., ElKabbash M., Zhang J., Singh S., Zhan Z., Guo C. Multipronged heat-exchanger based on femtosecond laser-nano/microstructured Aluminum for thermoelectric heat scavengers // Nano Energy. 2020. Vol. 75. P. 104987. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.104987
15. Luo C., Song K.W., Tagawa T. Heat transfer enhancement of a double pipe heat exchanger by co-twisting oval pipes with unequal twist pitches // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. Vol. 28. P. 101411. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101411
16. Lindqvist K., Skaugen G., Meyer O.H.H. Plate fin-and-tube heat exchanger computational fluid dynamics model // Applied Thermal Engineering. 2021. Vol. 189. P. 116669. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116669
17. Abu-Hamdeh N.H., Alsulami R.A., Rawa M.J.H., Aljinaidi A.A., Alazwari M.A., Eltaher M.A. et al. A detailed hydrothermal investigation of a helical micro double-tube heat exchanger for a wide range of helix pitch length // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. Vol. 28. P. 101413. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101413
18. Кунтыш В.Б., Сухоцкий А.Б., Яцевич А.В. Тепловая эффективность вихревой интенсификации теплоотдачи газового потока при продольном и поперечном обтекании круглотрубных поверхностей. Часть 1 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 3. С. 68–75. EDN TXJDOV.
19. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Корнев Н.В., Хассель Э., Чудновский Я.П. Интенсификация теплообмена при ламинарном и турбулентном течении в узком канале с однорядными овальными лунками // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 3. С. 390. DOI: 10.7868/S0040364415030060. EDN TQQVTX.
20. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Попов И.А., Судаков А.Г. Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 5. С. 797–800. DOI: 10.1134/S0040364419040082. EDN DSKPAK.
21. Никулин Н.Ю., Шеремет Е.О., Алифанова А.И., Яковлев В.А. Определение геометрии поверхности теплообмена измененной формы в кожухотрубном теплообменнике // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 6 (95). С. 117–124. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-6-117-124. EDN ZVKFRN.
22. Куцев Л.А., Никулин Н.Ю., Овсянников Ю.Г., Алифанова А.И. Современные способы интенсификации работы кожухотрубных теплообменных аппаратов систем теплоснабжения // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8. № 2 (25). С. 130–140. EDN USULIA.

Поступила в редакцию 26 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 2 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 15 мая 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Николай Юрьевич Никулин — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; SPIN-code: 5453-9273, ResearcherID: AAF-9961-2022, ORCID: 0000-0003-3433-3957; Nick_973gt@mail.ru;

Юлия Васильевна Елистратова — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова д. 46; РИНЦ ID: 853532, Scopus: 57201772844, ORCID: 0000-0003-1989-0632; tgv.info@mail.ru.

Вклад авторов:

Никулин Н.Ю. — научное руководство, обзор современного состояния вопроса, концепция исследования, разработка программы исследований и ее реализация, написание исходного текста, итоговые выводы.

Елистратова Ю.В. — обзор современного состояния вопроса, участие в разработке программы исследований и реализация, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. On the state of heat power engineering and centralized heat supply in the Russian Federation in 2020. *Heat Supply News*. 2022; 3(231):12-22. (rus.).
2. Zharov A.V., Pavlov A.A., Favstov V.S., Gorshkov R.V. Research of heat exchanger utilizers fulfilled gases of diesel cogeneration unit vehicle method of computer fluid dynamics. *Fundamental Research*. 2013; 10-15:3321-3327. EDN SWOBNV. (rus.).
3. Bukin V.G., Ho V.H. Improving heat transfer efficiency of shell and tube evaporators of marine refrigerating installations. *Vestnik AGTU. Marine engineering and Technology*. 2013; 1:90-94. EDN PWXXIN. (rus.).
4. Rădulescu S., Negoită L.I., Onuțu I. Analysis of the heat transfer in double and triple concentric tube heat exchangers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016; 147:012148. DOI: 10.1088/1757-899X/147/1/012148
5. Ajithkumar M.S., Ganesha T., Math M.C. Analysis to Study the Effects of Inclined Baffles on Fluid Flow in a Shell and Tube Heat Exchanger. *International Journal of Research in Advent Technology*. 2014; 2(7):164-175. DOI: 10.22055/jacm.2020.32925.2103
6. Mellal M., Benzeguir R., Sahel D., Ameer H. Hydro-thermal shell-side performance evaluation of a shell and tube heat exchanger under different baffle arrangement and orientation. *International Journal of Thermal Sciences*. 2017; 121:138-149. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.011
7. Swapnil S.K., Barve Shivprakash B. Effect of Different types of Baffles on Heat Transfer & Pressure Drop of Shell and Tube Heat Exchanger : a review. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2017; 7:358-362.
8. Gurram V.T., Rao K.V.N. Numerical investigation on heat transfer and fluid flow of shell-side for shell and tube heat exchanger with hexagonal vent baffle by using CFD. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017; 8(5):995-1009.
9. Patil P.C., Deshmukh M.S. Performance improvement of heat exchanger using slotted baffle. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2011; 5:161-164. DOI: 10.14741/ijcet/22774106/spl.5.6.2016.31
10. Pandey L., Singh S. Numerical analysis for heat transfer augmentation in a circular tube heat exchanger using a triangular perforated Y-shaped insert. *Fluids*. 2021; 6(7). DOI: 10.3390/fluids6070247
11. Xu S., Zheng J., Jian Y. Spiral tube type fused salt direct-flow heat exchanger. *State Intellectual Property Office of the P.R.C.* 2021; 185:95-101.
12. Xu W., Liu Z., Huang S., Zhuang Y. Evaluation and development of a predictive model for conjugate phase change heat transfer of energy storage system partially filled with porous media. *Energy Storage and Saving*. 2022; 1(4):293-308. DOI: 10.1016/j.enss.2022.08.001
13. Kruglov G.A., Bakunin V.V., Andreeva M.V. Theoretical studies of the interrelation of the flow turbulization degree with the heat irradiation coefficient. *Bulletin of KrasSAU*. 2015; 6(105):67-73. EDN UDTLYH. (rus.).
14. Jalil S.A., ElKabbash M., Zhang J., Singh S., Zhan Z., Guo C. Multipronged heat-exchanger based on femtosecond laser-nano/microstructured Aluminum for thermoelectric heat scavengers. *Nano Energy*. 2020; 75:104987. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.104987
15. Luo C., Song K.W., Tagawa T. Heat transfer enhancement of a double pipe heat exchanger by Co-Twisting oval pipes with unequal twist pitches. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021; 28:101411. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101411
16. Lindqvist K., Skaugen G., Meyer O.H.H. Plate fin-and-tube heat exchanger computational fluid dynamics model. *Applied Thermal Engineering*. 2021; 189:116669. DOI: 10.1016/j.appltherm-eng.2021.116669
17. Abu-Hamdeh N.H., Alsulami R.A., Rawa M.J.H., Aljinaidi A.A., Alazwari M.A., Eltaher M.A. et al. A detailed hydrothermal investigation of a helical micro double-tube heat exchanger for a wide range of helix pitch length. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021; 28:101413. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101413
18. Kunttysh V.B., Sukhotskiy A.B., Yatsevich A.V. Thermal effectiveness of the gas flow vortical heat-release intensification at axial and transversal flowing-around the round-tubular surfaces. Part 1. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2015; 3:68-75. EDN TXJDOV. (rus.).
19. Isaev S.A., Leontiev A.I., Kornev N.V., Hassel E., Chudnovskii Y.P. Heat transfer intensification for laminar and turbulent flows in a narrow channel with one-row oval dimples. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2015; 53(3):390. DOI: 10.7868/S0040364415030060. EDN TQQVTX. (rus.).
20. Isaev S.A., Popov I.A., Gritkevich M.S., Sudakov A.G., Leontiev A.I. Anomalous intensification of a turbulent separated flow in inclined, single-row, oval-trench dimples on the wall of a narrow channel. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2019; 57(5):797-800. DOI: 10.1134/S0040364419040082. EDN DSKPAK. (rus.).
21. Nikulin N.U., Sheremet E.O., Alifanova A.I., Yakovlev V.A. Determining the geometry of the modified shape heat transfer surface in the shell-and-tube heat exchanger. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 6(95):117-124. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-6-117-124. EDN ZVKFRN. (rus.).

22. Kushchev L.A., Nikulin N.Yu., Ovsyanikov Yu.G., Alifanova A.I. Modern methods for the intensification of shell and tube heat exchangers in heat supply systems. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*. 2018; 8(2):(25):130-140. EDN USULIA. (rus.).

Received April 26, 2023.

Adopted in revised form on May 2, 2023.

Approved for publication on May 15, 2023.

BIONOTES: **Nikolaj Yu. Nikulin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 5453-9273, ResearcherID: AAF-9961-2022, ORCID: 0000-0003-3433-3957; Nick_973gt@mail.ru;

Yuliya V. Elistratova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; ID RSCI: 853532, Scopus: 57201772844, ORCID: 0000-0003-1989-0632; tgv.info@mail.ru.

Authors' contribution:

Nikolaj Yu. Nikulin — scientific management, review of the current state of the issue, research concept, development of a research program and its implementation, writing the original text, final conclusions.

Yuliya V. Elistratova — review of the current state of the issue, participation in the development of the research program and implementation, text revision, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

Анализ перспектив применения материалов с фазовым переходом в строительных конструкциях

Александр Валерьевич Федюхин¹, Ольга Валерьевна Афанасьева²,
Марк Дмитриевич Зайцев¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Задачей исследования является анализ перспектив применения материалов с фазовым переходом (МФП) в строительных конструкциях. Актуальность обусловлена отраслевой тенденцией на снижение потребления тепловой энергии зданиями за счет применения современных теплоизоляционных материалов и ограждающих конструкций. В качестве объекта исследования выбраны МФП, производимые в промышленных объемах и применяемые в строительстве в зарубежных странах. Способность данных материалов поглощать и выделять тепловую энергию может быть использована для улучшения тепловых характеристик зданий. Анализ возможности применения МФП в строительных конструкциях проведен для трех городов Российской Федерации: Москвы, Санкт-Петербурга и Сочи.

Материалы и методы. Оценка эффективности использования МФП в строительных конструкциях выполнена посредством энергетического моделирования здания по алгоритму Conduction Finite Difference в программе EnergyPlus с учетом климатических условий и потребления энергии на отопление и охлаждение здания. Расчет осуществлен для конструкций, включающих МФП (три различных материала с фазовым переходом), и без них.

Результаты. Определены значения потребления энергии на отопление и охлаждение помещения, абсолютная и относительная экономия энергии от применения МФП.

Выводы. Проведенный анализ показал, что энергетический и экономический эффект от применения МФП в строительных конструкциях составляет от 2 до 13 % и зависит как от типа материала, так и от региона применения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: материалы с фазовым переходом, энергоэффективность, аккумулирование тепловой энергии, строительные конструкции, EnergyPlus, энергопотребление, теплофизические свойства, температура фазового перехода

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № 075-01262-22-01 от 28.01.2022 (дополнительное соглашение № 075-03-2022-151/1 от 31.01.2022, № 075-03-2023-291/1 от 28.02.2023). Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за содержательную рецензию и редактору, помогающему оформить статью.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федюхин А.В., Афанасьева О.В., Зайцев М.Д. Анализ перспектив применения материалов с фазовым переходом в строительных конструкциях // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1977–1988. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1977-1988

Автор, ответственный за переписку: Ольга Валерьевна Афанасьева, eccolga@mail.ru.

Analysis of the prospects of phase change materials in building structures

Alexander V. Fedyukhin¹, Olga V. Afanaseva², Mark D. Zaitsev¹

¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI); Moscow, Russian Federation;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The objective of the study is to analyze the prospects of application of phase change materials in building structures. The relevance of the work is due to the industry trend to reduce the consumption of heat energy by buildings through the use of modern thermal insulation materials and enclosing structures. Phase change materials produced in industrial volumes and used in construction in foreign countries are chosen as the object of research. The ability of these materials to absorb and release heat energy can be used to improve the thermal characteristics of buildings. Analysis of the possibility of using these materials in building structures was carried out for three cities of the Russian Federation: Moscow, St. Petersburg and Sochi.

Materials and methods. The efficiency of the use of phase change materials in building structures was carried out by means of energy modelling of the building using the Conduction Finite Difference algorithm in the EnergyPlus programme, taking into account climatic conditions and energy consumption for heating and cooling of the building. The calculation was performed for structures including phase change materials (3 different materials with phase change), and without them.

Results. The values of energy consumption for space heating and cooling, absolute and relative energy savings from the use of phase change materials were determined.

Conclusions. The analysis showed that the energy and economic effect from the application of materials with phase change in building structures is from 2 to 13 % and depends on both the type of material and the region of application.

KEYWORDS: phase change materials, energy efficiency, heat energy storage, building structures, EnergyPlus, energy consumption, thermophysical properties, phase transition temperature

Acknowledgements. This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-01262-22-01 from 28 January 2022 (Additional agreement 075-03-2022-151/1 from 31 January 2022, No. 075-03-2023-291/1 from 28.02.2023). The authors are grateful to the anonymous reviewer for the informative review and the editor who helps to prepare the article.

FOR CITATION: Fedyukhin A.V., Afanaseva O.V., Zaitsev M.D. Analysis of the prospects of phase change materials in building structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1977-1988. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1977-1988 (rus.).

Corresponding author: Olga V. Afanaseva, eccolga@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из актуальных задач, стоящих в том числе перед отраслью жилищно-коммунального хозяйства, — решение вопросов энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий. В этом аспекте одним из возможных решений, которое позволяет снизить энергопотребление зданий, является использование в конструкциях помещений материалов с фазовым переходом (МФП).

Материалы с фазовым переходом представляют собой класс веществ, которые могут подвергаться обратимым фазовым переходам между твердой и жидкой фазами в определенном диапазоне температур. Во время фазового перехода материал поглощает или выделяет большое количество скрытой теплоты, не испытывая значительного изменения температуры.

Сохранение скрытой теплоты может быть достигнуто путем изменения состояния вещества из жидкого в твердое, твердого в жидкое, твердого в газообразное и жидкого в газообразное. Однако для МФП практически применимы только фазовые переходы: твердое → жидкое и жидкое → твердое. Хотя переходы жидкость → газ имеют более высокую теплоту превращения, чем переходы твердое тело → жидкость, фазовые переходы жидкость → газ нецелесообразны для аккумуляции тепла, поскольку для хранения материалов в их газовой фазе требуются большие объемы или высокое давление. Переходы между твердыми фазами обычно очень медленные и имеют относительно низкую теплоту превращения.

Аккумуляции тепловой энергии с использованием МФП уделяется значительное внимание в последние десятилетия. Преимущества применения МФП — относительно высокая объемная и массовая плотность хранения тепловой энергии (в 5–14 раз выше по сравнению с аккумулялирующими жидкостями [1]), постоянная температура фазового перехода, химическая стабильность и экономическая эффективность. Свойства таких веществ должны отвечать следующим требованиям:

- температура фазового перехода МФП находится в диапазоне рабочей температуры системы

охлаждения или нагрева, давление близко к атмосферному;

- высокая удельная теплота плавления;
- высокая теплопроводность;
- высокая плотность;
- незначительное изменение объема во время фазового перехода;
- низкая степень переохлаждения;
- невысокая коррозионная активность по отношению к конструкционным материалам;
- химическая стабильность, отсутствие деградации в процессе эксплуатации и стабильность циклов фазовых переходов;
- нетоксичность и негорючесть;
- экологическая безопасность, в первую очередь, нулевые или близкие к нулевым потенциалы разрушения озонового слоя и глобального потепления;
- доступность и невысокая стоимость [2].

Поскольку материала, который одновременно удовлетворял бы всем положительным критериям, не существует, выбор МФП — это компромисс между его положительными и отрицательными качествами. При анализе свойств и определении технико-экономической целесообразности их применения для накопления тепловой энергии следует учитывать, что параметры работы систем охлаждения или нагрева, схемные решения могут усиливать влияние на эффективность установок и свойства веществ и нивелировать их отрицательные качества.

Существует два основных класса МФП: органические (углеродсодержащие) материалы и гидраты солей. Отдельно выделяют эвтектики (эвтектические смеси жирных кислот и гидратов солей), которые могут как полностью состоять из органических или неорганических соединений, так и содержать органику и неорганику одновременно.

Примеры органических МФП включают карбонаты, некоторые жирные кислоты, парафины, полимеры. Органические МФП обычно дороже неорганических, большинство парафинов являются побочными продуктами нефтеперерабатывающих заводов и поэтому доступны в изобилии, но по относительно высокой цене. Органические МФП имеют

меньшую скрытую теплоту и часто больший диапазон плавления, но зачастую горючи. Теплопроводность также уступает гидратированным солям, что ограничивает теплообмен, скорость зарядки и разрядки тепловых аккумуляторов. Методы интенсификации теплоотдачи включают диспергирование частиц (медь, алюминий, графит и т.д.) в МФП, его пропитку высокопроводящими пористыми материалами (графитовая матрица или металлические пены) или вставку волокнистых материалов, таких как углеродные волокна или нановолокна. С другой стороны, они имеют преимущества, заключающиеся в простоте использования, химической стабильности, неагрессивности, меньшем изменении объема во время фазового перехода, отсутствии явлений переохлаждения (разность температур фазовых переходов «твердое тело – жидкость» и «жидкость – твердое тело»).

Более того, некоторые органические МФП, например жирные кислоты, можно получить из возобновляемого или повторно используемого сырья, такого как животный жир и растительность, например говяжий жир, сало, пальмовое масло, кокосовое масло и соевые бобы (МФП на биологической основе). Преимущества жирных кислот включают конгруэнтное плавление и охлаждение, высокую скрытую теплоту плавления, низкую стоимость, огнестойкость, нетоксичность, незначительное переохлаждение и изменение объема, хорошую химическую и термическую стабильность после большого количества термических циклов и быстрое разложение при утилизации, что уменьшает воздействие на окружающую среду в конце срока службы. Помимо этого, температуру плавления можно свободно регулировать, выбирая правильную комбинацию эвтектических смесей. Наконец, МФП на жировой и масляной основе могут быть вдвое дешевле, чем парафиновые, которые в настоящее время производятся из сырой нефти, а в процессе их производства выделяется гораздо меньше выбросов CO_2 .

Гидратам солей и эвтектикам посвящено много исследований в силу относительно больших величин их удельной теплоты фазового перехода, теплопроводности (0,4–0,7 Вт/(м·К)) и плотности хранения энергии, а также приемлемым температурным диапазоном изменения фаз. Они не подвержены горению и недорого. К их главным недостаткам относятся: расслаивание на границе раздела фаз при фазовых переходах, что приводит к нестабильности циклов фазовых переходов, относительно большие значения переохлаждения и коррозия. Наличие продуктов коррозии в композициях также может приводить к нарушению стабильности циклов [3].

Как органические, так и неорганические материалы получают значительные преимущества при применении нанотехнологий, и в настоящее время ведутся более многообещающие разработки. Включение наноматериалов может значительно улучшить

некоторые характеристики накопления тепла, такие как теплопроводность (особенно для органических МФП с худшими характеристиками), скорость замерзания/плавления и термостабильность.

Органические МФП выигрывают от добавления наноматериалов, таких как наночастицы меди, серебра, графена или графитовые нановолокна. Добавки обеспечивают повышение теплопроводности и скорости фазового перехода за счет незначительных потерь скрытой энтальпии. Например, добавление 2 % наночастиц графена увеличивает проводимость на 63 %, но снижает энтальпию фазового перехода на 8,7 % [4]. Что касается гидратированных солей, то добавление наночастиц в основном исследуется как метод устранения явлений переохлаждения, но может иметь положительные преимущества и в отношении других факторов. В случае хлорида бария добавление 1,13 % наночастиц диоксида титана приводит к увеличению теплопроводности на 15,65 %, повышению скоростей замерзания и плавления.

В целом применение наноматериалов для МФП может быть полезным с точки зрения улучшения характеристик накопления тепла, достижения производства материалов с желаемыми тепловыми, физическими и химическими свойствами и снижения воздействия на окружающую среду. Однако, как и при всех технологических прорывах, возникает ряд проблем, таких как правильная и безопасная утилизация или выгрузка синтетических наноматериалов и связанных с ними побочных продуктов, опасный характер некоторых химических компонентов, необходимых для приготовления наноматериалов, проблемы агломерации и агрегации наночастиц в суспензиях МФП, проблемы безопасности, связанные с контактом человека с наночастицами, и отсутствие стандартизации в характеристике улучшения производительности нановстроенных МФП.

Конечное потребление энергии в жилых домах в 2018 г. составило более 70 % от общемирового. В европейских странах на долю многоквартирных домов приходится почти половина всего жилищного фонда [5]. По данным Федеральной службы государственной статистики России на начало 2021 г. около 70 % населения страны проживало в многоквартирных домах. Высотные здания часто сталкиваются с серьезными проблемами с точки зрения энергоэффективности. Одной из наиболее распространенных причин является температурный дискомфорт в помещении, вызванный ежедневными колебаниями температуры. Значительные перепады температур в умеренной климатической зоне приводят к высоким энергозатратам на кондиционирование воздуха или отопление. Более того, большое влияние имеет расположение квартиры относительно сторон света. В частности, ориентация здания влияет на приток тепла солнечным излучением.

Среди методов, которые могут снизить энергопотребление здания, выделяется использование материалов с фазовым переходом. Использование МФП в зданиях снижает потребление энергии от источников тепла за счет использования теплоты, которая поглощается или выделяется посредством фазовых переходов при определенных температурах. Один из способов заключается в том, чтобы смешивать МФП непосредственно со строительными материалами. Существуют исследования, посвященные повышению энергоэффективности путем применения таких материалов как для внутренних работ, так и для наружных стен или крыш [6–10].

В статье [11] рассматриваются возможности использования материалов с фазовым переходом в строительстве для улучшения терморегуляции зданий. Авторы представляют новый подход к созданию кирпичей с МФП, который может применяться для повышения энергоэффективности зданий. Экспериментально определяется теплопроводность и теплоемкость новых кирпичей с МФП, а также с помощью моделирования их термической производительности. Были проведены эксперименты при различных температурах и скоростях нагрева/охлаждения. В результате авторы пришли к выводу, что созданные кирпичи с МФП обладают высокой термической инерцией, что может привести к более эффективному использованию энергии для отопления и охлаждения зданий. Они также обнаружили, что теплоемкость кирпичей с МФП значительно выше, чем у обычных кирпичей. Кроме того, при использовании кирпичей с МФП наблюдалось более равномерное распределение температуры внутри здания.

В работе [12] описывается экспериментальное исследование использования материалов с фазовым переходом для снижения нагрева крыши зданий в климатических условиях Кувейта. Предлагается использовать бетонную крышу с цилиндрическими отверстиями, заполненными МФП, для увеличения теплоемкости крыши и снижения температуры внутри здания. Эксперимент проводился на двух крышах, одна из которых была традиционной, другая — модифицированной. Результаты эксперимента показали, что температура внутри модифицированной крыши была на несколько градусов ниже, чем в традиционной. Кроме того, использование МФП снизило время нагрева и охлаждения крыши. Для рассмотренных в работе случаев тепловой поток на внутренней поверхности крыши снижался на 9–17 % в зависимости от выбранного МФП, времени и месяца.

Статья [13] посвящена изучению возможности прямого включения бутилстеарата в качестве МФП в состав бетона для увеличения энергоэффективности зданий. В ходе эксперимента были изготовлены образцы бетона с различным содержанием МФП (от 1 до 10 %) и проведены тесты на определение

теплоемкости, теплопроводности и коэффициента теплоотдачи. Результаты показали, что добавление материалов с фазовым переходом в бетон может значительно увеличить его теплоемкость и задерживать тепло на длительное время. Также была проверена долгосрочная стабильность бутилстеарата. Испытание на термоциклирование показало, что после 800 циклов температура плавления осталась постоянной. Потери прочности на сжатие были значительными с увеличением содержания МФП. Однако бетон с содержанием бутилстеарата до 5 % масс. имел прочность на сжатие 40 Н/мм², что составляет выше рекомендуемого значения для большинства конструктивных целей.

Ученые F. Goia, M. Perino и V. Serra [14] выполнили полномасштабное испытание прототипа остекления с МФП. Испытание проведено на южной стене летом, зимой и в межсезонье. Результаты сравнивались с обычным двойным остеклением. Определено, что остекление МФП способно снизить потребление энергии летом на 20–55 %. Зимой подобная технология была менее эффективна. Однако, когда парафин полностью плавится слишком рано, то температура оконных стекол и поступающие тепловые потоки значительно увеличиваются и могут в определенной степени ухудшить работу оконной системы. Необходимо принимать во внимание и тепло, выделяемое остеклением МФП в ночное время. Такая тепловая энергия в определенных условиях может быть нежелательна и должна быть удалена до следующего дня. Этот факт показывает, что нельзя просто использовать современные материалы, требуются также подходящие стратегии интеграции с существующими системами в здании (например, вентиляция/ночное охлаждение).

Несмотря на то что несколько параметров обеспечивают эффективность МФП, почти во всех исследованиях приходят к выводу, что температура плавления является наиболее важным. Следовательно, необходимо учитывать климатические условия. Значительно осложняет подбор и применение материалов с фазовым переходом в реальных условиях серьезных изменений климатических факторов в течение года, особенно в умеренном поясе.

В то время как основная задача МФП предназначена для снижения летнего перегрева, нельзя пренебрегать их влиянием на регулирование температуры в зимний и переходный периоды. Одной из проблем интеграции МФП в зданиях является оптимизация материала для работы в течение всего года, поскольку исследования показали, что материалы с температурой плавления, выбранной на основе летних граничных условий, не работают в другие сезоны. В публикациях [15–17] также рассмотрели недостаточную эффективность одной точки плавления МФП для работы в течение всего года и предложили оптимизировать МФП использованием гибридных систем с двумя или более точками плав-

ления. Например, М. Kheradmand и др. [18] представили гибридный раствор МФП, использующий четыре различные температуры плавления. Предлагаемый гибридный раствор МФП был разработан с учетом более широкого диапазона температур плавления, чтобы соответствовать тепловым условиям зимой и летом в климате Португалии. В труде [19] протестировали применение двух различных температур плавления МФП в модуле адаптивного фасада. Один слой МФП ближе к внешней стороне фасадного модуля с температурой плавления 27 °С для летнего сезона, другой слой МФП ближе к внутренней стороне с температурой плавления 23 °С для зимних условий.

В исследовании [20] проанализирован эффект от применения МФП при реконструкции многоэтажного жилого дома в климате Торонто и Ванкувера. В моделировании использовано здание с наружными стенами из панелей с экструдированным пенополистиролом, каждый этаж состоял из четырех комнат размером 5 × 5 × 3 м. Использован МФП с температурой плавления 25 °С, и выполнены три комбинации: без МФП, с МФП на полу и с МФП на полу и стенах. В расчетах также была учтена работа приточной вентиляции. Результаты показали, что использование МФП на полу и стенах может привести к экономии энергии на охлаждение от 15,8 до 59,4 % в зависимости от климата и ориентации комнаты. Применение МФП в зимний период привело только к небольшому снижению спроса на отопление (не более 6 %).

Другое исследование, проведенное S. Soudian и U. Berardi [21], рассматривало совместную работу МФП и панелей Energain, имеющих разные температуры плавления, в ячейках, представляющих собой уменьшенные версии квартир. Материалы с фазовым переходом были интегрированы в стены и потолок. Результаты эксперимента показали, что использование МФП и панелей Energain привело к снижению температуры воздуха в тестовой ячейке на 47 % днем и повышению на 29 % ночью по сравнению с контрольной ячейкой. Так как среднегодовые температуры Москвы и Торонто практически не отличаются, то это позволяет экстраполировать результаты исследования на нашу страну.

Актуальность работы обусловлена отраслевой тенденцией на снижение потребления тепловой энергии зданиями за счет применения современных теплоизоляционных материалов и ограждающих конструкций. На основании обзора литературных источников можно заключить, что зарубежными специалистами уделяется повышенное внимание синтезу различных МФП для применения их в строительных конструкциях в качестве тепловой изоляции и накопителя тепловой энергии. Цель настоящего исследования заключается в анализе эффективности применения данных материалов в условиях климата, характерного для различных

регионов европейской части РФ. Понятие эффективность в данном контексте характеризуется величиной снижения потребления энергии на нужды отопления или охлаждения здания в соответствующий период года. Для достижения данной цели была построена модель здания в программе EnergyPlus с расчетом его теплопотребления в Москве, Санкт-Петербурге и Сочи. При этом вопросы непосредственно синтеза МФП лежат вне рамок настоящего исследования, для расчета приняты теплофизические свойства трех образцов на основании литературных источников.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки эффективности применения МФП в некоторых регионах России было проведено энергетическое моделирование зданий в программе EnergyPlus, расположенных в Москве, Санкт-Петербурге и Сочи, с учетом климатических условий и потребления энергии на отопление и охлаждение здания. С помощью OpenStudio построена геометрия здания площадью 450 м² со стенами длиной 30 м, шириной 15 м и высотой 5 м. В здании имеется 12 квадратных окон площадью 2,25 м² каждое и двое металлических ворот общей площадью 32 м². На рис. 1 представлено изображение построенной геометрии.

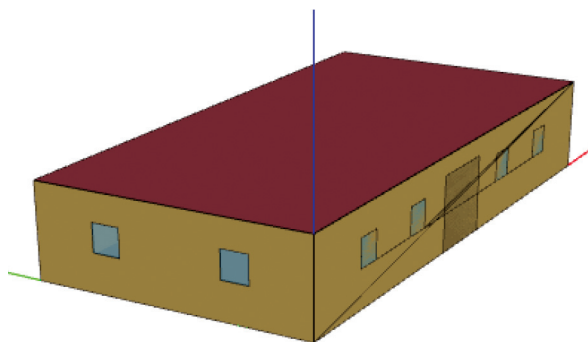


Рис. 1. Изображение геометрии здания

Fig. 1. Image of the building geometry

В качестве материала стен был взят кирпич рядовой керамический полнотелый М100 красный (250 × 120 × 65 мм), толщина стен — 250 мм, коэффициент теплопроводности — 0,572 Вт/м·К. На внутреннюю поверхность стены была нанесена штукатурка известковая слоем толщиной 20 мм, коэффициент теплопроводности — 0,7 Вт/м·К. Для крыши, окон и металлических ворот использовались стандартные конструкции для исследуемой климатической зоны, представленные в библиотеке компонентов программы.

Условно принято, что помещение является производственным. Соответственно, требовалось

задать необходимые нагрузки, такие как: мощность электрооборудования, освещения и количество теплоты, выделяемое людьми во время работы. Мощность электрооборудования задана 4000 Вт, мощность освещения — 1400 Вт. Количество людей, постоянно работающих в помещении, принято равным четырем. Каждый из них выделяет 132 Вт тепловой энергии.

Предположим, что в будние дни с 8:00 до 18:00 в помещении находится персонал. Значит, для освещения и функционирования электрооборудования задается такое расписание, что они работают только в этот промежуток времени. Таким же образом задано расписание для естественной вентиляции помещения, с той лишь разницей, что если температура в помещении достигает 20 °С, то вентиляция прекращается. Вне отопительного сезона вентиляция работает на половину мощности в нерабочее время, кроме выходных. Время для отопительного сезона выбрано с 1 октября по 1 мая. В модели реализована центральная система отопления с температурой подающего трубопровода — 95 °С, обратного — 70 °С, пиковая мощность составляет 50 кВт, что позволяет температуре в самую холодную пятидневку не опускаться ниже 20 °С в любом из регионов. Также до-

бавлена возможность регулирования мощности для поддержания установленной температуры в 22 °С.

В здании установлена система кондиционирования с автоматически подбираемой мощностью для текущих условий. Она может работать только вне отопительного сезона и настроена таким образом, что включается в случае, если температура помещения превышает 22 °С, и выключается, когда охладит помещение до 20 °С. Система доступна только в то время, когда в здании находятся люди, соответственно, она имитирует ручное управление кондиционером.

В расчете сравнивалось три различных МФП, производимых в промышленных объемах и применяемых в строительстве. Характеристики материалов были приняты на основании статьи [22]. Показатели в объеме, необходимом для моделирования, приведены в табл. 1.

Поскольку объектом исследования являются материалы, основное преимущество которых заключено в способности аккумулировать тепло, то для корректных результатов в модели требуется учитывать значительное изменение энтальпии при нагреве. На рис. 2 показана зависимость энтальпии материала от его температуры, которая определяет функцию энтальпия – температура [22]:

$$h_i(T_i) = HTF(T_i). \quad (1)$$

Табл. 1. Теплофизические свойства МФП

Table 1. Thermophysical properties of PCM

Вид материала [22] Type of material [22]	Свойства материала* [22] / Material properties* [22]		
	λ , Вт/м·К / λ , W/m·K	C_p , кДж/кг·К / C_p , kJ/kg·K	ρ , кг/м ³ / ρ , kg/m ³
МФП 1 / PCM 1	0,14–0,18	2,5	855
МФП 2 / PCM 2	0,125–0,2	2,1	860
МФП 3 / PCM 3	0,9–1,1	2,65	1440

Примечание: * λ — коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; C_p — изобарная теплоемкость, кДж/кг·К; ρ — плотность, кг/м³.

Note: * λ — heat conductivity coefficient, W/m·K; C_p — isobaric heat capacity, kJ/kg·K; ρ — density, kg/m³.

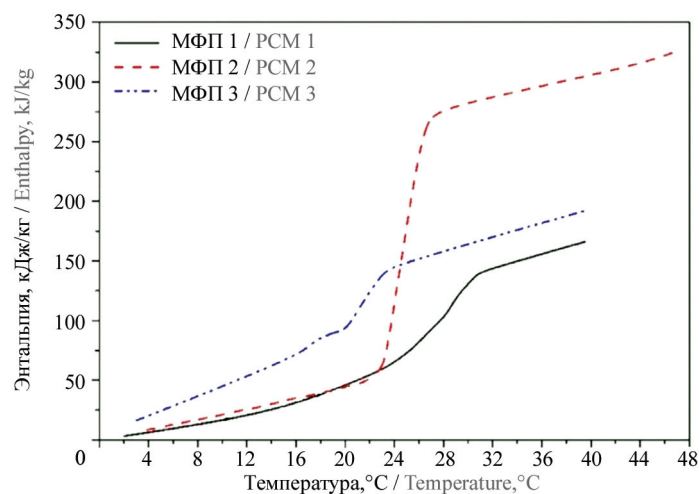


Рис. 2. Зависимость энтальпии МФП от температуры

Fig. 2. PCM enthalpy dependence on temperature

Эквивалентная удельная теплоемкость, как функция температуры $C_p(T)$, также определяется для трех типов МФП на каждой итерации расчета. $C_p(T)$ можно описать следующим уравнением:

$$C_p(T) = \frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{T_i^{j+1} - T_i^j}, \quad (2)$$

где h_i — энтальпия узла; T_i — температура узла; i — моделируемый узел; j — текущий узел.

На основе выводов, сделанных авторами работы [22], было принято решение разместить МФП в модели посередине кирпичной кладки. На рис. 3 продемонстрирован вид сечения стены, где слева — внутренняя стена, справа — внешняя, пропорции

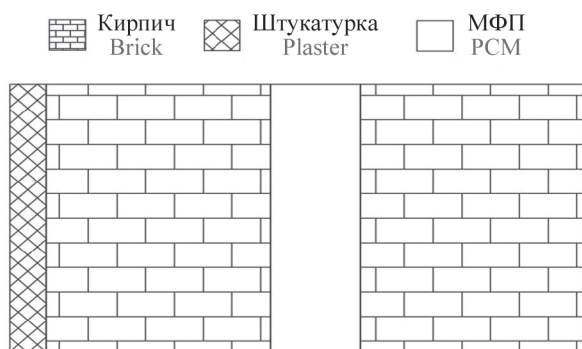


Рис. 3. Сечение стены

Fig. 3. Sectional view of the wall

соблюдены. Одним из способов, как это может быть реализовано на практике, является заполнение пустотелого кирпича. Исследование этой возможности приведено в работе [23]. Также МФП был размещен в качестве внутреннего покрытия крыши. Толщина слоя для обеих конструкций составила 5 см.

В EnergyPlus существует алгоритм Conduction Finite Difference, позволяющий рассчитывать материалы с фазовым переходом. Алгоритм применяет неявную схему конечных разностей, связанную с функцией энтальпия – температура, которая использует значения, заданные пользователем, для учета энергии фазового перехода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

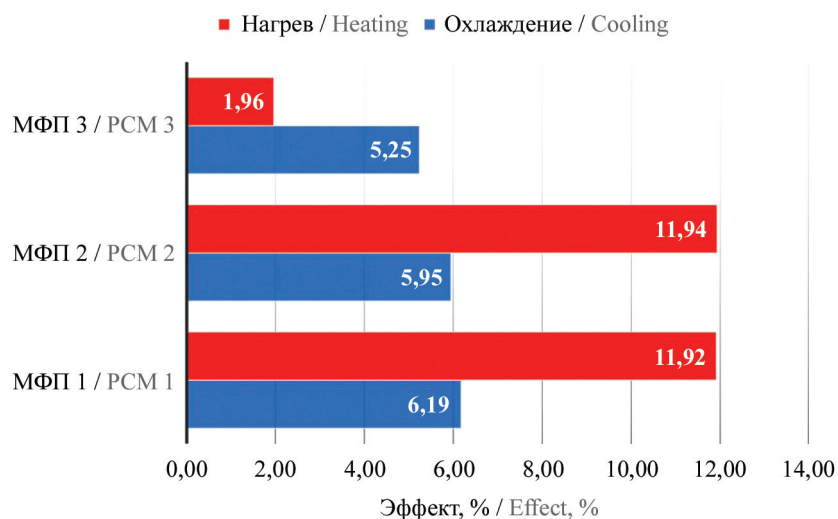
Значения потребления энергии на отопление и охлаждение помещения для трех городов России представлены в табл. 2. Также определена абсолютная и относительная экономия энергии от применения МФП. Стоит отметить, что энергия на охлаждение — электрическая, тогда как на нагрев — тепловая. Это обосновано тем, что система отопления смоделирована как центральная, соответственно, затраты энергии на нагрев теплоносителя до требуемых температур и его прокачку в трубы и радиаторы не учитываются.

На рис. 4 приведены диаграммы, построенные на основе данных, представленных в табл. 2.

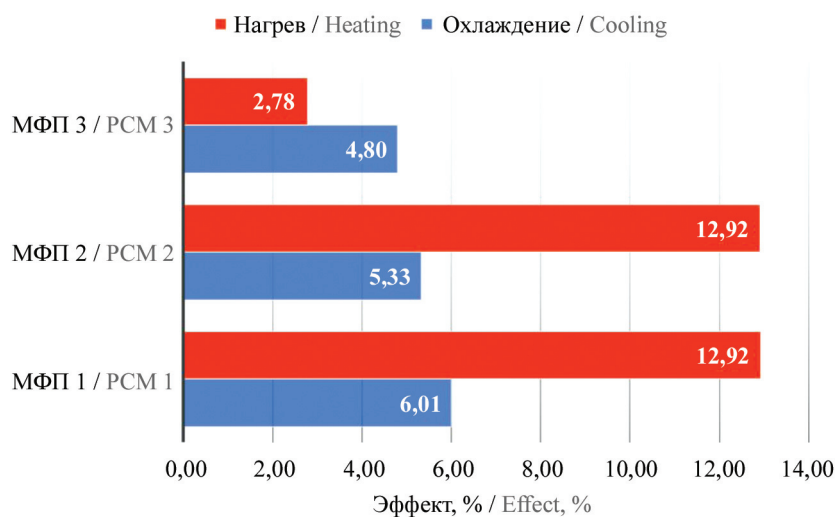
Табл. 2. Результаты расчета

Table 2. Calculation results

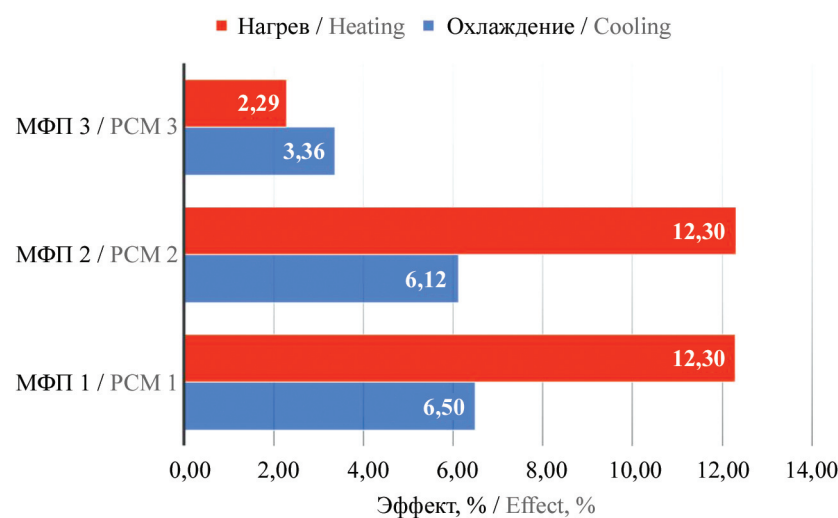
Материал Material	Количество энергии, ГДж/год Quantity of energy, GJ/year		Экономия, % Savings, %		Экономия, ГДж/год Savings, GJ/year		
	Охлаждение Cooling	Нагрев Heating	Охлаждение Cooling	Нагрев Heating	Охлаждение Cooling	Нагрев Heating	Суммарная Total
<i>Москва / Moscow</i>							
Без МФП Without PCM	12,77	378,76	–	–	–	–	–
МФП 1 / PCM 1	11,98	333,60	6,19	11,92	0,79	45,16	45,95
МФП 2 / PCM 2	12,01	333,54	5,95	11,94	0,76	45,22	45,98
МФП 3 / PCM 3	12,1	371,33	5,25	1,96	0,67	7,43	8,10
<i>Санкт-Петербург / St. Petersburg</i>							
Без МФП Without PCM	13,08	390,68	–	–	–	–	–
МФП 1 / PCM 1	12,23	342,64	6,50	12,30	0,85	48,04	48,89
МФП 2 / PCM 2	12,28	342,61	6,12	12,30	0,80	48,07	48,87
МФП 3 / PCM 3	12,64	381,75	3,36	2,29	0,44	8,93	9,37
<i>Сочи / Sochi</i>							
Без МФП Without PCM	13,32	307,15	–	–	–	–	–
МФП 1 / PCM 1	12,52	267,47	6,01	12,92	0,80	39,68	40,48
МФП 2 / PCM 2	12,61	267,48	5,33	12,92	0,71	39,67	40,38
МФП 3 / PCM 3	12,68	298,60	4,80	2,78	0,64	8,55	9,19



a



b



c

Рис. 4. Сравнение экономии энергии от использования МФП 1, 2 и 3 в: *a* — Москве; *b* — Сочи; *c* — Санкт-Петербурге

Fig. 4. Comparison of energy savings from the use of PCM 1, PCM 2 and PCM 3 in the cities: *a* — Moscow; *b* — Sochi; *c* — St. Petersburg

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что МФП 3 значительно отстает от конкурентов. Наибольшая относительная экономия для системы охлаждения составила 5,25 % в Москве, для отопления — 2,78 % в климатических условиях Сочи, что в несколько раз хуже, чем у других материалов. По большей части это связано с тем, что коэффициент теплопроводности у этого материала ощутимо выше в сравнении с аналогами. Два других материала позволяют сэкономить до 12–13 % на отоплении.

Также можно отметить тот факт, что суммарная электроэнергия на охлаждение помещения практически не зависит от метеорологических условий. В действительности это значение складывается из двух составляющих — энергия на подготовку воздуха и на его прокачку вентиляторами. Энергия на охлаждающий элемент кратно отличается в зависимости от климата, например, если МФП отсутствует, то в Санкт-Петербурге будет потрачено на охлаждение 1 ГДж/год, в Москве — 1,54 ГДж/год, в Сочи — 3,96 ГДж/год. Тем не менее в итоге это практически полностью компенсируется увеличенными затратами на привод вентиляторного оборудования. Это может быть связано с разной влажностью, скоростью ветра и другими параметрами, которые могут сильно отличаться от одной климатической зоны к другой.

При более детальном анализе можно заметить, что результаты расчетов между МФП 1 и 2 практи-

чески не отличаются, хотя у них разная энтальпия фазового перехода. На наш взгляд, это объясняется тем, что влияние фазового перехода при заданных параметрах модели незначительно. Для проверки этого предположения в одной из итераций расчета значения всех параметров, как и алгоритм расчета, остались прежними, но был удален объект, отвечающий за изменение энтальпии при повышении температуры, т.е. из материалов с фазовым переходом они превратились в обычную тепловую изоляцию.

В результате анализа полученных данных выявлено, что влияние именно фазового перехода для МФП 1 и 2 на тепловой баланс здания незначительно. В зависимости от региона разница в среднем составляет 0,1 %. Поскольку наибольшего эффекта 0,24 % удалось добиться в самом теплом регионе, т.е. в г. Сочи, можно сделать вывод, что температура фазового перехода рассматриваемых материалов сравнительно высока и их применение в РФ возможно только после положительных результатов комплексной технико-экономической оценки. Представленные расчеты показали, что эффективность применения типовых МФП, доступных на зарубежном рынке, в российских условиях, как правило, ниже прогнозируемых величин. Таким образом, актуальным научно-техническим направлением является разработка МФП с теплофизическими характеристиками, отвечающими различным регионам страны с учетом соответствующих сезонных температур окружающего воздуха.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Veerakumar C., Sreekumar A.* Phase change material based cold thermal energy storage: materials, techniques and applications — A review // *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 67. Pp. 271–289. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.12.005
2. *Бараненко А.В., Кузнецов П.А., Захарова В.Ю., Цой А.П.* Применение веществ с фазовыми переходами для аккумулирования тепловой энергии // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 6. С. 990–1000. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000. EDN YQZIDJ.
3. *Li G., Hwang Y., Radermacher R.* Review of cold storage materials for air conditioning application // *International Journal of Refrigeration*. 2012. Vol. 35. Issue 8. Pp. 2053–2077. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.06.003
4. *Marco C.* Phase-change materials // *Smart Buildings*. 2016. Pp. 179–218. DOI: 10.1016/B978-0-08-100635-1.00005-8
5. *Park J.H., Berardi U., Chang S.J., Wi S., Kang Y., Kim S.* Energy retrofit of PCM-applied apartment buildings considering building orientation and height // *Energy*. 2021. Vol. 222. P. 119877. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119877
6. *Park J.H., Kang Y., Lee J., Wi S., Chang J.D., Kim S.* Analysis of walls of functional gypsum board added with porous material and phase change material to improve hygrothermal performance // *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 183. Pp. 803–816. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.11.023
7. *Beltran R.D., Martínez-Gomez J.* Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 24. P. 100726. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.02.018
8. *Рёсснер Ф., Рудаков О.Б., Альбинская Ю.С., Иванова Е.А., Перцев В.Т.* Применение микрокапсулированных теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом в строительстве // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения*. 2012. № 5. С. 64–70. EDN PCQKAB.

9. Назиров Р.А., Тахтобин А.В. Материалы с изменяющимся фазовым состоянием в ограждающих конструкциях // Строительство и реконструкция. 2019. № 6 (86). С. 66–85. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-86-6-66-85. EDN XMLMJZ.

10. Казарова Е.А., Перцев В.Т., Усачев С.М. Возможность применения веществ с фазовым переходом для различных строительных материалов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2013. № 7. С. 35–39. EDN RYFUFN.

11. Alawadhi E.M. Thermal analysis of a building brick containing phase change material // Energy and Buildings. 2008. Vol. 40. Issue 3. Pp. 351–357. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.001

12. Alqallaf H.J., Alawadhi E.M. Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain // Energy and Buildings. 2013. Vol. 61. Pp. 73–80. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.041

13. Cellat K., Beyhan B., Kazanci B., Konuklu Y., Paksoy H. Direct incorporation of butyl stearate as phase change material into concrete for energy saving in buildings // Journal of Clean Energy Technologies. 2017. Vol. 5. Issue 1. Pp. 64–68. DOI: 10.18178/JO-CET.2017.5.1.345

14. Goia F., Perino M., Serra V. Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype // Solar Energy. 2014. Vol. 100. Pp. 217–233. DOI: 10.1016/j.solener.2013.12.002

15. Hoes P., Hensen J.L.M. The potential of lightweight low-energy houses with hybrid adaptable thermal storage: comparing the performance of promising concepts // Energy and Buildings. 2016. Vol. 110. Pp. 79–93. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.036

16. Entrop A.G., Brouwers H.J.H., Rein-
ders A.H.M.E. Experimental research on the use of

micro-encapsulated phase change materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses // Solar Energy. 2011. Vol. 85. Issue 5. Pp. 1007–1020. DOI: 10.1016/j.solener.2011.02.017

17. Heim D., Wieprzkowicz A. Positioning of an isothermal heat storage layer in a building wall exposed to the external environment // Journal of Building Performance Simulation. 2016. Vol. 9. Issue 5. Pp. 542–554. DOI: 10.1080/19401493.2015.1126649

18. Kheradmand M., Azenha M., de Aguiar J.L.B., Castro-Gomes J. Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings // Energy. 2016. Vol. 94. Pp. 250–261. DOI: 10.1016/j.energy.2015.10.131

19. Favoino F., Goia F., Perino M., Serra V. Experimental assessment of the energy performance of an advanced responsive multifunctional facade module // Energy and Buildings. 2014. Vol. 68. Pp. 647–659. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.08.066

20. Berardi U., Manca M. The energy saving and indoor comfort improvements with latent thermal energy storage in building retrofits in Canada // Energy Procedia. 2017. Vol. 111. Pp. 462–471. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.208

21. Soudian S., Berardi U. Experimental investigation of latent thermal energy storage in high-rise residential buildings in Toronto // Energy Procedia. 2017. Vol. 132. Pp. 249–254. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.706

22. Qu Y., Zhou D., Xue F., Cui L. Multi-factor analysis on thermal comfort and energy saving potential for PCM-integrated buildings in summer // Energy and Buildings. 2021. Vol. 241. P. 110966. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110966

23. Hamidi Y., Malha M., Bah A. Analysis of the thermal behavior of hollow bricks walls filled with PCM: Effect of PCM location // Energy Reports. 2021. Vol. 7. Pp. 105–115. DOI: 10.1016/j.egy.2021.08.108

Поступила в редакцию 26 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 29 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 29 октября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Валерьевич Федюхин — кандидат технических наук, доцент; Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1; РИНЦ ID: 729038, Scopus: 55940977500, ResearcherID: F-9742-2018, ORCID: 0000-0002-1819-0450; fedjukhinav@yandex.ru;

Ольга Валерьевна Афанасьева — кандидат технических наук, ведущий специалист; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 617556, Scopus: 57212263097, ResearcherID: P-9204-2017, ORCID: 0000-0002-6614-2728; eccolga@mail.ru;

Марк Дмитриевич Зайцев — студент; Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1; ORCID: 0009-0002-9170-286X; zaitsevmd@mpei.ru.

Вклад авторов:

Федюхин А.В. — идея, написание исходного текста.

Афанасьева О.В. — редакторская правка, оформление статьи.

Зайцев М.Д. — проведение расчетов, сбор и обработка результатов, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Veerakumar C., Sreekumar A. Phase change material based cold thermal energy storage: materials, techniques and applications — A review. *International Journal of Refrigeration*. 2016; 67:271-289. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.12.005
2. Baranenko A.V., Kuznetsov P.A., Zakharova V.Yu., Tsoy A.P. Application of substances with phase transitions for thermal energy accumulation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2018; 18(6):990-1000. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000. EDN YQZIDJ. (rus.).
3. Li G., Hwang Y., Radermacher R. Review of cold storage materials for air conditioning application. *International Journal of Refrigeration*. 2012; 35(8):2053-2077. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.06.003
4. Marco C. Phase-change materials. *Smart Buildings*. 2016; 179-218. DOI: 10.1016/B978-0-08-100635-1.00005-8
5. Park J.H., Berardi U., Chang S.J., Wi S., Kang Y., Kim S. Energy retrofit of PCM-applied apartment buildings considering building orientation and height. *Energy*. 2021; 222:119877. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119877
6. Park J.H., Kang Y., Lee J., Wi S., Chang J.D., Kim S. Analysis of walls of functional gypsum board added with porous material and phase change material to improve hygrothermal performance. *Energy and Buildings*. 2019; 183:803-816. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.11.023
7. Beltran R.D., Martínez-Gomez J. Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment. *Journal of Building Engineering*. 2019; 24:100726. DOI: 10.1016/j.job.2019.02.018
8. Rössner F., Rudakov O.B., Albinskaya Yu.S., Ivanova E.A., Pertsev V.T. Application of microencapsulated heat-accumulating materials with phase change in construction. *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science*. 2012; 5:64-70. EDN PCQKAB. (rus.).
9. Nazirov R.A., Tahtobin A.V. Phase change materials used in building envelopes. *Building and Reconstruction*. 2019; 6(86):66-85. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-86-6-66-85. EDN XMLMJZ. (rus.).
10. Kazarova E.A., Pertsev V.T., Usachev S.M. Possibility of application of substances with phase transition for various construction materials. *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science*. 2013; 7:35-39. EDN RYFUFN. (rus.).
11. Alawadhi E.M. Thermal analysis of a building brick containing phase change material. *Energy and Buildings*. 2008; 40(3):351-357. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.001
12. Alqallaf H.J., Alawadhi E.M. Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain. *Energy and Buildings*. 2013; 61:73-80. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.041
13. Cellat K., Beyhan B., Kazanci B., Konuklu Y., Paksoy H. Direct incorporation of butyl stearate as phase change material into concrete for energy saving in buildings. *Journal of Clean Energy Technologies*. 2017; 5(1):64-68. DOI: 10.18178/JOCET.2017.5.1.345
14. Goia F., Perino M., Serra V. Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype. *Solar Energy*. 2014; 100:217-233. DOI: 10.1016/j.solener.2013.12.002
15. Hoes P., Hensen J.L.M. The potential of lightweight low-energy houses with hybrid adaptable thermal storage: comparing the performance of promising concepts. *Energy and Buildings*. 2016; 110:79-93. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.036
16. Entrop A.G., Brouwers H.J.H., Reiniers A.H.M.E. Experimental research on the use of micro-encapsulated phase change materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses. *Solar Energy*. 2011; 85(5):1007-1020. DOI: 10.1016/j.solener.2011.02.017
17. Heim D., Wieprzkowicz A. Positioning of an isothermal heat storage layer in a building wall exposed to the external environment. *Journal of Building Performance Simulation*. 2016; 9(5):542554. DOI: 10.1080/19401493.2015.1126649
18. Kheradmand M., Azenha M., de Aguiar J.L.B., Castro-Gomes J. Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings. *Energy*. 2016; 94:250-261. DOI: 10.1016/j.energy.2015.10.131
19. Favoino F., Goia F., Perino M., Serra V. Experimental assessment of the energy performance of an advanced responsive multifunctional facade module. *Energy and Buildings*. 2014; 68:647-659. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.08.066
20. Berardi U., Manca M. The energy saving and indoor comfort improvements with latent thermal energy storage in building retrofits in Canada. *Energy Procedia*. 2017; 111:462-471. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.208
21. Soudian S., Berardi U. Experimental investigation of latent thermal energy storage in high-rise residential buildings in Toronto. *Energy Procedia*. 2017; 132:249-254. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.706

22. Qu Y., Zhou D., Xue F., Cui L. Multi-factor analysis on thermal comfort and energy saving potential for PCM-integrated buildings in summer. *Energy and Buildings*. 2021; 241:110966. DOI: 10.1016/j.en-build.2021.110966

23. Hamidi Y., Malha M., Bah A. Analysis of the thermal behavior of hollow bricks walls filled with PCM: Effect of PCM location. *Energy Reports*. 2021; 7:105-115. DOI: 10.1016/j.egy.2021.08.108

Received June 26, 2023.

Adopted in revised form on September 29, 2023.

Approved for publication on October 29, 2023.

B I O N O T E S: **Alexander V. Fedyukhin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; build. 1, 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; ID RSCI: 729038, Scopus: 55940977500, ResearcherID: F-9742-2018, ORCID: 0000-0002-1819-0450; fedyukhinav@yandex.ru;

Olga V. Afanaseva — Candidate of Technical Sciences, leading specialist; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 617556, Scopus: 57212263097, ResearcherID: P-9204-2017, ORCID: 0000-0002-6614-2728; eccolga@mail.ru;

Mark D. Zaitsev — student; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; build. 1, 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-9170-286X; zaitsevmd@mpei.ru.

Contribution of the authors:

Alexander V. Fedyukhin — idea, source text writing.

Olga V. Afanaseva — editing, design of the article.

Mark D. Zaitsev — calculations, data gathering and processing, writing of the article.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.16:622.278

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1989-2003

Контроль соотношения одновалентных и двухвалентных ионов при подготовке питьевой воды методом нанофильтрации

Дмитрий Владимирович Спицов, Алексей Германович Первов,
Иванна Александровна Абросимова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Описаны основные проблемы, связанные с применением мембранного метода обратного осмоса для подготовки высококачественной питьевой воды из подземных водоисточников, содержащих ряд растворенных загрязнений, опасных для здоровья. Цель исследования — разработка технологии, позволяющей не только удалить из воды загрязнения, но и обеспечить ионный состав очищенной воды, соответствующий гигиеническим требованиям.

Материалы и методы. Проведены серии экспериментальных исследований по обработке подземной воды с высоким содержанием лития и по обоснованию эффективности разработанного метода ионного разделения.

Результаты. Получены экспериментальные зависимости эффективности удаления из воды растворенных загрязнений с применением мембран различных марок от кратности концентрирования исходной воды в мембранной установке. Экспериментально получено подтверждение возможности контроля соотношения одновалентных и двухвалентных ионов в пермеате, что позволяет в 4–5 раз повысить концентрации ионов жесткости и величину общего солесодержания очищенной воды при неизменно низком содержании лития.

Выводы. Использование метода обратного осмоса для очистки подземных вод от одновалентных ионов (лития, аммония, бора) приводит, помимо удаления загрязнений, к снижению общего солесодержания очищенной воды, что требует дополнительных затрат на ее кондиционирование. Предложен новый метод, основанный на применении низкоселективных нанофильтрационных мембран в две ступени, позволяющий разделять одновалентные ионы от двухвалентных и увеличивать величину общего солесодержания очищенной воды при неизменной концентрации в ней одновалентных ионов лития и аммония. Применение разработанного метода позволяет сократить эксплуатационные затраты мембранной установки подготовки питьевой воды благодаря снижению затрат на замену мембран, реагенты для предотвращения образования на мембранах отложений карбоната кальция и сокращения расхода концентрата, сбрасываемого в канализацию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обратный осмос, нанофильтрация, селективность мембран, сокращение сбросов концентрата, расчет скоростей образования кристаллических осадков на мембранах, удаление из воды лития, очистка подземных вод, разделение одновалентных и двухвалентных ионов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Спицов Д.В., Первов А.Г., Абросимова И.А. Контроль соотношения одновалентных и двухвалентных ионов при подготовке питьевой воды методом нанофильтрации // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1989–2003. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1989-2003

Автор, ответственный за переписку: Алексей Германович Первов, ale-pervov@yandex.ru.

Control of the ratio of monovalent and bivalent ions in drinking water treatment by nanofiltration method

Dmitriy V. Spitsov, Alexei G. Pervov, Ivanna A. Abrosimova

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

ABSTRACT

Introduction. The main problem is discussed that is related to application of reverse osmosis membranes method for quality drinking water production from underground water sources that contain dissolved contaminants dangerous for health such as: fluoride, ammonia, lithium, strontium, arsenic, boron etc. It is also mentioned that reverse osmosis is currently efficiently used for drinking water production. The main goal of the present work was evaluation of the new developed method efficiency and calculation of the operational costs to compare with conventional approach to use reverse osmosis to remove lithium from the ground water. Present article demonstrates results of research aimed at developing a new approach to change the ratio of monovalent and bivalent ions in the permeate of nanofiltration membranes. An example of water with high lithium content that exceeds normative value by 24 times is discussed. The developed technique of ion separation is applied and

experimental results are demonstrated, thus providing low lithium concentration in product water with increased calcium and TDS by 5 times as compared to the conventional use of reverse osmosis membranes. Operational costs are evaluated and compared with conventionally used approach to produce drinking quality water from ground water.

Materials and methods. A series of experiments were conducted to remove lithium from ground water and to demonstrate the efficiency of the new developed method of ion separation. Experimental results of permeate and concentrate separation are presented compared to reverse osmosis that provided the increase of calcium and TDS values in the product water by 4–5 times compared to permeate produced by reverse osmosis membranes. The economical evaluation of the main technical parameters of the developed method involved calculation of the required membrane area and the number of membrane elements at each stage, calcium carbonate scaling rates and reagent consumption to prevent scaling as well as the amounts of concentrate discharges into the sewer.

Results. Experimental dependencies of the efficiency of different dissolved contaminants removal from the ground water using different types of membranes depending on the recovery values were obtained. Experimentally obtained results confirmed the possibility to increase the calcium concentration and TDS values of the product water by 4–5 times leaving the lithium concentration at the same level. A flow diagram of the developed process is demonstrated based on experimentally obtained results. The increase of product water TDS facilitates the further reduction of concentrate flow rate and operational costs. Design characteristics to calculate operational costs for two options (conventional and proposed) are presented. Economical comparison was performed using results of calculations of membrane surface area on each stage of membrane treatment, scaling rates, reagent consumption, concentrate discharges.

Conclusions. Application of reverse osmosis for removal of monovalent contaminants (such as: lithium, ammonia, boron) from ground water results, in reduction of TDS values that requires additional costs to provide permeate conditioning. Operation of reverse osmosis facilities also is distinguished by scaling problems that also requires additional operational costs to prevent and remove scale deposits. In this paper, a new approach is proposed to apply nanofiltration membranes using double stage treatment and separate monovalent and bivalent ions and increase calcium and TDS content in product water leaving the lithium content at the extreme level. The use of developed method enables to reduce operational costs due to lower membrane replacement costs, reagent consumption for scale prevention and concentrate discharges.

KEYWORDS: reverse osmosis; nanofiltration; membrane rejection; reduction of concentrate discharges; evaluation of scaling rates; lithium removal from ground water; treatment of ground water; separation of monovalent and bivalent ions

FOR CITATION: Spitsov D.V., Pervov A.G., Abrosimova I.A. Control of the ratio of monovalent and bivalent ions in drinking water treatment by nanofiltration method. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1989-2003. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1989-2003 (rus.).

Corresponding author: Alexei G. Pervov, ale-pervov@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Обратный осмос сегодня широко применяется для получения качественной питьевой воды из подземных [1, 2] и поверхностных источников [3, 4]. На территории Новой Москвы (расширенная территория Москвы) эффективно используются установки обратного осмоса для улучшения качества подземных вод. Ряд подземных вод в Новой Москве содержит, помимо условно встречающихся кальция и железа, избыточные количества фтора, аммония, лития, стронция и даже бора, превышающие нормативные значения ВОЗ. Для удаления этих загрязнений используются установки обратного осмоса [5–7]. Несмотря на высокую эффективность обратного осмоса для удаления растворенных загрязнений в ионной форме, решение применять его «напрямую» для обработки подземных вод представляется неудачным. Одна из основных причин этого заключается в том, что мембраны обратного осмоса обеспечивают высокий уровень удаления из воды как одновалентных ионов (таких как хлориды, бикарбонаты, ионы аммония, лития и фтора), так и двухвалентных (таких как сульфаты, а также ионы кальция и стронция). В большинстве случаев мы сталкиваемся с ситуацией, когда концентрации аммиака или лития в подземных водах превышают нормативные значения лишь на 20–30 %. В этих

случаях обычно используется обратный осмос для снижения всех ингредиентов и величины общего соледержания на 95–96 %. После этого полученный пермеат частично смешивается с исходной водой. Величина коэффициента смешения (отношения расхода пермеата к расходу части исходной воды, используемой для смешения) зависит от величины, на которую концентрация загрязняющего вещества (ЗВ) превышает нормативный показатель [5, 7, 8]. Такой подход может быть оправдан только при условии, что концентрация ЗВ превышает нормативные значения не более чем в 3–4 раза. При большем значении нет необходимости проводить смешение, так как в этом случае все количество исходной воды должно проходить через мембраны. Таким образом, применение обратного осмоса для получения воды питьевого качества в ряде случаев имеет следующие недостатки. Первый — убирается жесткость на 95–97 % и в ряде случаев должно быть обеспечено кондиционирование воды путем добавления ионов кальция. Второй — обработка подземных вод с высокой жесткостью ограничивает значаемую величину выхода пермеата (отношение расхода пермеата к расходу исходной воды), так как в мембранных каналах образуются соли кальция [9–11]. При использовании мембранных установок для подготовки питьевой воды выбор значения выхода пермеата установки оказывает существенное

влияние на цену подаваемой потребителям очищенной воды, поскольку количество концентрата, сбрасываемого в канализацию, увеличивает общую стоимость воды, производимой мембранной установкой за счет оплаты сбросов в канализацию. Третий — при использовании мембран обратного осмоса имеется опасность образования на мембранах отложений малорастворимых в воде солей, поэтому эксплуатация требует определенных затрат на предотвращение образования этих отложений [12–15].

Как известно, нанофильтрационные мембраны обеспечивают эффективное удаление одновалентных ионов [5–8], что особенно эффективно в тех случаях, когда концентрации этих загрязнений должны быть снижены в три раза и менее [9–11]. Применение нанофильтрационных мембран позволяет не только эффективно удалить одновалентные ионы, но и снизить эксплуатационные расходы за счет уменьшения интенсивности образования кристаллических отложений в мембранных аппаратах с низкоселективными мембранами [2, 3, 6]. Более того, использование дополнительной ступени нанофильтрации дает возможность легко повысить величину выхода пермеата, что значительно снижает общие затраты на производство очищенной воды [1, 2, 6, 7]. В табл. 1 представлен типичный состав подземной воды и результаты ее обработки с применением мембран различных типов [1, 2].

Нередки ситуации, когда концентрация некоторых одновалентных ионов (таких как литий) может превышать нормы ВОЗ в 20–24 раза [12, 13]. В табл. 1 показан состав подземных вод Якутии. Концентрация лития составляет 0,48 мг/л. Это означает, что концентрация лития должна быть снижена в 24 раза, чтобы достичь требований СанПиН. В табл. 1 также представлены результаты очистки подземных вод с применением различных мембран. Значения селективностей мембран по различным

ионам в зависимости от начального значения коэффициента уменьшения объема K , основанные на уже опубликованных результатах [14, 15], показаны на рис. 1.

Как следует из табл. 1, даже применение обратноосмотических мембран низкого давления типа BLN не гарантирует эффективного удаления лития при давлении 10–12 бар при значении величины выхода пермеата 0,7. Высокая эффективность может быть достигнута при использовании мембран среднего давления с высоким значением селективности типа BE. При этом концентрация кальция в пермеате составляет менее 0,05 мг/л, а значение общего содержания — 5 мг/л. Такие результаты «не обнадеживают», поскольку мембраны BE требуют высокого давления и, следовательно, высоких затрат на электроэнергию, а производительность установки с такими мембранами окажется значительно ниже, чем с применением мембран типа BLN. Кроме того, в случае использования обратноосмотических мембран следует ожидать интенсивного образования осадков малорастворимых солей в мембранных аппаратах, что ограничивает величину выхода пермеата.

Многие системы обратного осмоса используются для удаления одновалентных ионов, таких как аммоний и литий [12, 13]. Получение питьевой воды из подземных водоисточников во многих случаях требует удаления растворенных загрязнений в ионной форме в основном в виде одновалентных ионов [9–11]. Более того, выбор мембран для очистки воды производится в основном по их способности задерживать одновалентные ионы. В результате, когда удаляются из воды загрязнения в форме одновалентных ионов, получается деионизированная (обессоленная) вода, непригодная для питья. В настоящей работе авторами предлагается новый подход по получению качественной

Табл. 1. Результаты обработки воды из подземного источника с применением мембран различных типов

Table 1. Results of treatment of water from an underground source using different types of membranes

Показатели, мг/л Indicators, mg/l	Концентрация в исходной подземной воде, мг/л Concentration in source groundwater, mg/l	Значения концентрации в пермеате, мг/л Concentration in permeate, mg/l			
		Тип мембраны/ K (коэффициент снижения объема концентрата в установке) Membrane type/ K (coefficient of initial volume reduction)			
		BE/3	BLN/4	90 NE/4	70 NE/5
Кальций / Calcium	70	0,23	0,5	4,6	10,8
Щелочность / Alkalinity	366	5,4	9,5	26,5	8,5
Сульфаты / Sulphates	34	0,5	1,2	2,3	5,4
Хлориды / Chlorides	56	0,6	1,2	6,0	12,1
Литий / Lithium	0,05	0,002	0,003	0,007	0,016
Фториды / Fluoride	1,6	0,015	0,03	0,14	0,53
Общее солесодержание / TDS	527	10,0	20,3	52,0	164,0
pH	7,5	5,7	6,0	6,7	7,0

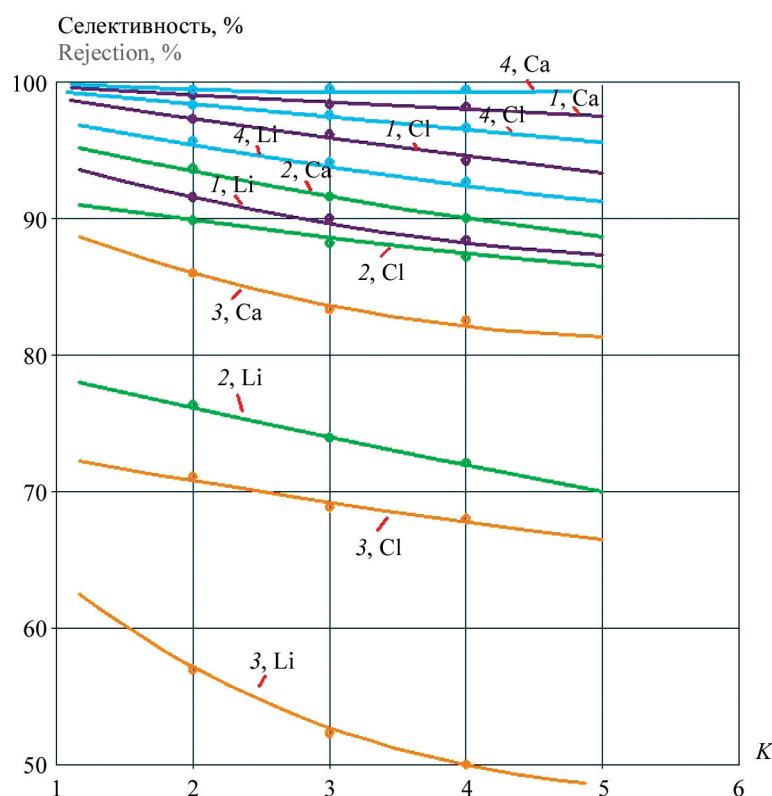
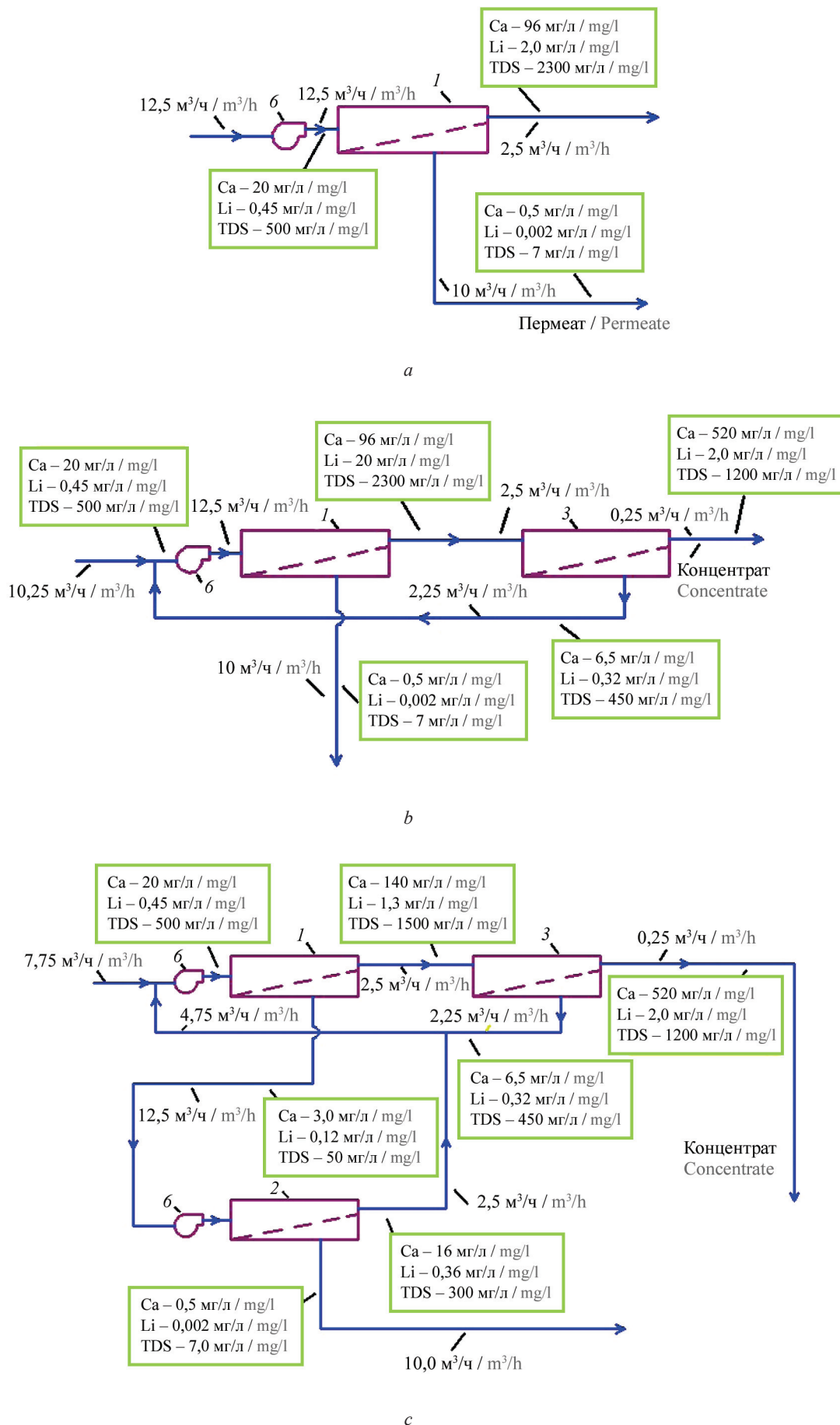


Рис. 1. Зависимости значений селективностей по ионам кальция, хлорид-ионам и ионам лития у различных мембран от значения коэффициента уменьшения объема K : 1 — мембраны BLN (обратноосмотические мембраны низкого давления); 2 — мембраны 90 NE (нанофильтрационные мембраны, общая селективность по солям — 90 %); 3 — мембраны 70 NE (нанофильтрационные мембраны, общая селективность по солям — 70 %); 4 — мембраны BE (мембраны обратного осмоса среднего давления)

Fig. 1. Dependencies of selectivity values for calcium, chloride and lithium ions in different membranes on the initial volume reduction coefficient K value: 1 — BLN membranes (low pressure reverse osmosis membranes); 2 — 90 NE membranes (nanofiltration membranes, total salt rejection is 90 %); 3 — 70 NE membranes (nanofiltration membranes, total salt rejection is 70 %); 4 — BE membranes (medium pressure reverse osmosis membranes)

питьевой воды с использованием разработанного метода разделения ионов, основанного на различных значениях селективности нанофильтрационных мембран по одновалентным и двухвалентным ионам. Предлагаемый метод используется вместе с ранее разработанными методами сокращения расхода концентрата. Принципы сокращения расхода концентрата мембранных установок также основаны на применении нанофильтрационных мембран [16–18], которые менее подвержены образованию на них осадков малорастворимых солей [14, 15]. Возможные технологические схемы для очистки подземных вод с применением мембран представлены на рис. 2. На рис. 2, *a* приведен традиционный подход к решению проблемы очистки подземной воды: технологическая схема мембранной установки с использованием обратноосмотических мембран с высокой селективностью и низким значением величины выхода пермеата. Такой подход требует высоких затрат на реагенты и утилизацию концентрата [15, 19].

Все схемы, представленные на рис. 2, показывают баланс расходов пермеата и концентрата. Значения концентраций различных загрязнений в концентрате и пермеате, определенные в ходе экспериментальных испытаний, описаны ниже (рис. 3–6). Чтобы повысить эффективность работы установки подготовки питьевой воды, можно предпринять сокращение сбросного расхода концентрата. На рис. 2, *b* представлена методика сокращения расхода концентрата с использованием нанофильтрационных мембран с низким значением селективности по солям на третьей ступени обработки концентрата. Пермеат третьей ступени направляется на вход в установку (в мембранные аппараты первой ступени). Такой подход позволяет сократить расход концентрата в 5–10 раз. При этом проблема образования на обратноосмотических мембранах осадков малорастворимых солей и роста, вследствие этого эксплуатационных затрат на предотвращение образования этих отложений, до сих пор не решена. На рис. 2, *c* продемонстрировано



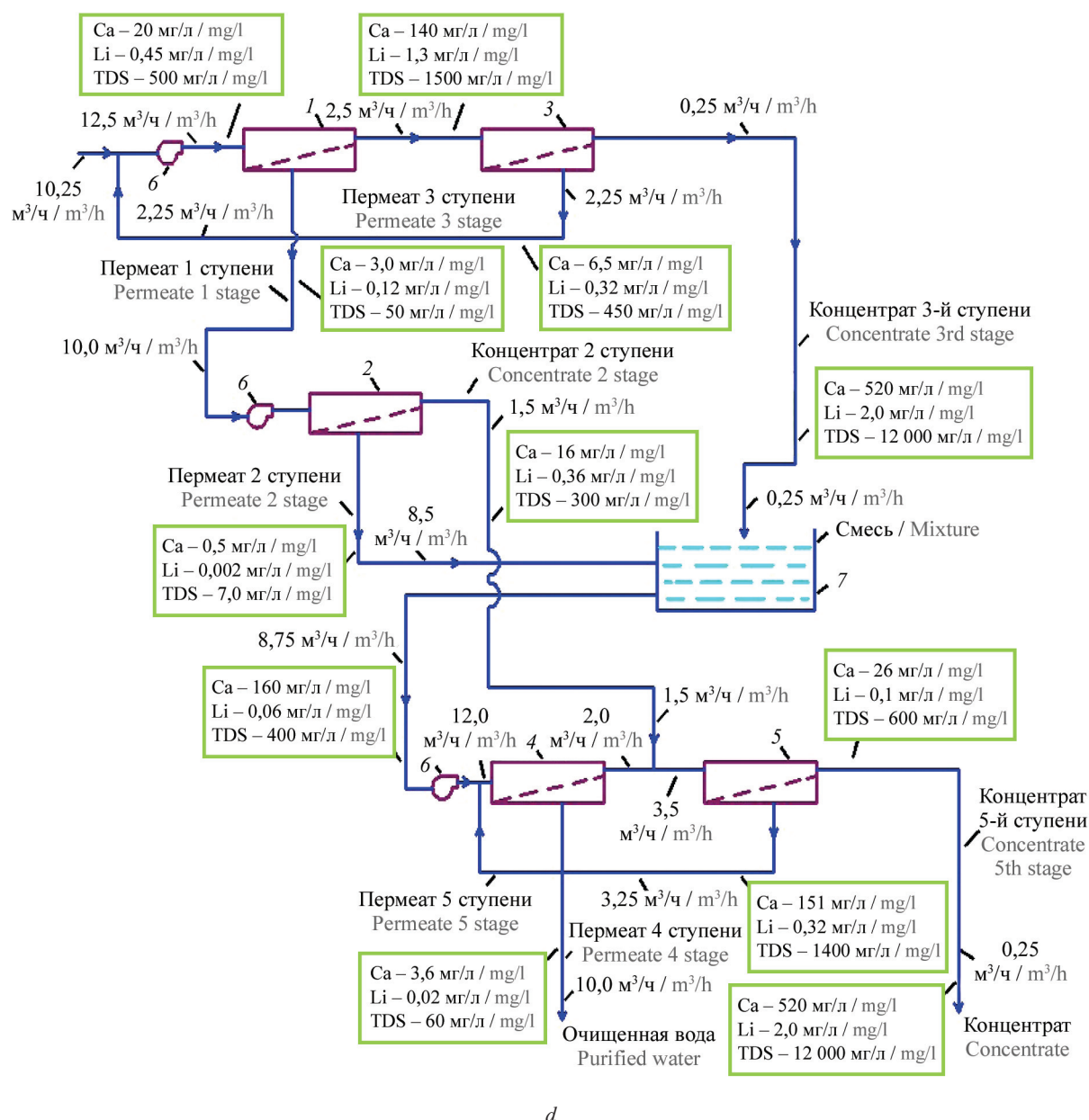


Рис. 2. Технологические схемы получения питьевой воды из подземного водоисточника и основные технологические схемы получения качественной питьевой воды и снижения расхода концентрата: *a* — традиционный подход с использованием обратноосмотических мембран с высоким значением селективности; *b* — применение мембран обратного осмоса для получения качественной питьевой воды (на первой ступени) и снижение расхода концентрата с помощью нанофильтрационных мембран (на третьей ступени); *c* — получение качественной питьевой воды с использованием двухступенчатой схемы с применением нанофильтрационных мембран с низким значением селективности (первая и вторая ступени) и снижение расхода концентрата с помощью нанофильтрационных мембран (третья ступень); *d* — улучшение качества очищенной воды (увеличение значений концентрации ионов жесткости и величины общего соледождения) с применением предлагаемого метода разделения ионов; 1 — мембраны 1-й ступени; 2 — мембраны 2-й ступени; 3 — мембраны 3-й ступени; 4 — мембраны 4-й ступени; 5 — мембраны 5-й ступени; 6 — насосы; 7 — бак смешения

Fig. 2. Flow diagrams to produce drinking water from the groundwater intake and techniques to reduce concentrate flow rate: *a* — conventional approach using reverse osmosis membrane with high rejection; *b* — application of reverse osmosis membranes to produce quality drinking water (on the first stage) and reduce concentrate flow using nanofiltration membrane (on the second stage); *c* — production of quality drinking water using a double stage low selection membranes (first and second stages) and reduction of concentrate flow using nanofiltration membrane (on the third stage); *d* — improvement of the product water quality (increase of hardness and TDS) using a developed ion separation techniques; 1 — membranes of the 1st stage; 2 — membranes of the 2nd stage; 3 — membranes of the 3rd stage; 4 — membranes of the 4th stage; 5 — membranes of the 5th stage; 6 — pumps; 7 — mixing tank

решение проблемы получения качественной питьевой воды с использованием нанофильтрационных мембран низкого давления и с низкой солезадерживающей способностью. Как было показано в ряде опубликованных результатов исследований, применение мембран с низким значением селективности снижает интенсивность образования отложений карбоната кальция [15, 19]. Нанофильтрационные мембраны также обладают более высокой проницаемостью (производительностью) при более низких значениях рабочего давления [20–23]. Таким образом, обработка природной воды с помощью нанофильтрационных мембран в две ступени обеспечивает такое же качество пермеата (такой же уровень удаления одновалентных ионов), как и в случае использования низконапорных обратноосмотических мембран. Благодаря высокой производительности нанофильтрационных мембран в двухступенчатой схеме может быть использовано меньшее количество мембранных элементов, чем в одноступенчатой схеме. А более высокая стойкость нанофильтрационных мембранных элементов к образованию кристаллических отложений делает описанный подход к разработке схемы водоподготовки экономически оправданным [20, 24–26]. Снижение расхода концентрата в этой схеме реализовано за счет применения дополнительной ступени нанофильтрации для обработки концентрата первой ступени. Концентрат второй ступени направляется на входе на первую стадию. Единственной проблемой является низкая жесткость и низкий TDS продукционной воды, что может потребовать дополнительные затраты на кондиционирование. В настоящей статье исследуется новая методика: возможность повышения TDS и жесткости продукционной воды с помощью разделения ионов с нанофильтрационными мембранами [1, 15, 27]. Принципы увеличения общего солевого содержания при сохранении высокого уровня удаления лития приведены на рис. 2, *d*. Для этого может быть использована схема двухступенчатой очистки, показанная ранее на рис. 2, *c*. Расход концентрата снижен в 30 раз по сравнению с расходом исходной воды. Поскольку значения селективности мембран по ионам кальция и величине общего солевого содержания выше, чем по иону лития, в концентрате наблюдается повышение концентрации кальция и значения общего солевого содержания в большей степени, чем увеличение концентрации лития. Далее предпринимается смешение концентрата и пермеата второй ступени. После смешения (добавление 30 объемных частей пермеата на одну объемную часть концентрата) можно получить следующие значения концентраций кальция, лития и величины общего солевого содержания в смеси:

- кальций — 160 мг/л;
- литий — 0,06–0,07 мг/л;
- общее содержание — 400 мг/л.

Как видно на рис. 2, *c*, концентрация лития в пермеате первой ступени, поступающей на вторую ступень очистки, равна концентрации лития в смеси. При этом концентрация ионов кальция в смеси оказывается в 4–5 раз выше, и величина общего солевого содержания так же оказывается повышенной в 2,5–3 раза по сравнению с исходной водой. Таким образом, в настоящей работе представлено экспериментальное обоснование схемы подготовки качественной питьевой воды с одновременным снижением затрат на утилизацию концентрата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения экспериментов использовалась проба подземной воды с высоким содержанием лития, объемом 25 л. Эксперимент был направлен на получение основных технических параметров технологической схемы, представленной на рис. 2, *d*, и возможность обоснования эффективной очистки воды с одновременным достижением высоких значений коэффициента снижения объема K . Применялась подземная вода следующего состава: кальций — 3,5 мг-экв/л; щелочность — 6,1 мг-экв/л; литий — 0,05 мг/л; хлориды — 56 мг/л; сульфаты — 35 мг/л; общее содержание — 527 мг/л; pH — 7,2.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Использовались нанофильтрационные мембранные элементы стандарта 1812 с нанофильтрационными мембранами марок 70 NE и 90 NE (разработки компании CSM, Корея), приобретенные у компании Raifil (Москва). Экспериментальная процедура заключалась в циркуляции исходной воды с помощью насоса 2 через мембранный аппарат 3 с отбором пермеата в отдельный бак 4 и возвратом концентрата обратно в бак исходной воды 1.

Объем исходной воды — 25 л. Экспериментальная программа состояла из пяти шагов (этапов):

- на первом этапе исходная вода обрабатывалась с помощью мембран 90 NE до достижения значения $K = 5$. Первый этап моделировал условия работы мембран на первой ступени очистки (рис. 2, *d*);
- на втором этапе концентрат 90 NE был дополнительно обработан с применением мембран 70 NE для дополнительного уменьшения объема концентрата в 5–6 раз до достижения объема концентрата в баке 4, равного одному литру. Второй этап моделировал условия работы третьей ступени для сокращения расхода концентрата (рис. 2, *d*);
- на третьем этапе собранный пермеат первой ступени (18 л) обрабатывался с применением мембран 70 NE до снижения объема в 5–6 раз (что соответствует значению величины выхода пермеата 0,8–0,85) и достижения заданного значения концентрации лития (0,02 мг/л). Четвертый этап модели-

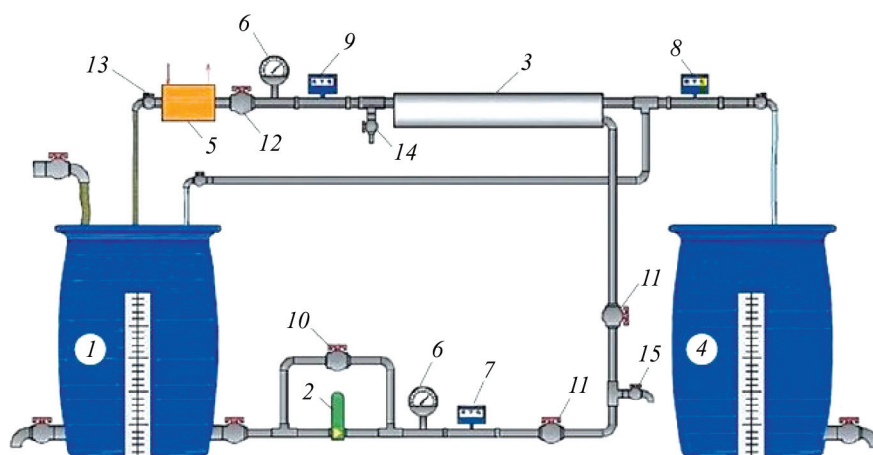


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной лабораторной установки: 1 — бак исходной воды; 2 — насос; 3 — мембранный элемент в сосуде высокого давления; 4 — бак фильтрата; 5 — теплообменник; 6 — манометр; 7–9 — расходомеры; 10 — обратный клапан; 11 — регулирующий вентиль расхода исходной воды; 12 — регулирующий вентиль рабочего давления и расхода концентрата; 13 — кран регулировки расхода охлаждающей воды; 14, 15 — пробоотборники

Fig. 3. Principle scheme of the experimental laboratory installation: 1 — source water tank; 2 — pump; 3 — membrane element in the pressure vessel; 4 — filtrate tank; 5 — heat exchanger; 6 — manometer; 7–9 — flow meters; 10 — bypass valve; 11 — valve for adjusting the flow of source water; 12 — valve for adjusting the working pressure and concentrate flow; 13 — valve for adjusting the flow of cooling water; 14, 15 — samplers

ровал работу мембран на второй ступени очистки (рис. 2, d).

Отбор проб и определение в них концентраций кальция, лития и величины общего солевого содержания в концентрате и пермеате производились на протяжении всех экспериментов. Заключительные этапы экспериментальной программы включали:

- на четвертом этапе было произведено смешение пермеата второй ступени мембран 70 NE, полученного на третьем этапе эксперимента, и концентрата третьей ступени, полученного с использованием мембран 70 NE на втором этапе эксперимента, а также были определены значения концентраций кальция, лития и величины общего солевого содержания в смеси;

- на пятом этапе смесь снова была обработана с применением мембран 70 NE с получением пермеата и концентрата. Значение коэффициента K в конце эксперимента составляло 5 (моделирование условий работы четвертой ступени очистки смеси), далее объем концентрата был снижен до 1 л, что соответствовало значению коэффициента $K = 20$;

- мембранные рулонные элементы с наночлестратационными мембранами (модели 1812-70 NE и 1812-90 NE) были поставлены компанией Toray Advanced Materials Korea Inc. (производитель CSM Membrane Technologies, Корея, Сеул). Общая селективность мембраны 70 NE по NaCl составляет 70 %, мембран 90 NE — 90 %. Площадь мембран в рулонных элементах стандарта 1812 составляет 0,5 м².

Пробы пермеата и концентрата отбирались из емкостей 1 и 2. В пробах определялись концен-

трации ионов кальция, хлоридов, лития, а также значения pH и величины общего солевого содержания. Концентрации кальция и магния определяли титрованием. Концентрации сульфат-ионов устанавливали турбидиметрическим методом. Концентрацию ионов натрия определяли методом атомной адсорбции. Литий выявляли методом атомно-эмиссионного анализа на атомно-адсорбционном спектрофотометре, работающем в эмиссионном режиме. Значения электропроводности, TDS и температуры определяли с помощью измерителя электропроводности (модель Cond 730, WNW «Инолаб-Аквилон», Москва, Россия). Значения pH определяли с помощью лабораторного pH-метра HI 2215 (Hanna Instruments, Vohringen, Germany).

На рис. 4, 5 представлены зависимости концентраций ионов Ca, Li, Cl в концентрате и пермеате первой и третьей ступеней в зависимости от K . На рис. 6 приведены концентрации этих ионов в пермеате второй ступени и в пермеате четвертой ступени. После получения пермеата на второй ступени было осуществлено его смешение с концентратом, полученным на третьей ступени. После смешения была получена вода с концентрацией кальция: 76 мг/л; концентрация лития 0,08 мг/л; концентрация хлоридов 440 мг/л. Значение величины общего солевого содержания составило 760 мг/л.

Результаты обработки смеси пермеата второй ступени с концентратом третьей ступени представлены на рис. 6. В ходе эксперимента постоянно измерялись электропроводность пермеата, его расход для построения зависимости снижения

производительности мембранного элемента с ростом концентрации солей в исходной воде. Также были определены значения концентраций ионов кальция для расчета скоростей роста осадка кар-

боната кальция в каналах мембранных элементов в процессе концентрирования исходной воды. Результаты снижения удельной производительности мембран и увеличения скоростей образования на мембранах карбоната кальция с ростом значения коэффициента K представлены на рис. 7, а, б. Скорости образования отложения карбоната кальция были определены с использованием методов массового баланса, описанных ранее в публикациях авторов [2]. Методика определения скоростей осадкообразования основана на установлении производных функций количества образовавшегося карбоната кальция от времени.

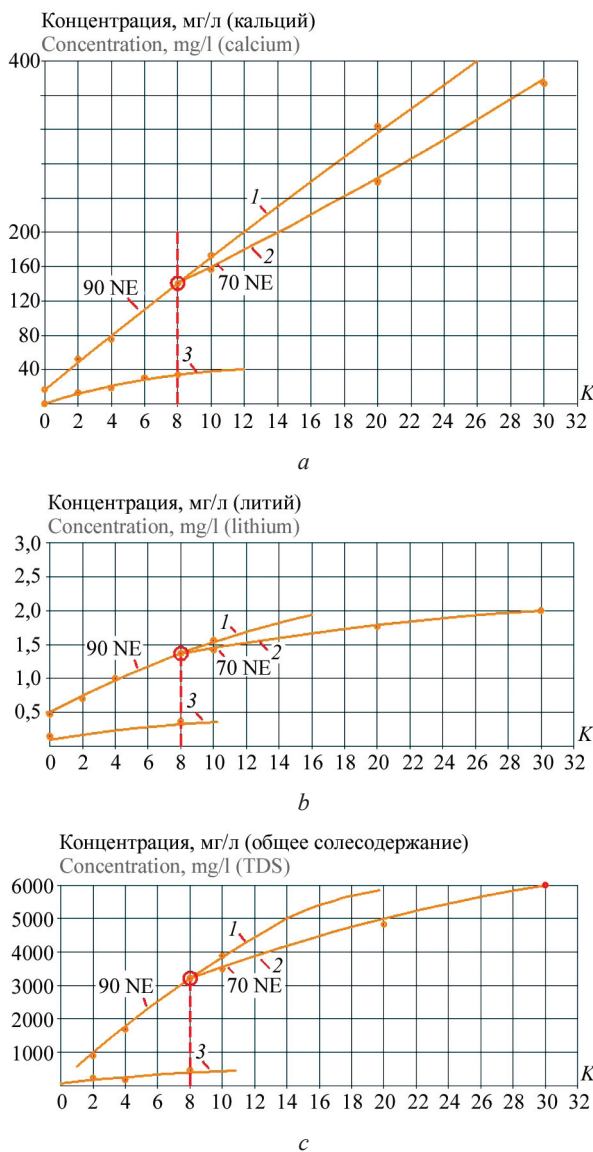


Рис. 4. Зависимости значений концентрации ионов кальция (а); лития (б) и хлорида (с) от K в концентрате нанофильтрационных мембран 90 NE и 70 NE на разных стадиях технологической схемы (рис. 2, д): 1 — мембраны 90 NE на первой стадии (производство питьевой воды); 2 — мембраны 70 NE на третьей стадии для снижения расхода концентрата; 3 — мембраны 70 NE на второй стадии (для улучшения качества питьевой воды и снижения содержания лития)

Fig. 4. Dependencies of calcium (a), lithium (b) and chloride (c) ion concentration values on K in concentrate of 90 NE and 70 NE nanofiltration membranes on the different stages of water flow diagram (Fig. 2, d): 1 — 90 NE membranes on the first stage (producing drinking water); 2 — 70 NE membranes on the third stage used for concentrate flow reduction; 3 — 70 NE membranes on the second stage (for drinking water quality improvement and lithium reduction)

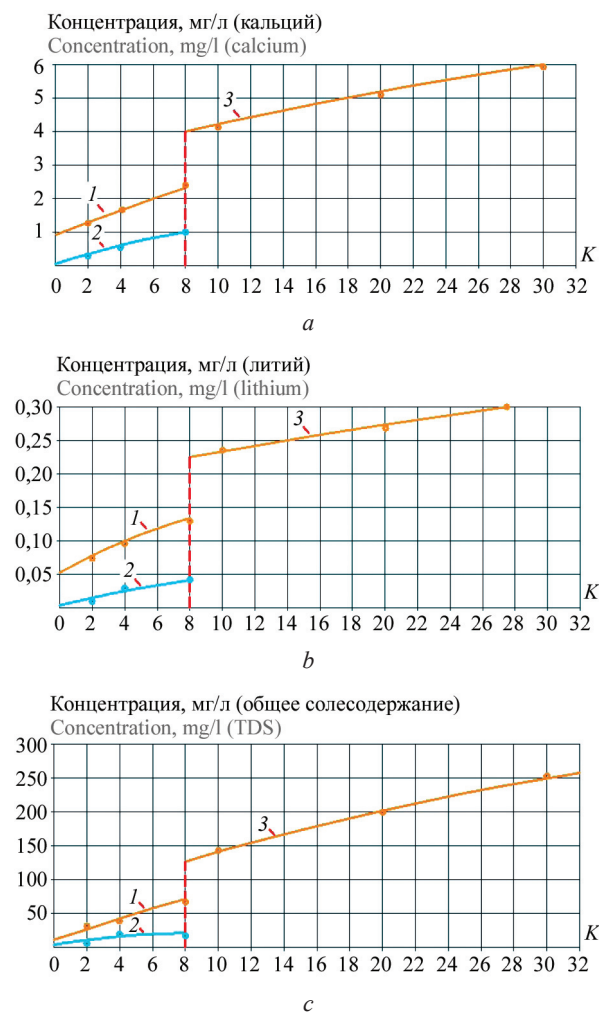


Рис. 5. Зависимости значений концентрации ионов кальция (а); лития (б) и хлорида (с) от K в пермеате нанофильтрационных мембран 90 NE и 70 NE на разных стадиях водной диаграммы (рис. 2, д): 1 — 90 NE мембраны на первой стадии; 2 — мембраны 70 NE на третьей стадии; 3 — мембраны 70 NE на второй стадии

Fig. 5. Dependencies of Calcium (a); Lithium (b) and Chloride (c) ion concentration values on K in permeate of 90 NE and 70 NE nanofiltration membranes on different stages of water flow diagram (Fig. 2, d): 1 — 90 NE membranes on the first stage; 2 — 70 NE membranes on the third stage; 3 — 70 NE membranes on the second stage

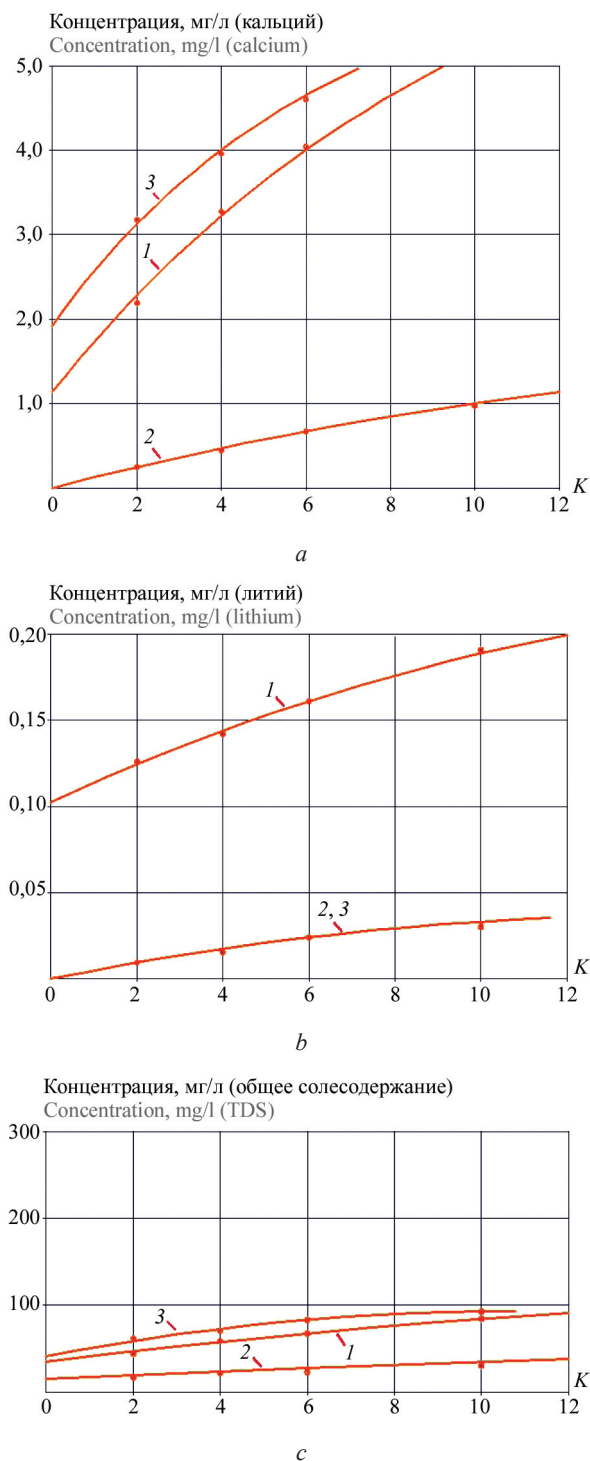


Рис. 6. Зависимости значений концентрации ионов кальция (а); лития (b) и хлорид-ионов (с) от K в пермеате мембран 90 NE и 70 NE на разных ступенях технологической схемы (рис. 2, d): 1 — на первой ступени; 2 — на второй ступени; 3 — на четвертой ступени (после обработки смеси концентрата третьей ступени и пермеата второй ступени)

Fig. 6. Dependencies of calcium (a), lithium (b) and chloride (c) ion concentration values on K in permeate of 90NE and 70NE membranes on the different stages of water flow diagram (Fig. 2, d): 1 — on the first stage; 2 — on the second stage; 3 — on the fourth stage (after treatment of the mixture of the third stage concentrate and the second stage permeate)

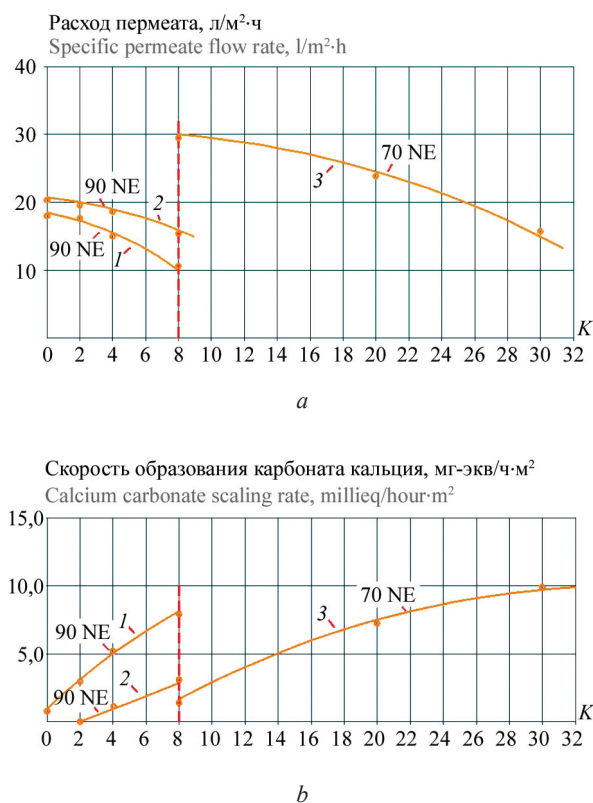


Рис. 7. Результаты наблюдения за работой мембраны во время тестовых запусков: а — зависимости удельного расхода продукта от значений K ; б — зависимости скоростей образования отложений карбоната кальция от K на разных стадиях работы мембранных модулей

Fig. 7. Results of membrane performance observations during the test runs: a — dependencies of specific product flow rate on K values; b — dependencies of calcium carbonate scaling rates on K at different stages of membrane modules operation

На рис. 7, а показано снижение производительности мембран в зависимости от значения коэффициента K . На рис. 7, б приведены результаты определения скоростей образования карбоната кальция в зависимости от значения коэффициента K , а также в зависимости от марки применяемых мембран, состава обрабатываемой воды и применения ингибитора.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Обработка подземной воды с применением нанопермеатных мембран (рис. 4, 5) в две ступени и с отдельной ступенью для сокращения расхода концентрата (рис. 2, с, d) обеспечивает сокращение концентрации ионов кальция в 40 раз, а величины общего солесодержания TDS в 50 раз.

Применение второй ступени обеспечивает снижение лития в 27–30 раз (что соответствует значению селективности 96,5–96,7 %). Это обеспечивает высокое качество очистки, аналогичное качеству, достигаемому при использовании обратноосмо-

тических мембран марки ВЕ (рис. 1). Как видно на рис. 6, смешивание пермеата второй ступени и концентрата третьей ступени позволяет получить на четвертой ступени очищенную воду с более высокими значениями величины общего солевого содержания и концентрации кальция, чем у пермеата первой ступени (кривые 2 и 3).

На рис. 6 показаны результаты обработки смеси с применением мембран 70 NE. Как видно из рисунка 6, а, концентрация кальция в пермеате увеличилась в 6 раз по сравнению с пермеатом второй ступени (кривая 2), а значение величины общего солевого содержания возросло в 5 раз.

В работе проведено экономическое сравнение схем водоподготовки в соответствии с рис. 2. Результаты расчетов представлены в табл. 2. Основные эксплуатационные характеристики рассмотренных технологических схем определены с использованием данных, представленных на рис. 7.

Как видно из табл. 2, применение дополнительной сепарации ионов обеспечивает лучшее качество продукционной воды. Также существенное снижение эксплуатационных расходов может быть достигнуто за счет экономии электроэнергии и расхода реагентов (известь, антинакип и чистящие химикаты).

Табл. 2. Основные эксплуатационные характеристики мембранной установки производительностью 10 м³/ч и сравнение экономических и технических параметров различных подходов к обеспечению качественной питьевой водой

Table 2. Main operational characteristics of the 10 m³/hour membrane facility and comparison of economic and technical parameters of different approaches to the provision of quality drinking water

Параметры Parameters	Схема 1 (рис. 2, а) Scheme 1 (Fig. 2, a)	Схема 2 (рис. 2, б) Scheme 2 (Fig. 2, b)	Схема 3 (рис. 2, в) Scheme 3 (Fig. 2, c)	Схема 4 (рис. 2, г) Scheme 4 (Fig. 2, d)
Количество мембранных элементов, тип мембраны (тип 8040)/годовые затраты на замену мембран, шт./руб. The number of membrane elements 8,040, membrane type/annual membrane replacement costs, pcs/rub	18 BE/180 000	20 BE, 70 NE/ 200 000	17 (70NE)/ 170 000	23 (70NE)/ 230 000
Годовой расход ингибитора/годовые расходы на ингибитор, кг/руб. Annual inhibitor consumption/annual inhibitor purchase costs, kg/rubles	400/400 000	400/400 000	80/80 000	80/80 000
Годовой расход моющих реагентов/годовые расходы на моющие химикаты, кг/руб. Annual cleaning chemicals consumption/annual cleaning costs, kg/rubles	120/120 000	50/50 000	50/50 000	50/50 000
Суммарная мощность насосов, кВт Total pump power, kW	10	10	11	12,5
Общее годовое потребление энергии / годовые затраты на электроэнергию, кВт·ч/руб. Total annual power consumption/ annual power consumption costs, kW·hour/rubles	70 000/350 000	70 000/350 000	77 000/350 000	87 500/437 500
Сбросной расход концентрата/годовой сброс / стоимость сбросов в канализацию, м³/ч/м³/руб. Concentrate discharge flow rate/ total annual discharge/ annual discharge costs, m³/hour/m³/ rubles	2,5/17 500/ 35 0000	0,25/1750/ 35 000	0,25/1750/ 35 000	0,25/1750/ 35 000
Расход извести на кондиционирование/ годовые затраты на известь, т/руб. Lime consumption for product water conditioning/ annual lime consumption costs, tons/rubles	1,0/50 000	1,0/50 000	1,0/50 000	—
Эксплуатационные затраты, руб. Annual operational costs, rubles	1 450 000	1 085 000	735 000	832 500

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ряде случаев (например, при очистке от трудноудаляемых загрязнений в ионной форме (таких как аммоний и литий)) использование обратного осмоса для получения воды питьевого качества представляется нецелесообразным, поскольку пермеат этих мембран имеет низкие значения величины общего солесодержания и жесткости, что требует дополнительных эксплуатационных затрат на его кондиционирование.

При обработке подземных вод с применением обратноосмотических мембран на их поверхности образуются кристаллические отложения малорастворимых в воде солей, что ведет к увеличению эксплуатационных расходов на предотвращение обра-

зования отложений и на оплату сброса концентрата в канализации.

Предложена новая технология, в которой используются нанофильтрационные мембраны с низкой селективностью, что позволяет сокращать расходы концентрата, снизить скорость осадкообразования на мембранах кристаллических отложений, а также увеличить концентрации ионов жесткости и величину солесодержания пермеата при неизменном содержании в очищенной воде иона лития.

Разработанный метод разделения ионов продемонстрировал высокий экономический эффект за счет сокращения эксплуатационных затрат по сравнению с традиционным подходом к обработке подземных вод с применением обратноосмотических мембран.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Suratt W.B., Andrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A.* Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater // *Desalination*. 2000. Vol. 131. Issue 1–3. Pp. 37–46. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)90004-3
2. *Spitsov D., Aung H.Z., Pervov A.* The selection of efficient antiscalant for RO facility, control of its quality and evaluation of the economical efficiency of its application // *Membranes*. 2023. Vol. 13. Issue 1. P. 85. DOI: 10.3390/membranes13010085
3. *Watson B.M., Hornburg C.D.* Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies // *Desalination*. 1989. Vol. 72. Issue 1–2. Pp. 11–22. DOI: 10.1016/0011-9164(89)80024-4
4. *Lopes C.N., Petrus J.C.C., Riella H.G.* Color and COD retention by nanofiltration membranes // *Desalination*. 2005. Vol. 172. Issue 1. Pp. 77–83. DOI: 10.1016/j.desal.2004.07.030
5. *Al-Qadami E., Ahsan A., Mustafa Z., Abdur-rasheed S., Yusof K.W., Shah S.M.H.* Nanofiltration membrane technology and its applications in surface water treatment : a review // *Journal of Desalination and Water Purification*. 2020. Vol. 18. Pp. 3–9.
6. *Tian J., Zhao X., Gao S., Wann X., Zhang R.* Progress in research and application of Nanofiltration (NF) technology for brackish water treatment // *Membranes*. 2021. Vol. 11. Issue 9. P. 662. DOI: 10.3390/membranes11090662
7. *Guo H., Li X., Yang W., Yao Z., Mei Y., Peng L.F. et al.* Nanofiltration for drinking water treatment: A review // *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2021. Vol. 16. Issue 5. Pp. 681–698. DOI: 10.1007/s11705-021-2103-5
8. *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 Pro-*
- duction. 2022. Vol. 333. P. 130171. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130171
9. *Jamaly S., Darwish N.N., Ahmed I., Hasan S.W.* A short review on reverse osmosis pretreatment technologies // *Desalination*. 2014. Vol. 354. Pp. 30–38. DOI: 10.1016/j.desal.2014.09.017
10. *Goh P.S., Lau W.J., Othman M.H.D., Ismail A.F.* Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies // *Desalination*. 2018. Vol. 425. Pp. 130–155. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.018
11. *Jiang S., Li Y., Ladewig B.P.* A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 595. Pp. 567–583. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.235
12. *Xu W., Liu D., He L., Zhao Z.* A comprehensive membrane process for preparing lithium carbonate from high Mg/Li brine // *Membranes*. 2020. Vol. 10. Issue 12. P. 371. DOI: 10.3390/membranes10120371
13. *Li X., Mo Y., Qing W., Shao S., Tang C.Y., Li J.* Membrane-based technologies for lithium recovery from water lithium resources : a review // *Journal of Membrane Science*. 2019. Vol. 591. P. 117317. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.117317
14. *Mohammad A.W., Hilal N., Al-Zoubi H., Darwish N.A.* Prediction of permeate fluxes and rejections of highly concentrated salts in nanofiltration membranes // *Journal of Membrane Science*. 2007. Vol. 289. Issue 1–2. Pp. 40–50. DOI: 10.1016/j.memsci.2006.11.035
15. *Первов А.Г.* Удаление карбоната кальция из концентратов установок обратного осмоса, содержащих ингибирующие вещества // *Мембраны и мембранные технологии*. 2017. Т. 7. № 3. С. 192–205. DOI: 10.1134/S2218117217030063. EDN YTFQTL
16. *Hedayatipour M., Jaafarzadeh N., Ahmad-moazzam M.* Removal optimization of heavy metals from effluent of sludge dewatering process in oil and gas well drilling by nanofiltration // *Journal of Envi-*

ronmental Management. 2017. Vol. 203. Pp. 151–156. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.07.070

17. Ahmed S.F., Mehejabin F., Momtahin A., Tasannum N., Faria N.T., Mofijur M. Strategies to improve membrane performance in wastewater treatment // *Chemosphere*. 2022. Vol. 306. P. 135527. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135527

18. Voutchkov N. Overview of seawater concentrate disposal alternatives // *Desalination*. 2011. Vol. 273. Issue 1. Pp. 205–219. DOI: 10.1016/j.desal.2010.10.018

19. Al-Ghamdi A.A. Recycling of Reverse Osmosis (RO) Reject streams in brackish water desalination plants using fixed bed column softener // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 107. Pp. 205–211. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.12.174

20. Najid N., Fellaou S., Kouzbou S., Gourich B., Ruiz-García A. Energy and environmental issues of seawater reverse osmosis desalination considering boron rejection : a comprehensive review and a case study of exergy analysis // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 156. Pp. 373–390. DOI: 10.1016/j.psep.2021.10.014

21. Koyuncu I., Yalcin F., Ozturk I. Color removal of high strength paper and fermentation industry effluents with membrane technology // *Water Science and Technology*. 1999. Vol. 40. Issue 11–12. Pp. 241–248. DOI: 10.2166/wst.1999.0718

22. Collivignarelli M.C., Abbà A., Miino M.C., Damiani S. Treatments for color removal from waste-

water: State of the art // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 236. Pp. 727–745. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.094

23. Zheng Y., Yu S., Shuai S., Zhou Q., Cheng Q., Liu M. et al. Color removal and COD reduction of biologically treated textile effluent through submerged filtration using hollow fiber nanofiltration membrane // *Desalination*. 2013. Vol. 314. Pp. 89–95. DOI: 10.1016/j.desal.2013.01.004

24. Jafarinejad S., Esfahani M.R. A review on the nanofiltration process for treating wastewaters from the petroleum industry // *Separations*. 2021. Vol. 8. Issue 11. P. 206. DOI: 10.3390/separations8110206

25. Turek M., Mitko K., Piotrowski K., Dydo P., Laskowska E., Jakóbik-Kolon A. Prospects for high water recovery membrane desalination // *Desalination*. 2017. Vol. 401. Pp. 180–189. DOI: 10.1016/j.desal.2016.07.047

26. Bunani S., Yörükoğlu E., Sert G., Yüksel Ü., Yüksel M., Kabay N. Application of nanofiltration for reuse of municipal wastewater and quality analysis of product water // *Desalination*. 2013. Vol. 315. Pp. 33–36. DOI: 10.1016/j.desal.2012.11.015

27. Pervov A.G., Shirkova T.N., Tikhonov V.A. Design of reverse osmosis and nanofiltration membrane facilities to treat landfill leachates and increase recoveries // *Membranes and Membrane Technologies*. 2020. Vol. 2. Pp. 296–309.

Поступила в редакцию 7 июля 2023 г.

Принята в доработанном виде 17 июля 2023 г.

Одобрена для публикации 6 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Дмитрий Владимирович Спицов — кандидат технических наук, доцент, директор института Инженерно-экологического строительства и механизации; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 531559; spitsovdv@mgsu.ru;

Алексей Германович Первов — доктор технических наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 168126; ale-pervov@yandex.ru;

Иванна Александровна Абросимова — старший преподаватель кафедры общей и прикладной физики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8469-6903; abrosimovaia94@gmail.com.

Вклад авторов:

Спицов Д.В. — развитие методологии исследования, написание исходного текста, выводы.

Первов А.Г. — научное руководство, концепция исследования.

Абросимова И.А. — участие в разработке учебных программ и их реализации, доработка текста, оформление, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Suratt W.B., Andrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A. Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater. *Desalination*. 2000; 131(1-3):37-46. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)90004-3

2. Spitsov D., Aung H.Z., Pervov A. The selection of efficient antiscalant for RO facility, control of its quality and evaluation of the economical efficiency of its application. *Mem-*

branes. 2023; 13(1):85. DOI: 10.3390/membranes13010085

3. Watson B.M., Hornburg C.D. Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies. *Desalination*. 1989; 72(1-2):11-22. DOI: 10.1016/0011-9164(89)80024-4

4. Lopes C.N., Petrus J.C.C., Riella H.G. Color and COD retention by nanofiltration membranes. *Desalination*. 2005; 172(1):77-83. DOI: 10.1016/j.desal.2004.07.030

5. Al-Qadami E., Ahsan A., Mustafa Z., Abdurashheed S., Yusof K.W., Shah S.M.H. Nanofiltration membrane technology and its applications in surface water treatment : a review. *Journal of Desalination and Water Purification*. 2020; 18:3-9.

6. Tian J., Zhao X., Gao S., Wanng X., Zhang R. Progress in research and application of Nanofiltration (NF) technology for brackish water treatment. *Membranes*. 2021; 11(9):662. DOI: 10.3390/membranes11090662

7. Guo H., Li X., Yang W., Yao Z., Mei Y., Peng L.F. et al. Nanofiltration for drinking water treatment : a review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2021; 16(5):681-698. DOI: 10.1007/s11705-021-2103-5

8. 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

9. Jamaly S., Darwish N.N., Ahmed I., Hasan S.W. A short review on reverse osmosis pretreatment technologies. *Desalination*. 2014; 354:30-38. DOI: 10.1016/j.desal.2014.09.017

10. Goh P.S., Lau W.J., Othman M.H.D., Ismail A.F. Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies. *Desalination*. 2018; 425:130-155. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.018

11. Jiang S., Li Y., Ladewig B.P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. *Science of The Total Environment*. 2017; 595:567-583. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.235

12. Xu W., Liu D., He L., Zhao Z. A comprehensive membrane process for preparing lithium carbonate from high Mg/Li brine. *Membranes*. 2020; 10(12):371. DOI: 10.3390/membranes10120371

13. Li X., Mo Y., Qing W., Shao S., Tang C.Y., Li J. Membrane-based technologies for lithium recovery from water lithium resources : a review. *Journal of Membrane Science*. 2019; 591:117317. DOI: 10.1016/j.memsci.2019.117317

14. Mohammad A.W., Hilal N., Al-Zoubi H., Darwish N.A. Prediction of permeate fluxes and rejections of highly concentrated salts in nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science*. 2007; 289(1-2):40-50. DOI: 10.1016/j.memsci.2006.11.035

15. Pervov A.G. Removal of calcium carbonate from antiscalant-containing reverse osmosis concentrates. *Membranes and Membrane Technologies*. 2017; 7(3):192-205. DOI: 10.1134/S2218117217030063. EDN YTFQTL. (rus.).

16. Hedayatipour M., Jaafarzadeh N., Ahmadmoazzam M. Removal optimization of heavy metals from effluent of sludge dewatering process in oil and gas well drilling by nanofiltration. *Journal of Environmental Management*. 2017; 203:151-156. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.07.070

17. Ahmed S.F., Mehejabin F., Momtahn A., Tasannum N., Faria N.T., Mofijur M. Strategies to improve membrane performance in wastewater treatment. *Chemosphere*. 2022; 306:135527. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135527

18. Voutchkov N. Overview of seawater concentrate disposal alternatives. *Desalination*. 2011; 273(1):205-219. DOI: 10.1016/j.desal.2010.10.018

19. Al-Ghamdi A.A. Recycling of Reverse Osmosis (RO) reject streams in brackish water desalination plants using fixed bed column softener. *Energy Procedia*. 2017; 107:205-211. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.12.174

20. Najid N., Fellaou S., Kouzbou S., Gourich B., Ruiz-García A. Energy and environmental issues of seawater reverse osmosis desalination considering boron rejection : a comprehensive review and a case study of exergy analysis. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 156:373-390. DOI: 10.1016/j.psep.2021.10.014

21. Koyuncu I., Yalcin F., Ozturk I. Color removal of high strength paper and fermentation industry effluents with membrane technology. *Water Science and Technology*. 1999; 40(11-12):241-248. DOI: 10.2166/wst.1999.0718

22. Collivignarelli M.C., Abbà A., Miino M.C., Damiani S. Treatments for color removal from wastewater: State of the art. *Journal of Environmental Management*. 2019; 236:727-745. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.094

23. Zheng Y., Yu S., Shuai S., Zhou Q., Cheng Q., Liu M. et al. Color removal and COD reduction of biologically treated textile effluent through submerged filtration using hollow fiber nanofiltration membrane. *Desalination*. 2013; 314:89-95. DOI: 10.1016/j.desal.2013.01.004

24. Jafarinejad S., Esfahani M.R. A review on the nanofiltration process for treating wastewaters from the petroleum industry. *Separations*. 2021; 8(11):206. DOI: 10.3390/separations8110206

25. Turek M., Mitko K., Piotrowski K., Dydo P., Laskowska E., Jakóbk-Kolon A. Prospects for high water recovery membrane desalination. *Desalination*. 2017; 401:180-189. DOI: 10.1016/j.desal.2016.07.047

26. Bunani S., Yörükoğlu E., Sert G., Yüksel Ü., Yüksel M., Kabay N. Application of nanofiltration for reuse of municipal wastewater and quality analysis of product water. *Desalination*. 2013; 315:33-36. DOI: 10.1016/j.desal.2012.11.015

27. Pervov A.G., Shirkova T.N., Tikhonov V.A. Design of reverse osmosis and nanofiltration membrane facilities to treat landfill leachates and increase recoveries. *Membranes and Membrane Technologies*. 2020; 2:296-309.

Received July 7, 2023.

Adopted in revised form on July 17, 2023.

Approved for publication on September 6, 2023.

B I O N O T E S: **Dmitriy V. Spitsov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute for Environmental Engineering Construction and Mechanization; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 531559; spitsovdv@mgsu.ru;

Alexei G. Pervov — Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 168126; ale-pervov@yandex.ru;

Ivanna A. Abrosimova — senior lecturer at the Department of General and Applied Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8469-6903; abrosimovaia94@gmail.com.

Contribution of the authors:

Dmitriy V. Spitsov — methodology, data gathering and processing, writing of article, supervision.

Alexei G. Pervov — conceptualization, scientific guidance.

Ivanna A. Abrosimova — scientific editing of the text, conclusions

The authors declare that there is no conflict of interests.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.2004-2014

Активизация внедрения технологий информационного моделирования в российской строительной отрасли

Инеcса Галеeвна Лукманова¹, Евгений Владимирович Ухалкин²

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

² Казенное предприятие города Москвы «Управление гражданского строительства» (КП УГС); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В российской строительной отрасли переход на технологии информационного моделирования (ТИМ) определен государством в качестве приоритетной задачи. Официально переход на ТИМ планировался в России в 2014 г., когда был принят «План поэтапного внедрения технологий информационного моделирования в области промышленного и гражданского строительства», который до сих пор находится на начальной стадии выполнения из-за существующих барьеров: недостаточно проработанной нормативно-законодательной базы; дефицита ТИМ-специалистов; высокой стоимости программного обеспечения (ПО), в основном зарубежного; отсутствия апробированных методов экономического обоснования целесообразности применения ТИМ. Проведен анализ мирового опыта стран, успешно внедривших ТИМ в производство, выявлены основные причины недопустимо низких темпов использования ТИМ в строительной отрасли. Предложены алгоритм активизации внедрения ТИМ в строительство, алгоритм действий по выбору ПО и методика расчета ожидаемого экономического эффекта от использования ТИМ при реализации инвестиционно-строительных проектов (ИСП). Приведены конечные результаты апробирования на практике разработанного методического инструментария.

Материалы и методы. В основе исследования лежат системный, процессный и ситуационный подходы, методы сравнительного и факторного анализа результатов зарубежного и отечественного опыта, а также методы экономико-математического и графического моделирования. Этот методический набор позволил оценить влияние факторного пространства на процессы применения ТИМ на этапах жизненного цикла ИСП и предложить алгоритм действий по активизации внедрения ТИМ в отечественной строительной отрасли.

Результаты. Проведенный анализ итогов применения ТИМ в России и развитых зарубежных странах позволил установить отставание и выявить его основные причины, а также наметить пути их устранения.

Выводы. Предложенные алгоритмы, экономико-математическая модель расчета ожидаемого экономического эффекта дадут возможность российским строительным компаниям обоснованно подойти к процессу внедрения ТИМ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технологии информационного моделирования (ТИМ), инвестиционно-строительный проект (ИСП), взаимодействие участников проекта, принятие управленческих решений, алгоритм выбора вариантов программного обеспечения, уровни зрелости ТИМ, показатели эффективности внедрения ТИМ, методика расчета ожидаемого эффекта

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лукманова И.Г., Ухалкин Е.В. Активизация внедрения технологий информационного моделирования в российской строительной отрасли // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 2004–2014. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.2004-2014

Автор, ответственный за переписку: Евгений Владимирович Ухалкин, ukhalkin@yandex.ru.

Activation of implementation of information modelling technologies in the Russian construction industry

Inessa G. Lukmanova¹, Evgeny V. Ukhalkin²

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

² State Enterprise of the city of Moscow “Civil Engineering Department”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the Russian construction industry, the transition to information modelling technologies (BIM) is defined by the government as a priority task. Officially, the transition to BIM was planned in Russia in 2014, when the “Plan of phased

introduction of information modelling technologies in the field of industrial and civil construction" was adopted, which is still, unfortunately, at the initial stage of implementation due to the following barriers: insufficiently developed regulatory and legal framework; shortage of BIM specialists; high cost of software (mostly foreign), as well as the lack of tested methods of economic justification of the feasibility of the application of BIM. The article analyzes the world experience of the countries, which have successfully implemented BIM in production, and reveals the main reasons for the unacceptably low rates of BIM usage in the construction industry. The authors of the article offer the algorithm of activation of introduction of BIM in construction, algorithm of actions for software choosing and a technique for calculation of the expected economic effect of the use of information modelling technologies in investment and building projects realization. The final results of testing in practice the developed methodological tools are given.

Materials and methods. The research is based on system, process and situational approaches, methods of comparative and factor analysis of the results of foreign and domestic experience, as well as methods of economic-mathematical and graphic modelling. This methodological set allowed assessing the influence of factor space on the processes of applying BIM at the stages of the life cycle of ICP and to propose an algorithm of actions to intensify the implementation of BIM in the domestic construction industry.

Results. The analysis of the results and outcomes of the use of BIM in Russia and in developed foreign countries, carried out by the authors, made it possible to establish the lag and identify its main causes, as well as outline ways to eliminate them.

Conclusions. The proposed algorithms, economic and mathematical model for calculating the expected economic effect will enable Russian construction companies to reasonably approach the process of introducing BIM in the implementation of investment and construction projects.

KEYWORDS: Building Information Modelling (BIM), investment and construction project (ICP), interaction of project participants, management decision-making, software options selection algorithm, BIM maturity levels, BIM implementation efficiency indicators, methodology for calculating the expected effect

FOR CITATION: Lukmanova I.G., Ukhalkin E.V. Activation of implementation of information modelling technologies in the Russian construction industry. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):2004-2014. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.2004-2014 (rus.).

Corresponding author: Evgeny V. Ukhalkin, ukhalkin@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду активного формирования в глобальном информационном пространстве нового цифрового экономического уклада, мировая строительная отрасль переживает комплексную цифровую трансформацию. Такие кардинальные перемены в строительной отрасли связаны с тем, что объекты строительства стали более технологичными, возросла сложность бизнес-процессов в условиях сокращения нормативных сроков реализации инвестиционно-строительных проектов (ИСП) [1]. В результате этих требований наблюдается дефицит времени для получения и обработки необходимой информации с целью своевременного принятия рациональных управленческих решений. Наряду с этим современные ИСП из-за их технологической сложности стали информационно более насыщенными и этот фактор стремительно снижает эффективность традиционных методов управления на стадиях проектирования и реализации объекта строительства.

На фоне происходящих перемен еще сильнее проявляются недостатки традиционных методов проектирования, существующих долгие годы, а именно:

- выпуск проектной документации несоответствующего качества;
- неувязки смежных разделов проектной документации вследствие недостаточного уровня взаимодействия между проектировщиками;
- несвоевременность и низкая результативность процессов внесения изменений в архитектурно-планировочные и конструктивные решения проектной документации;

- низкий уровень автоматизации процессов разработки проектно-сметной документации (ПСД);

- множество запросов на недостающую информацию по проекту от подрядных организаций, что является следствием отсутствия своевременной оперативной связи с источником информации — разработчиками проектной документации;

- устаревшие технологии производства, отсутствие интеграции новых и существующих методов обработки данных;

- низкая производительность труда и большие административно-накладные расходы на стадиях проектирования и строительства.

В настоящее время для устранения вышеперечисленных недостатков в строительной отрасли России на смену низко эффективным в современных реалиях традиционным методам проектирования с передачей проектной документации подрядчику в бумажном виде на строительную площадку приходят инновационные способы реализации ИСП с применением технологий информационного моделирования (ТИМ)¹. Переход мировой строительной отрасли на использование ТИМ стал закономерной реакцией на необходимость обработки большого объема информации об объекте строительства, а также последующей корректировки данных и своевременного внесения изменений в процессы проектирования и строительства объекта.

¹ Building Information Modeling Project Execution Planning Guide. The Computer Integrated Construction Research Group. The Pennsylvania State University, 2010. 134 p.

Такой переход стал возможен в результате появления специализированного программного обеспечения (ПО), способного создать цифровую информационную модель (ЦИМ) ИСП, отражающую прямые и обратные связи всех участников проекта и наполненную большим объемом всей необходимой информации. Данная информация используется в течение всего жизненного цикла (ЖЦ) ИСП [2]. По своей сути ТИМ — это новый способ управления инвестиционно-строительным проектом на базе его ЦИМ.

По сравнению с традиционным подходом ТИМ обладает ощутимыми преимуществами, с помощью которых можно эффективно решить большой спектр задач в процессе реализации ИСП [3].

На данный момент преимущества ТИМ объясняют их масштабное внедрение в мировую строительную отрасль и в значительной степени в практику управления ИСП. Применение технологий повышает качество ПСД, обеспечивает своевременный информационный обмен, ускоряет взаимодействие между участниками ИСП и повышает результативность управленческих решений, что в целом снижает затраты на этапе строительства [4].

Несмотря на активный переход мировой строительной отрасли на ТИМ, в нашей стране существует множество причин, тормозящих внедрение технологий информационного моделирования. Среди основных факторов эксперты называют, прежде всего, отсутствие системной, четко выстроенной стратегии; дефицит высококвалифицированных специалистов; устаревшие методы проектирования и производства; дорогостоящие программные продукты; недостаточное финансирование. Одним из ключевых факторов, замедляющим переход на ТИМ, является отсутствие у пользователей понимания экономической целесообразности перехода ввиду сложности и невозможности подсчета экономического эффекта в краткосрочном периоде планирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для того чтобы наметить рациональные пути устранения выявленных факторов, сдерживающих внедрение ТИМ, следует оценить существующее состояние, провести сравнительный анализ результатов с другими продвинутыми в этом аспекте странами и разработать необходимый методический инструментарий, адаптированный к российским условиям, на основе использования системного, процессного и ситуационного подходов, чтобы учесть взаимодействие всех участников; реализацию реинжиниринга бизнес-процессов и конкретные условия функционирования отечественной строительной отрасли.

Цифровая трансформация строительной отрасли в развитых странах началась достаточно давно.

Так, например, в США в 2003 г. была сформулирована национальная программа 3D-4D-BIM Program, в соответствии с которой использование ТИМ стало обязательным для объектов строительства общественных зданий².

Мировыми лидерами по уровню внедрения ТИМ в строительной отрасли являются Великобритания, США, страны ЕС и Сингапур. Эти страны достигли значительных успехов как по доле компаний, применяющих ТИМ в своей деятельности, так и по получаемому эффекту от использования данных технологий³ [5, 6]. Также в указанных странах оказывается существенная поддержка строительной отрасли со стороны государства в части внедрения ТИМ: разработаны дорожные карты перехода инвестиционно-строительной деятельности на технологии информационного моделирования и оказывается дополнительная поддержка при ведении строительства с использованием информационного моделирования [7].

В табл. 1 представлены значения показателей эффективности использования технологий информационного моделирования в ИСП стран — лидеров по внедрению информационных технологий [8, 9].

Технологии информационного моделирования не новы для России. В отечественной практике в последние 10–15 лет они уже использовались ранее в частном порядке отдельными компаниями строительной отрасли. До принятия государством программных решений о переходе на ТИМ они применялись при строительстве технологически сложных объектов в нефтегазовой отрасли, атомной энергетике и т.д., в меньшей степени — в области гражданского строительства коммерческими застройщиками.

Знаковым событием в конце 2021 г. стало утверждение Правительством РФ дорожной карты по использованию и внедрению технологий информационного моделирования в строительной отрасли. Ожидалось, что ТИМ будут способствовать своевременному принятию управленческих решений, улучшению качества строительной продукции и сокращению сроков реализации ИСП, что в конечном счете обеспечит их эффективность. В табл. 2, разработанной авторами на основании данных Минстроя РФ, приведены значения ожидаемых результатов показателей эффективности от внедрения ТИМ в России.

² Оценка применения BIM-технологий в строительстве. Результаты исследования эффективности применения BIM-технологий в инвестиционно-строительных проектах российских компаний : отчет. М., 2016. 47 с.

³ BIM Project Execution Planning Guide — Version 2.2. Computer Integration Construction Research Program is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License, except where otherwise noted. The Pennsylvania State University, 2019.

Табл. 1. Показатели эффективности от применения ТИМ за рубежом

Table 1. Performance indicators from the use of BIM abroad

Показатели эффективности Performance indicators	Значения показателей / Indicator values			
	Страны ЕС EU countries	Великобритания Great Britain	США The USA	Сингапур Singapore
Сокращение срока реализации ИСП, % Reduction of the ICP implementation timeframe, %	19	10–12	50	32
Сокращение ошибок в ПСД, % Reduction of errors in the DED, %	41	60	77	70
Сокращение сроков увязки и согласования ПСД, % Reduction of the time required for coordination and approval of the DED, %	35	50	71	60
Сокращение затрат на СМР, % Reduction of CIW costs, %	23	20	50	34

Табл. 2. Значения ожидаемых показателей эффективности от внедрения ТИМ в РФ

Table 2. Values of the expected performance indicators from the introduction of BIM in the Russian Federation

Показатели эффективности Performance indicators	Ожидаемые результаты Expected results
Сокращение сроков разработки ПСД Reduced timeframe for the development of the DED	на 20–50 % / by 20–50 %
Сокращение ошибок и неувязок в ПСД Reduction of errors and inconsistencies in the DED	до 40 % / up to 40 %
Сокращение сроков выполнения СМР / Reduced time to complete CIW	на 10 % / by 10 %
Сокращение срока реализации ИСП / Reduced ICP implementation time	до 50 % / up to 50 %
Сокращение сроков увязки и согласования ПСД Reduced timelines for linking and agreeing the DED	до 90 % / up to 90 %
Снижение неточностей планирования бюджета Reduction of budget planning inaccuracies	в 4 раза / 4 times
Сокращение затрат на СМР / Reduction of CIW costs	до 30 % / up to 30 %

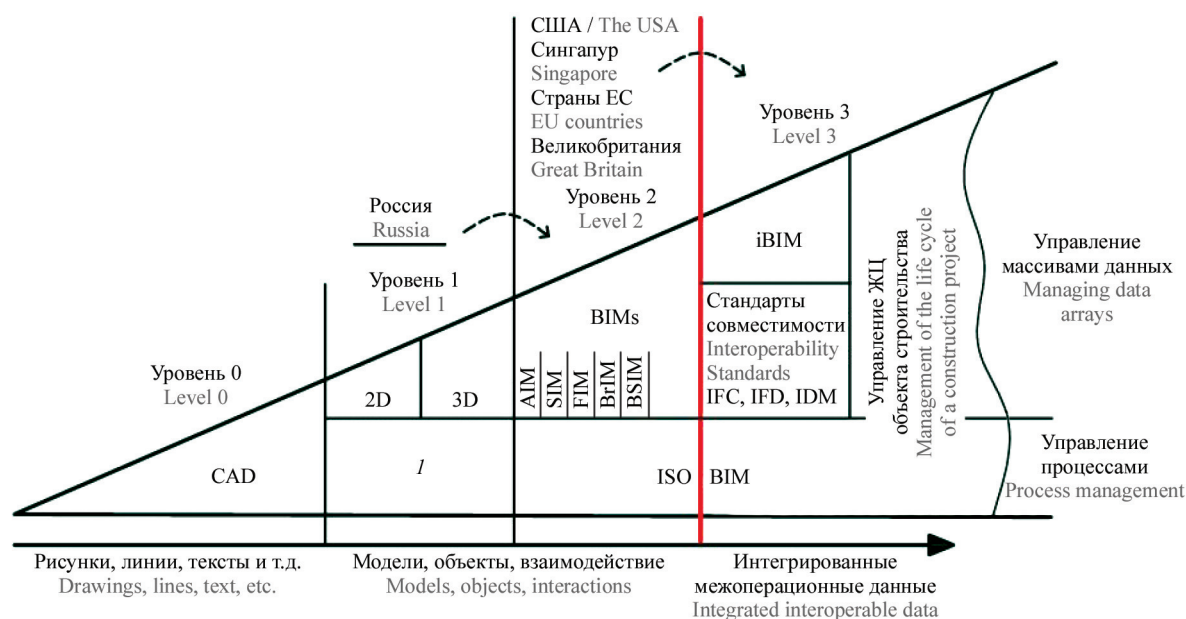
В апреле 2020 г. компания PwC в России представила результаты исследования «PropTech в России: обзор практики применения ТИМ и инновационных решений в области проектирования». В представленном обзоре указано, что только 5–7 % компаний инвестиционно-строительной сферы России используют ТИМ (в основном в крупных городах). По состоянию на 2021 г. это значение увеличилось до 12 %. Для сравнения, в Великобритании в 2019 г. уровень использования ТИМ компаниями в инвестиционно-строительной сфере составил 73 % (в 2011 г. это значение составляло около 10 %), в странах ЕС — 65 %, в США — 78 %, Сингапуре — 80 %.

На рис. 1 представлена диаграмма Бью-Ричардса, которая описывает так называемые «уровни зрелости ТИМ». Согласно этой диаграмме, Россия в настоящее время осуществляет переход с первого на второй уровень. В то же время США, Сингапур, страны ЕС и Великобритания уже находятся на втором уровне и переходят на третий [10–12].

Несмотря на правительственные документы и созданные условия [13–15], достигнуть перехода строительной отрасли России на использование ТИМ не удастся.

Стоит отметить, что по состоянию на конец 2022 г. ни одна компания инвестиционно-строительной отрасли РФ не представила в систематизированном виде информацию об экономическом эффекте применения ТИМ. Оценка масштабов внедрения ТИМ в настоящее время является также проблематичной [14, 16]. Нет точной информации, насколько широко используются возможности ТИМ — только для создания геометрической трехмерной модели или выполняется более полное насыщение информационной модели проектными данными.

К сожалению, существующие методики расчета экономического эффекта в строительстве не учитывают специфику отрасли и не адаптированы к условиям применения ТИМ. Сказывается влияние частично указанных выше и других причин. До сих пор отсутствует единая системная страте-



И — государственные и отраслевые стандарты проектирования / Government and industry design standards
 IFD — международный корпоративный словарь / International Framework for Dictionaries
 IDM — инструкция по передаче информации / Information Delivery Manual
 iBIM — интегральный BIM / Integrated Building Information Modelling
 AIM — архитектурная информационная модель / Architectural Information Model
 SIM — конструктивная информационная модель / System Information Modelling
 FIM — информационная модель оборудования / Fabrication Information Modelling
 BSIM — информационная модель инженерных сетей / Berkeley Short-channel IGFET Model
 BrIM — информационная модель дорог / Road Information Modelling

Рис. 1. Диаграмма Бью-Ричардса, описывающая уровни зрелости ТИМ

Fig. 1. The Bew-Richards diagram describing the levels of maturity of BIM

гия развития внедрения ТИМ в производственные отрасли, в которой должны найти свое место все имеющиеся нормативные правительственные документы с указанием конкретных тактических планов, мероприятий, действий, ответственных лиц, источников и размеров финансирования.

Требуется незамедлительно организовать подготовку высококвалифицированных сотрудников, способных не только качественно применять имеющееся ПО, но разрабатывать отечественное с учетом особенностей российской строительной отрасли. Это программное обеспечение должно увязывать новые и действующие технологии производства и проектирования на основе реинжиниринга бизнес-процессов.

Необходимо предусмотреть на переходном этапе финансирование, учитывая большие первоначальные затраты на запуск этого серьезного процесса. Как отмечают эксперты, не все предприятия и даже крупные компании имеют на это достаточно средств.

В России, как показывает опыт, стоимость проектирования с применением ТИМ дороже в среднем на 18–20 % по сравнению с традиционным проектированием. При этом нет стопроцентной гарантии, что эти затраты окупятся в рамках одного-двух проектов. В условиях сложившейся на сегодняшний

день нестабильной экономической ситуации многие компании инвестиционно-строительной сферы считают, что окупить вложения в ТИМ и получить положительный экономический эффект от их применения в краткосрочный период сложно ввиду наличия больших рисков.

Таким образом, существует острая необходимость в соответствующем методическом пособии, которое позволит пользователям и разработчикам ТИМ экономически обосновать целесообразность внедрения технологий информационного моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сегодня актуальными задачами для ускорения внедрения ТИМ в строительной отрасли РФ являются разработка общего алгоритма действий по активизации внедрения ТИМ, методики выбора варианта ПО и метода расчета ожидаемого экономического эффекта на основе показателей эффективности применения технологии информационного моделирования на всех этапах ЖЦ ИСП.

Решение поставленных задач предполагается реализовать в соответствии с разработанным алгоритмом действий по активизации внедрения ТИМ в строительной отрасли РФ (рис. 2).

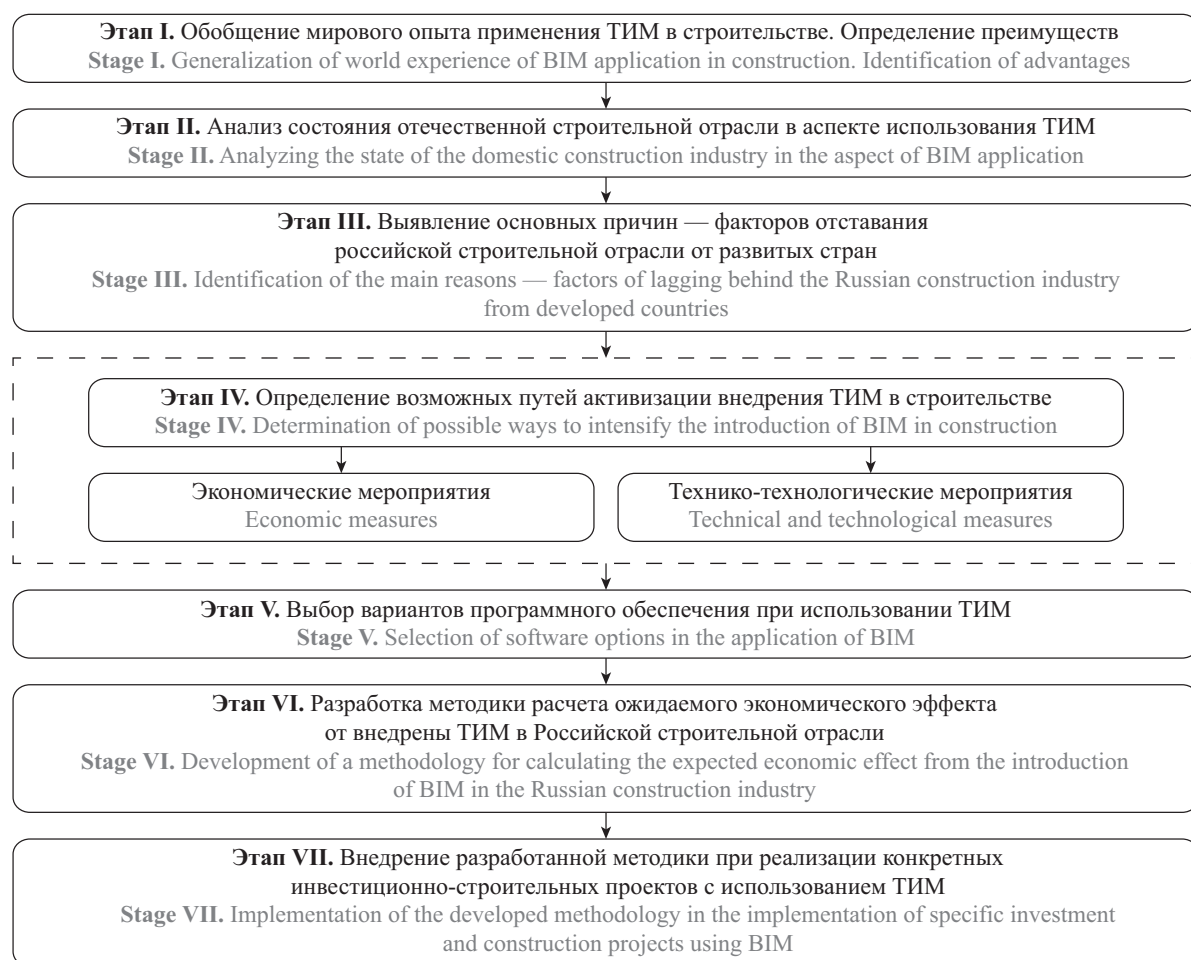


Рис. 2. Алгоритм действий по активизации внедрения ТИМ в строительной отрасли РФ

Fig. 2. Algorithm of actions to intensify the implementation of BIM in the construction industry of the Russian Federation

Выполнение этапов I–V предложенного алгоритма описано в данной статье в разделах «Введение» и «Материалы и методы». Для реализации этапов VI, VII разработаны соответствующие алгоритмы и экономико-математическая модель. На рис. 3 предлагается алгоритм действий по разработке отечественной методики расчета эффективности от использования ТИМ в ИСП.

Согласно представленному алгоритму на этапе I рассматриваются различные имеющиеся на сегодняшний день методики оценки эффективности внедрения ТИМ в ИСП на различных этапах ЖЦ проекта.

Для разработки конкретной методики оценки на этапе II необходимо определить требования к методам расчета с учетом специфики строительной отрасли. После чего выявляется возможность адаптации выбранных методов к специфике российской строительной отрасли (этап III) с учетом текущего уровня применения ТИМ в России. Основным нормативным документом, действующим в РФ в области ТИМ, является СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели

объектов на различных стадиях жизненного цикла», поэтому при определении требований к методам расчета и выявлении возможности адаптации к выбранным методам следует руководствоваться этим нормативным документом.

Для расчета ожидаемого экономического эффекта и выбора соответствующего ПО на IV этапе следует предложить набор частных показателей, количественно оценивающих уровень различных экономических характеристик, а также позволяющих оценить в комплексе эффективность применения ТИМ при реализации ИСП. На основе анализа опытных данных по результативности ТИМ авторы предлагают проводить оценку с помощью следующих показателей:

ΔS — снижение сметной стоимости ИСП;
 ΔT — сокращение времени реализации ИСП;
 Δm — сокращение затрат на материалы и исправление дефектов;
 ΔZ_0 — дополнительные затраты на применение ТИМ.

На основании полученных значений расчетных критериальных показателей эффективности производится оценка и выбор вариантов программного

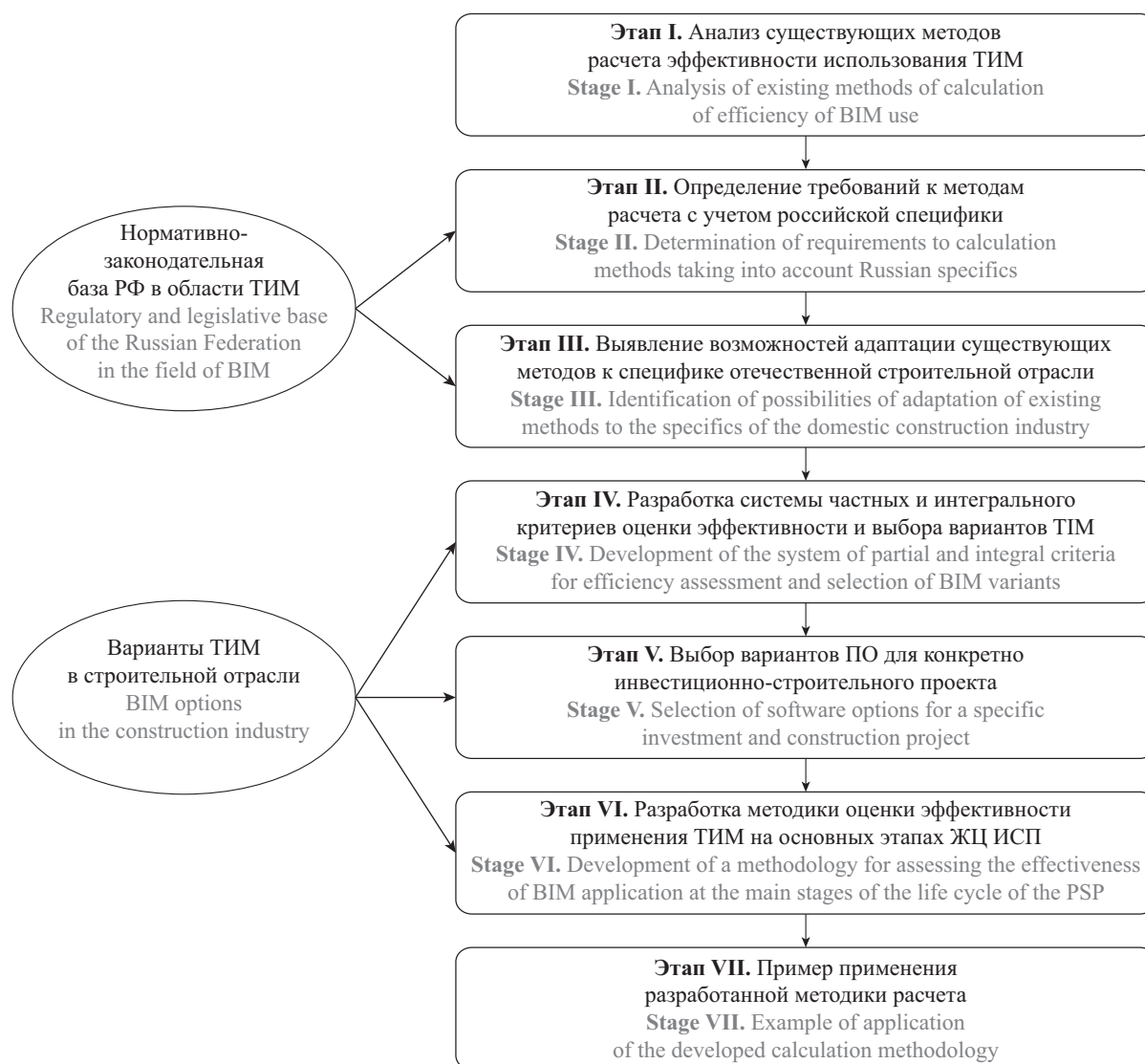


Рис. 3. Алгоритм действий по разработке отечественной методики расчета эффективности использования ТИМ в ИСП

Fig. 3. Algorithm of actions to develop a domestic methodology for calculating the effectiveness of the use of BIM in ICP

обеспечения (этап V) для каждого из этапов ЖЦ ИСП. В качестве примера на рис. 4 показана модель процесса выбора ПО для этапа проектирования.

На VI этапе предложена методика расчета интегрального показателя эффективности применения ТИМ при реализации ИСП (Э).

Зависимость интегрального показателя эффективности внедрения ТИМ при реализации ИСП от частных критериальных показателей можно представить в виде функции:

$$\mathcal{E} = f(\Delta S, \Delta T, \Delta m, \Delta Z_0).$$

Расчет экономического эффекта от использования ТИМ в ИСП предлагается производить по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ИСП}} = \mathcal{E}_{\Delta S} + \mathcal{E}_{\Delta T} + \mathcal{E}_{\Delta m} - \Delta Z_0,$$

где $\mathcal{E}_{\Delta S}$ — снижение стоимости строительства за счет сокращения прямых затрат; $\mathcal{E}_{\Delta T}$ — сокращение затрат на условно-переменную часть накладных

расходов в результате сокращения сроков реализации ИСП; $\mathcal{E}_{\Delta m}$ — сокращение затрат на корректировку проектной документации, более точный подсчет количества материалов без излишних запасов, а также сокращение затрат на переделки в процессе выполнения строительно-монтажных работ $\mathcal{E}_{\Delta m} = f(\Delta Z_{\text{пр}}; \Delta Z_{\text{м}}; \Delta Z_{\text{д}})$; ΔZ_0 — дополнительные затраты связанные с внедрением ТИМ.

На заключительном VII этапе предлагается применить разработанную методику для оценки эффективности использования ТИМ в конкретных ИСП, реализуемых при помощи информационных технологий.

Предложенная методика расчета ожидаемого экономического эффекта была апробирована на примере строительства дошкольного образовательного учреждения (ДОУ) в г. Москве. Были произведены расчеты экономического эффекта до и после использования ТИМ. Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 3.

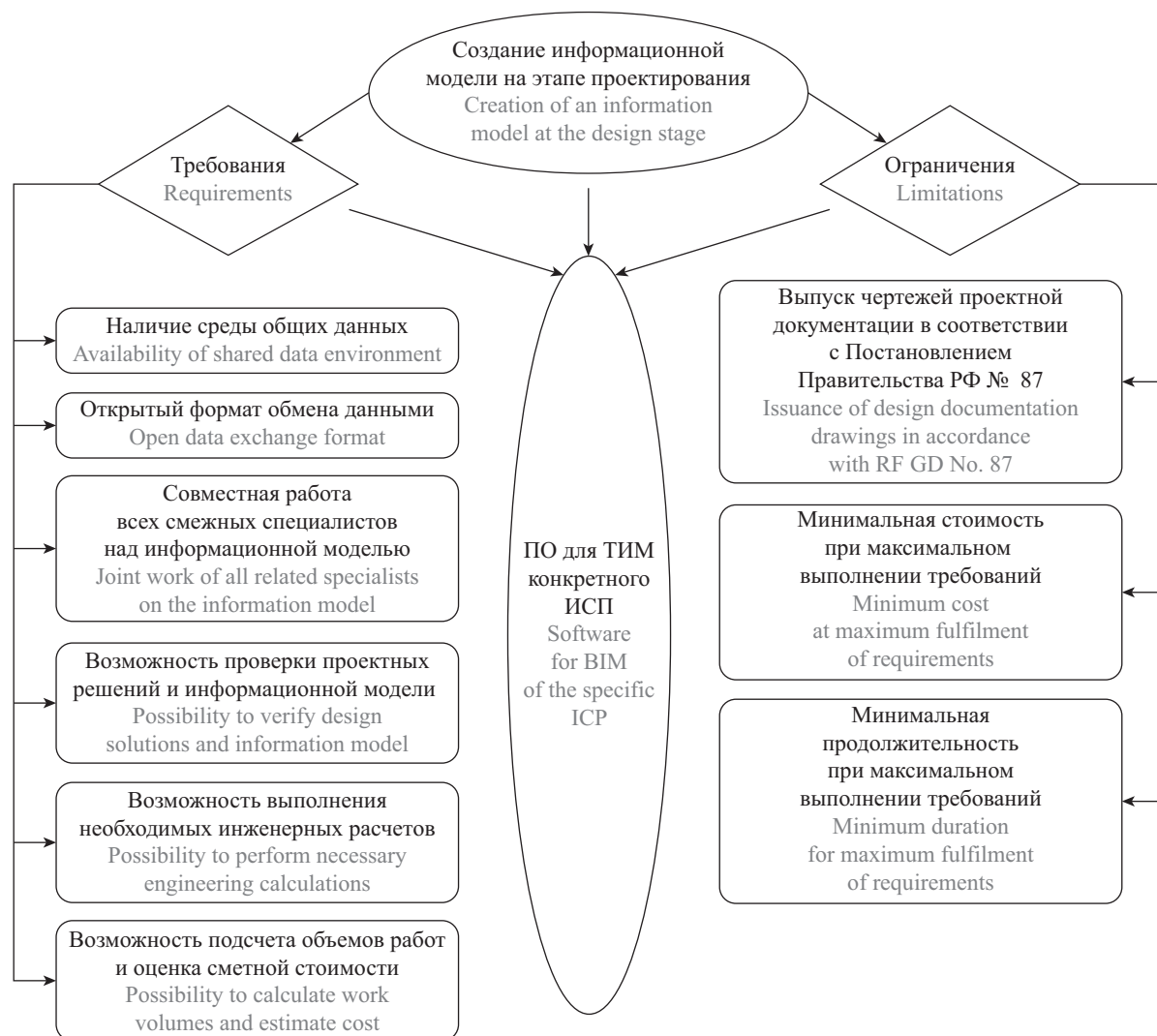


Рис. 4. Модель процесса выбора программного обеспечения для этапа проектирования

Fig. 4. Model of the software selection process for the design phase

Табл. 3. Расчетные значения экономического эффекта применения ТИМ в ИСП строительства ДОУ на 300 мест

Table 3. Calculated values of the economic effect of the application of BIM in the ICP of the construction of preschool for 300 children

Экономический эффект Economic effect	Расчетные значения, тыс. руб. Estimated values, thousand rubles	Показатели, % Indicators, %
Сокращение затрат на условно-переменную часть накладных расходов Reduction of costs for the conditionally variable part of overheads	7066,24	10
Сокращение прямых затрат на строительство Reduction of direct construction costs	30 149,28	7,9
Суммарное сокращение затрат на СМР Total reduction in CIW costs	37 215,52	6,3
Сокращение затрат на реализацию ИСП Reduction of ICP implementation costs	34 246,61	5,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ существующего состояния строительной отрасли в аспекте применения технологий информационного моделирования в сравнении с опытом зарубежных стран показал серьезное отставание.

Экспертно-аналитическая оценка позволила выявить основные факторы, препятствующие активному внедрению ТИМ в строительную отрасль России, а именно:

- отсутствие системной стратегии, учитывающей специфику и особенности отрасли;
- дефицит высококвалифицированных специалистов;
- низкий уровень компетенций и подготовки кадров;
- дорогостоящее программное обеспечение, преимущественно импортное;
- отсутствие интеграции новых технологий производства и проектирования с действующими;

- применение устаревших технологий;
- несвоевременное и неэффективное взаимодействие участников процесса;
- низкий уровень оперативного руководства;
- недостаточное финансирование;
- отсутствие методического инструментария для технико-экономического обоснования применения ТИМ.

В сложившейся в нашей стране непростой экономической обстановке последний фактор приобретает приоритетный характер. Предложенный авторами методический подход и методические разработки дают возможность пользователям и разработчикам экономически обосновать выбор ПО, а также необходимость и возможность применения ТИМ. Практическое использование предложенных алгоритмов и экономико-математической модели позволяет строительным компаниям рассчитать ожидаемый эффект с учетом всех расходов и принять обоснованные решения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Горохова Т.В.* Обоснование необходимости использования BIM-технологий с целью повышения эффективности строительных процессов. СПб. : Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2020. 12 с.
2. *Ho P., Matta C.* Building better: GSA's National 3D-4D-BIM Program // *Design Management Review*. 2009. Vol. 20. Issue 1. Pp. 39–44. DOI: 10.1111/j.1948-7169.2009.tb00223.x
3. *Ильинова В.В., Мицевич В.Д.* Международный опыт использования BIM-технологий в строительстве // *Российский внешнеэкономический вестник*. 2021. № 6. С. 79–93. DOI: 10.24412/2072-8042-2021-6-79-93. EDN XWHWUJ.
4. *Kreider R.G., Messner J.I.* The uses of BIM. Classifying and selecting BIM uses version 0.9 Penn State. Computer Integrated Construction. 2013. 23 p.
5. *Ayinla K.O., Adamu Z.* Bridging the digital divide gap in BIM technology adoption // *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2018. Vol. 25. Issue 10. Pp. 1398–1416. DOI: 10.1108/ecam-05-2017-0091
6. *Бачурина С.С., Голосова Т.С.* Этапы эффективного внедрения BIM в проектной компании // *Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании* : мат. VI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 20-летию кафедры управления проектами и программами. 2016. С. 104–109. EDN YGQRVP.
7. *Мурашова О.В.* Тенденции и проблемы внедрения информационных технологий в инвестиционно-строительной сфере // *Недвижимость*:

экономика, управление. 2016. № 3. С. 62–66. EDN XRVKVM.

8. *Добрынин А.П., Черных К.Ю., Куприяновский В.П., Куприяновский П.В., Синягов С.А.* Цифровая экономика — различные пути к эффективному применению технологий (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA и другие) // *International Journal of Open Information Technologies*. 2016. Т. 4. № 1. С. 4–11. EDN VKBTQH.

9. *O'Connell K.* Will Russia become the north star of BIM technology? // *Cycle of author's publications*. 2016.

10. *Eastman C., Teicholz P., Liston K., Sacks R.* BIM handbook: A Guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. 2nd Ed. Wiley & Sons, Inc., 2011. 624 p.

11. *Braila N., Panchenko N., Kankhva V.* Building information modeling for existing sustainable buildings // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 244. P. 05024. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405024

12. *Талапов В.В.* Основы BIM. Введение в информационное моделирование зданий : учебное пособие. М. : ДМК Пресс, 2011. 391 с.

13. *Сизенко С.А., Кузьмина Т.К.* Современные информационные технологии в работе службы заказчика (технического заказчика) // *Научное обозрение*. 2015. № 18. С. 156–159. EDN UWONWN.

14. *Cao D., Li H., Wang G.* Impacts of building information modeling (BIM) implementation on design and construction performance: a resource dependence theory perspective // *Frontiers of Engineering Management*. 2017. Vol. 4. Issue 1. P. 20. DOI: 10.15302/J-FEM-2017010

15. Kankhva V.S., Andryunina Ya.A., Belyaeva S.V., Sonin Ya.L. Construction in the digital economy: prospects and areas of transformation // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. P. 05008. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405008

16. Вербицкий В.А. Анализ программных комплексов и опыта внедрения BIM-технологий // International Journal of Advanced Studies. 2019. Т. 9. № 2. С. 14–28. DOI: 10.12731/2227-930X-2019-1-14-28. EDN LKKGGU.

Поступила в редакцию 23 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 1 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 10 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Инеcса Галеевна Лукманова** — доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики и управления в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 352474, ORCID: 0000-0002-2631-3780; luklmanova@mgsu.ru;

Евгений Владимирович Ухалкин — начальник инженерно-технического отдела комплекса градостроительной политики и строительства г. Москвы; **Казенное предприятие города Москвы «Управление гражданского строительства» (КП УГС)**; 127473, г. Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 2; ukhalkin@yandex.ru.

Вклад авторов:

Лукманова И.Г. — научное руководство, концепция исследования нормативной базы, нормативно-методическое обеспечение, методические решения в сфере оценки бюджетных возможностей, написание текста статьи, итоговые выводы.

Ухалкин Е.В. — предоставление фактического материала, анализ статистики.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gorokhova T.V. *Justification of the need to use BIM technologies in order to increase the efficiency of construction processes*. St. Petersburg State Economic University, 2020; 12. (rus.).

2. Ho P., Matta C. Building better: GSA's national 3D-4D-BIM program. *Design Management Review*. 2009; 20(1):39-44. DOI: 10.1111/j.1948-7169.2009.tb00223.x

3. Ilinova V.V., Mitsevich V.D. International experience of using BIM technologies in construction. *Russian Foreign Economic Journal*. 2021; 6:79-93. DOI: 10.24412/2072-8042-2021-6-79-93. EDN XWHWUJ. (rus.).

4. Kreider R.G., Messner J.I. *The uses of BIM. Classifying and selecting BIM uses version 0.9 Penn State*. Computer Integrated Construction. 2013; 23.

5. Ayinla K.O., Adamu Z. Bridging the digital divide gap in BIM technology adoption. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2018; 25(10):1398-1416. DOI: 10.1108/ecam-05-2017-0091

6. Bachurina S.S., Golosova T.S. Effective BIM implementation stages in project company. *Modern problems of project management in the investment and construction sector and environmental management : materials of the VI international scientific and practical conference dedicated to the 20th anniversary of the Department of Project and Program Management*. 2016; 104-109. EDN YGQRVP. (rus.).

7. Murashova O.V. The direction of the main attack or the digital world of construction. *Real Estate: Economics, Management*. 2016; 3:62-66. EDN XRVKMV. (rus.).

8. Dobrynin A., Chernykh K., Kupriyanovsky V., Kupriyanovsky P., Sinyagov S. The digital economy — the various ways to the effective use of technology (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, Big Data, and others). *International Journal of Open Information Technologies*. 2016; 4(1):4-11. EDN VKBTQH. (rus.).

9. O'Connell K. Will Russia Become the North Star of BIM Technology? *Cycle of author's publications*. 2016.

10. Eastman C., Teicholz P., Liston K., Sacks R. *BIM handbook : A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. 2nd ed. Wiley & Sons, Inc., 2011; 624.

11. Braila N., Panchenko N., Kankhva V. Building information modeling for existing sustainable buildings. *E3S Web of Conferences*. 2021; 244:05024. DOI: 10.1051/e3sconf/202124405024

12. Talapov V.V. *BIM Basics. Introduction to building information modeling : textbook*. Moscow, DMK Press, 2011; 391. (rus.).

13. Sinenko S.A., Kuz'mina T.K. Modern information technology in customer service (technical customer). *Scientific Review*. 2015; 18:156-159. EDN UWONWN. (rus.).

14. Cao D., Li H., Wang G. Impacts of building information modeling (BIM) implementation on design and construction performance: a resource dependence theory perspective. *Frontiers of Engineering Management*. 2017; 4(1):20. DOI: 10.15302/J-FEM-2017010

15. Kankhva V.S., Andryunina Ya.A., Belyaeva S.V., Sonin Ya.L. Construction in the digital econ-

omy: prospects and areas of transformation. *E3S Web of Conferences*. 2021; 244:05008. DOI: 10.1051/e3s-conf/202124405008

16. Verbitsky V.A. Analysis of software systems and experience in implementing BIM-technologies. *International Journal of Advanced Studies*. 2019; 9(2):14-28. DOI: 10.12731/ 2227-930X-2019-1-14-28. EDN LKKGGU. (rus.).

Received May 23, 2023.

Adopted in revised form on September 1, 2023.

Approved for publication on September 10, 2023.

B I O N O T E S: **Inessa G. Lukmanova** — Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Economics and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 352474, ORCID: 0000-0002-2631-3780; luklmanova@mgsu.ru;

Evgeny V. Ukhalkin — Head of the Engineering and Technical Department of the Complex of Urban Planning Policy and Construction of the City of Moscow; **State Enterprise of the city of Moscow “Civil Engineering Department”**; build. 2, 16 Krasnoproletarskaya st., Moscow, 127473, Russian Federation; ukhalkin@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Inessa G. Lukmanova — scientific guidance, the concept of the study of the regulatory framework, regulatory and methodological support, methodological solutions in the field of assessing budget opportunities, writing the text of the article, final conclusions.

Evgeny V. Ukhalkin — provision of factual material, analysis of statistics.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Меры государственной поддержки внедрения технологий информационного моделирования в России

Татьяна Николаевна Кисель

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Начиная с 2014 г. в России проводится подготовка строительной отрасли к введению обязательного применения технологий информационного моделирования (ТИМ) при работе с объектами, финансируемыми из бюджета. Такое требование должно было вступить в силу в 2022 г., однако в силу обстоятельств отложено. Приводятся результаты исследования, целью которого стало выявление мнений представителей инвестиционно-строительной сферы об основных направлениях государственной поддержки внедрения ТИМ с определением взаимосвязи мнений респондентов и вида деятельности их организаций. Результаты исследования помогут сконцентрировать усилия на тех из них, в которых отрасль нуждается сильнее. Выявление мнения респондентов в разрезе вида деятельности их организаций даст возможность точечного применения мер государственной поддержки.

Материалы и методы. Первичные данные для исследования собраны методом опроса (анкетирования) и обработаны с помощью метода факторного анализа. В качестве фактора, потенциально влияющего на мнение респондентов, выбран вид деятельности их организаций.

Результаты. Представлены результаты анализа оценки респондентами результативности мер государственного регулирования внедрения ТИМ в целом по всей выборке. На основе разделения респондентов по группам по виду деятельности проведен факторный анализ оценки результативности мер государственного регулирования внедрения ТИМ. Приведена оценка наиболее значимых в наши дни мер государственной поддержки при внедрении ТИМ. Выполнен анализ как в целом по выборке, так и по группам респондентов.

Выводы. Установлено, что вид деятельности организации респондентов оказывает существенное влияние на их мнение относительно результативности мер государственной политики, реализованных к моменту проведения опроса, а также относительно наиболее своевременных и необходимых к реализации мер в настоящее время.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, предприятия инвестиционно-строительной сферы, технологии информационного моделирования, опрос, респонденты, меры государственной поддержки внедрения ТИМ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кисель Т.Н. Меры государственной поддержки внедрения технологий информационного моделирования в России // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 2015–2024. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.2015-2024

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Николаевна Кисель, doremi2@yandex.ru.

Measures of state support for the implementation of information modelling technologies in Russia

Tatiana N. Kisel

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

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the study is due to the current preparation of the construction industry in Russia for the introduction of a mandatory requirement for the use of building information modelling (BIM) when working with objects financed from the budget. Such a requirement was supposed to come into force in 2022, but due to a number of circumstances, it was postponed. The article presents the results of the study, the purpose of which was to identify the opinions of representatives of the investment and construction sector on the main directions of state support of BIM implementation with the determination of the relationship between the opinions of respondents and the type of activity of their organizations. The results of the study will help to concentrate efforts on those that the industry needs the most. Identification of the respondents' opinion in the context of the type of activity of their organizations will provide an opportunity for targeted application of state support measures in relation to those types of organizations that need them most urgently.

Materials and methods. Primary data for the study were collected by survey (questionnaire) and processed using the factor analysis method. At the same time, the type of activity of their organizations was chosen as a factor potentially influencing the opinion of respondents.

Results. The results of the analysis of respondents' assessment of the effectiveness of measures of state regulation of the BIM implementation in general for the entire sample are presented. Based on the division of respondents into groups by type of activity, a factor analysis to assess the effectiveness of measures of state regulation of the BIM implementation

was carried out. An assessment of the most significant state support measures in our days for the BIM implementation was made. The analysis was carried out both for the sample as a whole and for groups of respondents. The analysis revealed that different groups of respondents prefer different support measures.

Conclusions. It was found that the type of activity of the respondent's organization has a significant impact on their opinion on the effectiveness of the state policy measures implemented by the time of the survey, as well as on the most timely and necessary measures that need to be implemented at present.

KEYWORDS: construction, investment and construction enterprises, building information modelling, survey, respondents, measures of state support of BIM implementation

FOR CITATION: Kisel T.N. Measures of state support for the implementation of information modelling technologies in Russia. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):2015-2024. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.2015-2024 (rus.).

Corresponding author: Tatiana N. Kisel, doremi2@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровизация экономики является важнейшим трендом развития в России. Она обусловлена необходимостью формирования конкурентоспособной экономики за счет повышения ее эффективности, импортозамещения, внедрения передовых технологий во всех отраслях и сферах жизнедеятельности. Для решения задачи ускоренной реализации цифровых технологий в экономике и социальной сфере разработана и в 2017 г. утверждена программа «Цифровая экономика Российской Федерации». В соответствии с принципами программно-ориентированного подхода в управлении, реализуемого в России, цели и задачи, связанные с цифровизацией, каскадируются от общегосударственного уровня на уровень регионов и отраслей. В связи с этим документы, направленные на цифровую трансформацию (региональные программы, стратегии и т.д.), утвердили регионы. Также ведомственные проекты, ориентированные на цифровизацию основных отраслей экономики, разработаны и введены в действие соответствующими министерствами.

Строительная отрасль, несмотря на ее масштабы и значимость для экономики страны, на данный момент не имеет соответствующей ведомственной программы. Однако раздел «Цифровизация строительной отрасли» предусмотрен в проекте Стратегии развития строительной отрасли до 2030 года. Основные ориентиры цифровой трансформации заложены в Распоряжении Правительства РФ от 27.12.2021 № 3883-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации строительной отрасли, городского и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2030 года». В указанном документе прописаны ключевые технологии, которые будут внедрены в строительной отрасли в результате ее цифровой трансформации. Первое место среди них занимают технологии информационного моделирования (ТИМ). Их применение в полном объеме подразумевает использование и прочих указанных в документе инновационных технологий, например технологии виртуальной и дополненной реально-

сти, технологии пространственного анализа и моделирования и т.д.

ТИМ — это, по сути, совокупность современных методов управления инвестиционным проектом на всех стадиях его жизненного цикла, при которых основой такого управления становится создание информационной модели объекта строительства. Их применение дает многочисленные преимущества, связанные с экономией труда и материалов, точностью планирования [1–3], повышением качества проектирования [4] и, как итог, качества строительства, улучшением взаимодействия между участниками проекта за счет формирования и использования единого цифрового источника информации об объекте [5], и многие другие. Российские¹ и зарубежные исследования [6–8] показали, что применение ТИМ позволяет значительно повысить экономические показатели инвестиционно-строительного проекта (ИСП) (количественные оценки при этом могут колебаться). Соответственно, масштабное внедрение и применение ТИМ могло бы дать весомый экономический эффект в целом по отрасли (а значит, и для всей экономики), а также значительно повысить эффективность государственных инвестиций в объекты капитального строительства.

Преимущества ТИМ привели к тому, что во многих странах их внедрение было поддержано на государственном уровне. Наиболее активные пользователи ТИМ — страны, в которых были сформулированы требования по обязательному применению ТИМ в ходе реализации проектов с участием бюджетных средств и при строительстве общественных зданий, — Великобритания, США, Сингапур [9–13]. Эти страны ранее остальных сформулировали «дорожные карты» внедрения ТИМ [14]. В Европейском союзе (ЕС) среди стран, оказавшихся в первых рядах при внедрении ТИМ, — Германия и Нидерланды [15–19]. Вслед

¹ Отчет. Оценка применения BIM-технологий в строительстве. Результаты исследования эффективности применения BIM-технологий в инвестиционно-строительных проектах российских компаний // Concurator. URL: <http://concurator.ru/information/bim-value/>

за ними активную работу по реализации ТИМ стали проводить в Швеции, Франции, Норвегии, Дании, Италии, Ирландии и др. [20]. В ЕС для более активного внедрения ТИМ и, соответственно, снижения расходов на строительство была создана Европейская группа государственных заказчиков ТИМ-проектов (EU BIM Task Group — рабочая группа по BIM Евросоюза) [21]. В ряде стран разработаны и внедрены в действие BIM-стандарты. Лидерами в этом направлении являются Великобритания и США, где они введены в действие более 10 лет назад. Остальные страны, включая Канаду, Норвегию, Германию, Нидерланды, Австралию, Новую Зеландию, Китай, Сингапур и другие, следуют в русле их наработок [22].

Преследуя указанные ранее цели, в том числе повышение экономической эффективности и качества строительства, эффективности государственных инвестиций, а также цифровой трансформации экономики в целом и строительной отрасли в частности, в России также с 2014 г. на государственном уровне поддерживается внедрение ТИМ. Создается необходимая инфраструктура в части нормативной базы и системы стандартов, подготовки персонала, организации процессов экспертизы. Однако наиболее знаковым и демонстрирующим решительность государственной позиции в отношении необходимости внедрения ТИМ стало решение об обязательности его применения в ходе реализации ИСП с государственным участием, утвержденное Постановлением Правительства РФ от 05.03.2021 № 331. В соответствии с его положениями использование ТИМ для всех объектов капитального строительства с государственным участием должно было стать обязательным с 1 января 2022 г. Но в силу обстоятельств, связанных как с неподготовленностью отрасли, так и с действием введенных в отношении России в 2022 г. экономических санкций и ухода с российского рынка ряда крупных производителей ПО в области ТИМ, это решение было отложено сначала до 1 марта 2023 г. (Постановление от 27.05.2022 № 962 «О внесении изменений в постановление Правительства РФ от 15.09.2020 № 1431»), а затем на более поздний срок — 1 июля 2024 г. (Постановление Правительства РФ № 2357 «О внесении изменений в Постановление Правительства РФ № 331»). В этот срок должны быть завершены необходимые подготовительные и обеспечивающие мероприятия, позволяющие государственным заказчикам и их контрагентам реализовать требование об использовании ТИМ.

Данная статья стала результатом исследования мнений представителей инвестиционно-строительной сферы об основных направлениях государственной поддержки внедрения ТИМ, а также эффективности государственной политики по реализации мероприятий, направленных на поддержку

ТИМ в России. В ходе исследования были поставлены и решены следующие задачи:

- оценка респондентами результативности мер государственного регулирования внедрения ТИМ, реализованных к настоящему времени;
- анализ взаимосвязи вида деятельности организации респондента и его уровня оценки результативности мер государственного регулирования внедрения ТИМ;
- исследование мер государственной поддержки при внедрении ТИМ, которые, по мнению респондентов, являются наиболее значимыми на современном этапе;
- анализ взаимосвязи вида деятельности организации респондента и его отношение относительно мер государственной поддержки внедрения ТИМ, наиболее значимых в настоящее время.

Объект исследования — представители предприятий, учреждений и организаций, органов власти, профессиональных объединений, деятельность которых связана с реализацией ИСП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на материалах и первичных данных, собранных в ходе опроса, посвященного изучению проблем внедрения технологий информационного моделирования в ИСП российских компаний. В опросе приняли участие 180 респондентов.

Целевая аудитория опроса — представители предприятий, учреждений и организаций, органов власти, профессиональных объединений, деятельность которых связана с реализацией ИСП, осведомленные об особенностях ТИМ и проявляющие заинтересованность в рассматриваемой проблематике внедрения ТИМ. Это обеспечило компетентность респондентов по отношению к вопросам исследования и релевантность их ответов. Для достижения заявленного качества выборки сбор данных осуществлялся на первом Объединенном Евразийском конгрессе «ТИМ-сообщество 2021» методом прямого (раздача анкет) и электронного анкетирования. Результаты анализа собранных данных по вопросам анкеты представлены в виде отчета об исследовании и находятся в открытом доступе². В нем подробно описаны методы формирования выборки, сбора первичных данных и инструментарий исследования (состав вопросов анкеты). Основной целью исследования при сборе данных стало выявление факторов внутреннего и внешнего (по отношению к предприятиям) характера, являющихся препятствиями и создающих риски при внедрении ТИМ.

² Отчет. Результаты исследования проблем внедрения технологий информационного моделирования в инвестиционно-строительных проектах российских компаний // НИУ МГСУ. URL: https://mgsu.ru/news/2022/Otchet_rez_issled_problem_TIM.pdf

Однако впоследствии появился вопрос, ставший отправной точкой для проведения дополнительного анализа собранных данных: оказывает ли вид деятельности организации респондента влияние на его оценку эффективности мер государственного регулирования внедрения ТИМ, а также на выбор предпочтительных мер государственной поддержки внедрения ТИМ в данный момент. Для того чтобы получить ответ на этот вопрос, выполнен дополнительный анализ полученной информации. При этом использовался метод факторного анализа, где в качестве фактора, определяющего величину переменной, выступал вид деятельности организации респондента.

Респондентами выступили представители различных организаций, являющиеся в той или иной мере участниками ИСП с применением ТИМ: девелоперы, инвесторы, заказчики, застройщики, подрядчики, проектировщики и архитекторы, эксплуатирующие организации, представители органов власти, государственных и муниципальных учреждений, а также образовательных учреждений, разработчики отечественного ПО для ТИМ и др. С целью проведения анализа по критерию вида деятельности респондентов разделили на группы (табл. 1). Значительное разнообразие участников ИСП, принявших участие в опросе, привело к тому, что при выборке в 180 участников организации того ли иного вида деятельности могли иметь такую незначительную долю, что это не позволило бы сделать существенных выводов. Группировка участников опроса по признаку схожести выполняемых функций и/или целей и интересов позволила сформировать числен-

но более весомые группы. По отношению к данным группам и был проведен факторный анализ.

В связи с тем, что в группе «Прочие» оказались самые разные организации, не представляющие единства интересов и выполняющие практически не связанные друг с другом функции, из дальнейшего анализа эта группа исключается.

Также следует отметить, что сбор данных проводился до начала СВО России на Украине и, соответственно, до введения в отношении России ряда экономических санкций и ухода с ее рынка некоторых производителей ПО. Так, весной 2022 г. с российского рынка ушли такие мировые лидеры производства ПО для ТИМ, как Autodesk и Nemetschek. Их уход с российского рынка мог бы повлиять на результаты исследования в части оценки значимости государственной поддержки российских производителей ПО.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Респондентов попросили оценить результативность мер государственного регулирования внедрения ТИМ в баллах от 0 до 10, где 0 означает, что эффект полностью не соответствует ожиданиям и не оправдал их; оценка 5 — что полученный эффект полностью соответствует тем ожиданиям, которые возлагались на государственное регулирование по вопросам внедрения; 10 ставится в случае, когда респондент считает, что реально полученный эффект от мер государственного регулирования многократно превосходит изначальные ожидания.

Средняя оценка эффективности мер государственного регулирования, полученная по выборке,

Табл. 1. Группы респондентов и их доля в сформированной выборке (таблица составлена автором²)

Table 1. Respondents groups and their share in the formed sample (table compiled by the author²)

Группа респондентов по виду деятельности Group of respondents by type of activity	Состав группы Group members	Доля в выборке, % Share in the sample, %
Проектировщики Designers	Проектировщики, архитекторы Designers, architects	28,9
Инвесторы Investors	Девелоперы, инвесторы Developers, investors	7,8
Исполнители Performers	Застройщики, технические заказчики, генподрядчики, подрядчики Developers, technical customers, general contractors, contractors	11,1
Государство State	Органы власти, государственные и муниципальные учреждения Authorities, State and municipal institutions	11,1
Разработчики ПО Software developers	Разработчики программного обеспечения для ТИМ BIM software developers	6,7
Вузы Universities	Образовательные учреждения Universities, other educational institutions	27,2
Прочие Others	Эксплуатирующие организации; организации, занимающиеся производством и поставкой строительной продукции и др. Operating organizations, organizations involved in the production and supply of construction products, etc.	7,3

составила 4,63 балла, т.е. можно сделать вывод, что эффективность мер государственного регулирования вопросов внедрения ТИМ оценивается как удовлетворительная, немного не дотягивает до полного соответствия ожиданиям, которые возлагались на них профессиональным сообществом. Распределение ответов респондентов представлено на рис. 1.

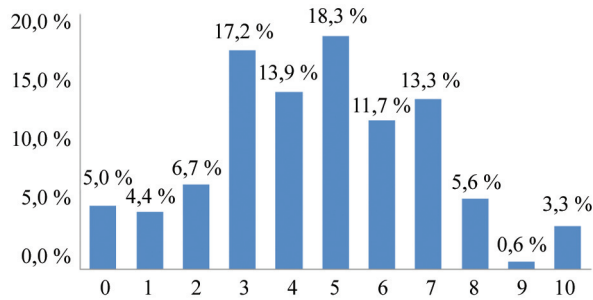


Рис. 1. Оценка респондентами результативности мер государственного регулирования внедрения ТИМ в баллах от 0 до 10²

Fig. 1. Respondents' assessment of the effectiveness of state regulation measures of BIM implementation in points from 0 to 10²

Большинство опрошенных оценивают результативность реализованных к настоящему времени мер поддержки ТИМ со стороны государства в диапазоне 3–7 баллов, т.е. близко к среднему значению. Имеются респонденты, которые оценивают эффективность данных мер высоко (8–10 баллов — 9,5 % в сумме), однако их значительно

меньше, чем дающих низкую оценку (0–2 балла — 16,1 % в сумме).

Применение метода факторного анализа по отношению к данному вопросу позволило увидеть, что в зависимости от вида деятельности предприятия респондента оценка результативности мер государственной политики различается (рис. 2).

Так, самую скромную оценку эффективности мер государственного регулирования поставили застройщики, технические заказчики и подрядчики (укрупненная группа «Исполнители») — 4,0 балла, наиболее высокую — разработчики ПО — 5,67 балла в среднем по группе. Вместе с разработчиками ПО позитивно оценивают эффективность государственного регулирования и респонденты из группы «Государство». Прочие группы дают близкие друг к другу оценки чуть ниже 5 баллов в диапазоне от 4,25 до 4,36.

Также респондентам было предложено выбрать из списка (с возможностью дать свой вариант ответа) меры государственной поддержки при внедрении ТИМ, которые, по их мнению, являются наиболее значимыми на современном этапе. Распределение ответов представлено на рис. 3.

На момент проведения опроса (ноябрь 2021 г.) лидерами среди таких мер стали:

- создание условий для подготовки кадров строительных организаций — 69,4 %;
- создание единых классификаторов и единой библиотеки компонентов информационных моделей — 63,9 %;
- ускорение процессов разработки нормативной базы, стандартов и т.д. — 62,2 %.

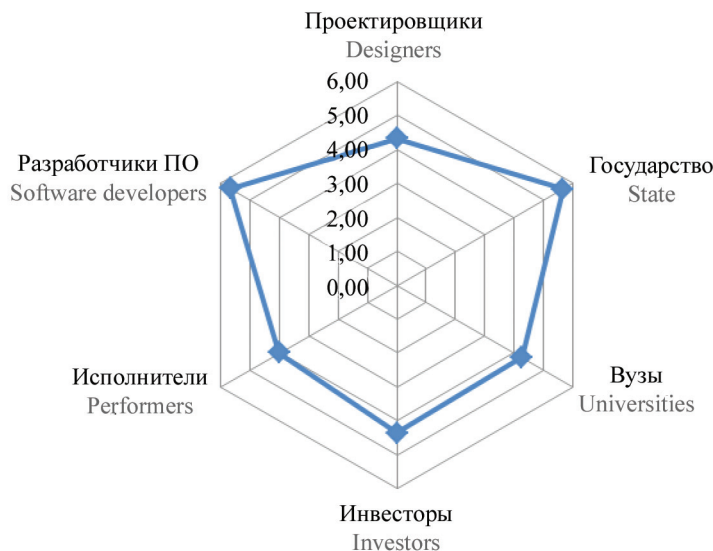


Рис. 2. Оценка респондентами результативности мер государственного регулирования внедрения ТИМ (в баллах от 0 до 10): средние значения по группам респондентов (составлено автором)

Fig. 2. Respondents' assessment of the effectiveness of state regulation measures of BIM implementation (in points from 0 to 10): average values for groups of respondents (compiled by the author)



Рис. 3. Наиболее значимые меры государственной поддержки при внедрении ТИМ на современном этапе: ответы респондентов в целом по выборке²

Fig. 3. The most significant measures of state support in the implementation of BIM at the present stage: responses of respondents in the whole sample²

Еще раз стоит подчеркнуть, что с момента ухода с российского рынка ряда производителей ПО для ТИМ поддержка разработчиков отечественного ПО приобрела большую значимость, что могло бы найти отражение в результатах опроса, проводимого в новых условиях.

Анализ ответов респондентов с учетом вида деятельности организаций показал, что данный фактор оказывал влияние на мнение участников опроса. Результаты анализа представлены в табл. 2.

Ускорение разработки нормативной базы, стандартов и т.д. признается значимой мерой всеми группами респондентов с незначительными колебаниями — от 57 % (такой показатель наблюдается у представителей «Вузов» и «Инвесторов») до 67 % (у группы «Исполнителей»). Нельзя не признать, что отсутствие четкой и непротиворечивой нормативной базы создает препятствия для деятельности всех участников ИСП. Однако вопросы отсутствия квалифицированных кадров, согласно данным опроса, стоят даже более серьезно, чем проблема недостатков нормативной базы. Так, необходимость создания условий для подготовки кадров строительных организаций отмечают от 50 до 80 % опрошенных в зависимости от группы респондентов.

Наибольшую значимость данная мера имеет для «Инвесторов» и представителей образовательных организаций (группа «Вузы» — 79 и 78 % соответственно, наименьшее (но в целом все равно очень высокое) значение эта мера имеет для «Разработчиков ПО», а также представителей группы «Государство» — по 50 %.

Формирование условий для подготовки/переподготовки кадров органов власти и государственных учреждений, по мнению респондентов, имеет меньшую значимость, чем подготовка кадров строительных организаций. Ее важность также ниже практически по всем группам респондентов. Тем не менее представители органов власти и государственных/муниципальных организаций (группа «Государство») придают ей большее значение (отметили 60 % представителей группы), чем подготовке кадров строительных организаций (отметили 50 %). Можно предположить, что нехватку компетенций в этой области они ощущают достаточно остро. В целом наблюдается существенный разрыв мнений относительно важности мероприятий, связанных с созданием мер для наращивания компетенций в области ТИМ представителями органов власти и государственных учреждений: только 33 %

Табл. 2. Наиболее значимые на современном этапе меры государственной поддержки ТИМ по группам респондентов (таблица составлена автором)**Table 2.** The most significant measures of state support for BIM at the present stage by groups of respondents (table compiled by the author)

Меры государственной поддержки ТИМ Measures of state support for BIM	Группа респондентов Groups of respondents					
	Вузы Universities	Государство State	Инвесторы Investors	Исполнители Performers	Проектировщики Designers	Разработчики ПО Software developers
Ускорение процессов разработки нормативной базы, стандартов и т.д., % Accelerating the development of the regulatory framework, standards, etc., %	57	65	57	67	63	58
Создание условий для подготовки кадров строительных организаций, % Creation of conditions for training personnel of construction organizations, %	78	50	79	67	69	50
Формирование условий для подготовки/переподготовки кадров органов власти и государственных учреждений, % Creation of conditions for training/retraining of personnel of authorities and state institutions, %	59	60	64	33	37	42
Создание ускоренных процедур экспертизы, взаимодействия с органами власти и т.д., % Creation of accelerated examination procedures, interaction with authorities, etc., %	35	45	57	33	49	50
Поддержка разработки отечественного ПО, % Support for the development of domestic software, %	51	60	36	42	39	83
Формирование единых классификаторов и единой библиотеки компонентов информационных моделей, % Creation of unified classifiers and a unified library of information model components, %	73	65	36	50	59	58
Доля в объеме выборки, % / Share in the sample size, %	27,22	11,11	7,78	6,67	28,33	6,67
Количество в выборке, чел. / Number in the sample, pers.	49	20	14	12	51	12

исполнителей оценили данную меру как необходимую, тогда как инвесторы посчитали ее необходимой в 64 % случаев.

В формировании ускоренных процедур экспертизы, взаимодействия с органами власти и т.д. оказались наиболее заинтересованы проектировщики (49 %), что вполне объяснимо, а также разработчики ПО (50 %) и инвесторы (57 %). Наименьшую заинтересованность к этой мере проявили респонденты из группы «Исполнители» (33 %).

Такая мера как поддержка со стороны государства разработки отечественного ПО, безусловно, оказалась крайне важной для разработчиков ПО, в качестве необходимой ее отметили 83 % опрошенных данной группы. Высокая значимость данной меры отмечается и представителями группы «Государство» (60 %). «Исполнители», «Проектировщики» и «Инвесторы» на момент проведения исследования считали данную меру значимой менее чем в 50 % случаев (42, 39 и 36 % соответственно), однако в настоящий момент следует предположить,

что эта мера была бы отмечена как необходимая большей долей респондентов всех групп.

Создание единых классификаторов и единой библиотеки компонентов информационных моделей большинством респондентов из всех групп отмечается как важная мера. Лишь представители группы «Инвесторы» оценили ее не очень высоко (ее отметили 36 % респондентов данной группы). Представители образовательных учреждений отмечали эту меру наиболее часто — в 73 % случаев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заявленной целью исследования стало выявление мнений представителей инвестиционно-строительной сферы об основных направлениях государственной поддержки внедрения ТИМ с определением взаимосвязи мнений респондентов и вида деятельности их организаций. В результате исследования установлено, что вид деятельности организации респондентов оказывает существенное

влияние на их мнение в отношении результативности мер государственной политики, реализованных к моменту проведения опроса, а также относительно наиболее своевременных и необходимых к реализации мер в настоящее время.

Так, например, различными группами респондентов, выделенными по видам деятельности, по-разному оценивается результативность мер государственного регулирования внедрения ТИМ. Ее было предложено оценить в баллах от 0 до 10. Разброс оценок не так велик, однако он имеет место. Застройщики, технические заказчики и подрядчики (укрупненная группа «Исполнители») определили ее на уровне 4,0 балла (в среднем по группе), т.е. ниже среднего уровня, а разработчики ПО — на уровне 5,67, что чуть выше среднего значения.

Также при выделении наиболее значимых на современном этапе мер государственной поддержки ТИМ по группам респондентов наблюдается дифференциация оценок.

1. Для групп респондентов, сформированных по видам деятельности, наиболее значимыми оказались разные меры государственной поддержки:

- «Вузы» отметили в качестве наиболее значимой меры создание условий для подготовки кадров строительных организаций в 78 % случаев;
- представители группы «Государство» делают упор на ускорении процессов разработки нормативной базы, стандартов и создании единых классификаторов и единой библиотеки компонентов информационных моделей — 65 % опрошенных;
- «Инвесторы» указывают на необходимость формирования условий для подготовки кадров строительных организаций — 79 % респондентов;
- для «Исполнителей» наиболее значимыми стали ускорение процессов разработки нормативной базы, стандартов и создание условий для подготовки кадров строительных организаций (по 67 %);
- создание условий для подготовки кадров строительных организаций также является наиболее значимой мерой для представителей группы «Проектировщики» (69 %);
- поддержка разработки отечественного программного обеспечения ожидаемо оценивается как наиболее важная разработчиками ПО для ТИМ (83 % ответов).

2. Уровень важности тех или иных мер, который можно определить по доле респондентов в группе, отмечающих ту или иную меру, также различается:

- ускорение процессов разработки нормативной базы, стандартов чаще всего интересует «Исполнителей» (67 %);

- создание условий для подготовки кадров строительных организаций — представителей «Вузов» (78 %) и «Инвесторов» (79 %);

- формирование условий для подготовки/переподготовки кадров органов власти и государственных учреждений — представителей «Государства» и «Инвесторов» (60 и 64 % соответственно);

- создание ускоренных процедур экспертизы, взаимодействия с органами власти — «Инвесторов» (57 %);

- поддержка разработки отечественного ПО — «Разработчиков ПО» (83 %);

- создание единых классификаторов и единой библиотеки компонентов информационных моделей — представителей образовательных учреждений (73 %).

3. По отношению к различным предложенным на выбор респондентов мер государственной поддержки внедрения ТИМ, актуальных на данный момент, наблюдается разброс оценок:

- разброс оценок относительно значимости ускорения процессов разработки нормативной базы, стандартов небольшой и составляет 10 %: наименьший показатель у «Вузов» — 57 %, наибольший показатель — у «Исполнителей» — 67 %;

- наиболее заметным является разброс оценок групп респондентов по поддержке разработки отечественного ПО: «Исполнители» отмечали необходимость данной меры в 42 % случаев, а «Разработчики ПО» — в 83 % (разброс в 41 %);

- также заметным стал разброс мнений по созданию условий для подготовки/переподготовки кадров органов власти и государственных учреждений и формированию единых классификаторов и единой библиотеки компонентов информационных моделей.

Таким образом, можно сделать вывод, что вид деятельности организаций инвестиционно-строительной сферы оказывает влияние на мнение их представителей относительно результативности мер государственной поддержки внедрения ТИМ и необходимых мер на современном этапе. Это влияние имеет место в силу особенностей их функций и интересов, а также специфики взаимодействия с прочими участниками инвестиционно-строительных проектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Козлов И.М. Оценка экономической эффективности внедрения информационного моделирования зданий // Архитектура и современные информационные технологии. 2010. № 1 (10). С. 6. EDN KZTKWX.

2. Абакумов Р.Г., Наумов А.Е., Зобова А.Г. Преимущества, инструменты и эффективность внедрения технологий информационного моделирования в строительстве // Вестник Белгородского государственного технологического универ-

ситета им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 171–181. DOI: 10.12737/article_590878fb8be5f0.72456616. EDN YNBNWB.

3. *Musonda I.* The strategic application of building information modelling (bim) to the role of construction project management // Proceedings of the Creative Construction Conference 2019. 2019. DOI: 10.3311/ccc2019-065

4. *Razali M.F., Haron N.A., Hassim S., Alias A.H., Harun A.N., Abubakar A.S.* A review: application of Building Information Modelling (BIM) over building life cycles // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 357. Issue 1. P. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012028

5. *Таланов В.* BIM: что под этим обычно понимают. Второе издание. 2014.

6. *Lu W., Fung A., Peng Yi., Liang C., Rowlinson S.* Cost-benefit analysis of Building Information Modeling implementation in building projects through demystification of time-effort distribution curves // Building and Environment. 2014. Vol. 82. Pp. 317–327. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.08.030

7. *Sholeh M., Fauziyah S., Khasani R.* Effect of Building Information Modeling (BIM) on reduced construction time-costs: a case study // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 202. P. 02012. DOI: 10.1051/e3s-conf/202020202012

8. *Shin M., Lee H., Kim H.* Benefit–cost analysis of Building Information Modeling (BIM) in a railway site // Sustainability. 2018. Vol. 10. Issue 11. P. 4303. DOI: 10.4303.10.3390/su10114303

9. *Kaneta T., Furusaka S., Tamura A., Deng N.* Overview of BIM implementation in Singapore and Japan // Journal of Civil Engineering and Architecture. 2016. Vol. 10. Issue 12. DOI: 10.17265/1934-7359/2016.12.001

10. *Liao L., Teo E., Chang R., Zhao X.* Diffusion of Building Information Modeling in building projects and firms in Singapore // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 18. P. 7762. DOI: 10.3390/su12187762

11. *Liao L., Teo E.* Critical success factors for enhancing the Building Information Modelling implementation in building projects in Singapore // Journal of Civil Engineering and Management. 2017. Vol. 23. Issue 8. Pp. 1029–1044. DOI: 10.3846/13923730.2017.1374300

12. *Nassereddine H., Hatoum M.B., Hanna A.S.* Overview of the state-of-practice of BIM in

the AEC industry in the United States // Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC). 2022. DOI: 10.22260/ISARC2022/0074

13. *Ojo A., Pye C.* BIM implementation practices of construction Organisations in the UK AEC Industry // Project Management Journal. 2020.

14. *Вольф И.* BIM в мире — обыденность, в России — пока эксклюзив. 2020.

15. *Федоров А.А.* Анализ стратегий внедрения информационного моделирования в лидирующих странах // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4 (55). С. 21. EDN UECARM.

16. *Shamreeva A., Doroschkin A.* Analysis of the influencing factors for the practical application of BIM in combination with AI in Germany // ECPPM 2021 — eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction. 2021. Pp. 536–543. DOI: 10.1201/9781003191476-72

17. *Borrmann A., Forster C., Liebich T., König M., Tulke J.* Germany's Governmental BIM Initiative — The BIM4INFRA2020 Project Implementing the BIM Roadmap // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Pp. 452–465. DOI: 10.1007/978-3-030-51295-8_31

18. *Sebastian R., Haak W., Vos E.* BIM application for integrated design and engineering in small-scale housing development: a pilot project in The Netherlands // Future Trends in Architectural Management. 2009.

19. *Sebastian R., van Berlo L.* Tool for benchmarking BIM Performance of design, engineering and construction firms in The Netherlands // Architectural Engineering and Design Management. 2010. Vol. 6. Issue 4. Pp. 254–263. DOI: 10.3763/aedm.2010.IDDS3

20. *Galić M., Venkrbec V., Weise F., Feine I., Pučko, Z., Klanšek U.* Review of BIM's Implementation in some EU AEC Industries // 13th International Conference Organization, Technology and Management in Construction. 2017.

21. *Король М.* Государственный заказчик переходит на BIM. В Европе. 2017.

22. *Скворцов А.В.* Обзор международной нормативной базы в сфере BIM // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2016. № 2 (7). С. 4–48. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.2.1. EDN XPPLKH.

Поступила в редакцию 20 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 7 июля 2023 г.

Одобрена для публикации 11 июля 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Татьяна Николаевна Кисель** — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655408, Scopus: 56184206400, ResearcherID: R-1538-201, ORCID: 0000-0002-6898-4822; doremi2@yandex.ru.

REFERENCES

1. Kozlov I. Estimation of economic efficiency of the building information modeling introduction. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2010; 1(10):6. EDN KZTKWX. (rus.).
2. Abakumov R.G., Naumov A.E., Zobova A.G. Benefits, tools and efficiency of information modeling technologies implementation in construction. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017; 5:171-181. DOI: 10.12737/article_590878fb8be5f0.72456616. EDN YNBNWB. (rus.).
3. Musonda I. The strategic application of Building Information Modelling (BIM) to the role of construction project management. *Proceedings of the Creative Construction Conference 2019*. 2019. DOI: 10.3311/cc2019-065
4. Razali M.F., Haron N.A., Hassim S., Alias A.H., Harun A.N., Abubakar A.S. A review: Application of Building Information Modelling (BIM) over building life cycles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 357(1):012028. DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012028
5. Talapov V. *BIM: what is usually understood by this. Second Edition*. 2014. (rus.).
6. Lu W., Fung A., Peng Yi., Liang C., Rowlinson S. Cost-benefit analysis of Building Information Modeling implementation in building projects through demystification of time-effort distribution curves. *Building and Environment*. 2014; 82:317-327. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.08.030
7. Sholeh M., Fauziyah S., Khasani R. Effect of Building Information Modeling (BIM) on reduced construction time-costs: a case study. *E3S Web of Conferences*. 2020; 202:02012. DOI: 10.1051/e3sconf/202020202012
8. Shin M., Lee H., Kim H. Benefit-cost analysis of Building Information Modeling (BIM) in a railway site. *Sustainability*. 2018; 10(11):4303. DOI: 10.4303.10.3390/su10114303
9. Kaneta T., Furusaka S., Tamura A., Deng N. Overview of BIM implementation in Singapore and Japan. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2016; 10(12). DOI: 10.17265/1934-7359/2016.12.001.
10. Liao L., Teo E., Chang R., Zhao X. Diffusion of Building Information Modeling in building projects and firms in Singapore. *Sustainability*. 2020; 12(18):7762. DOI: 10.3390/su12187762.
11. Liao L., Teo E. Critical success factors for enhancing the Building Information Modelling implementation in building projects in Singapore. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2017; 23(8):1029-1044. DOI: 10.3846/13923730.2017.1374300
12. Nassereddine H., Hatoum M.B., Hanna A.S. Overview of the state-of-practice of BIM in the AEC industry in the United States. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*. 2022. DOI: 10.22260/ISARC2022/0074
13. Ojo A., Pye C. BIM implementation practices of construction organisations in the UK AEC industry. *Project Management Journal*. 2020.
14. Vol'f I. *BIM in the world is commonplace, in Russia it is still exclusive*. 2020. (rus.).
15. Fedorov A.A. Analysis of strategies for implementing information modeling in leading countries. *Engineering journal of Don*. 2019; 4(55):21. EDN UECARM. (rus.).
16. Shamreeva A., Doroschkin A. Analysis of the influencing factors for the practical application of BIM in combination with AI in Germany. *ECPPM 2021 — eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*. 2021; 536-543. DOI: 10.1201/9781003191476-72
17. Borrmann A., Forster C., Liebich T., König M., Tulke J. Germany's governmental BIM initiative — The BIM4INFRA2020 project implementing the BIM Roadmap. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 452-465. DOI: 10.1007/978-3-030-51295-8_31
18. Sebastian R., Haak W., Vos E. BIM application for integrated design and engineering in small-scale housing development: a pilot project in The Netherlands. *Future Trends in Architectural Management*. 2009
19. Sebastian R., van Berlo L. Tool for benchmarking BIM performance of design, engineering and construction firms in The Netherlands. *Architectural Engineering and Design Management*. 2010; 6(4):254-263. DOI: 10.3763/aedm.2010.IDDS3.
20. Galić M., Venkrbec V., Weise F., Feine I., Pučko, Z., Klanšek U. Review of BIM's Implementation in some EU AEC Industries. *13th International Conference Organization, Technology and Management in Construction*. 2017.
21. Korol' M. *The state customer is moving to BIM. In Europe*. 2017. (rus.).
22. Skvortsov A.V. Review of the international regulatory framework in the field of BIM. *CAD and GIS of highways*. 2016; 2(7):4-48. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.2.1. EDN XPPLKH. (rus.).

Received June 20, 2023.

Adopted in revised form on July 7, 2023.

Approved for publication on July 11, 2023.

BIONOTES: **Tatiana N. Kisel** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Innovations; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 655408, Scopus: 56184206400, ResearcherID: R-1538-201, ORCID: 0000-0002-6898-4822; doremi2@yandex.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.984

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.2025-2036

Формирующиеся тенденции развития строительного рынка в условиях нарастающего санкционного давления

Наталья Юрьевна Яськова¹, Лариса Игоревна Зайцева^{1,2}

¹ Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте
Российской Федерации (РАНХиГС); г. Москва, Россия;

² Арбитражный суд Московского округа; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Геополитическая и хозяйственная повестка обеспечения хозяйственного суверенитета России потребовала существенных изменений способов производства и, соответственно, хозяйственной среды. Ее важной и неотъемлемой частью в условиях нарастающего санкционного давления является строительный рынок. Анализ периода проведения СВО убедительно доказал жизнеспособность рыночных правил делового оборота в инвестиционно-строительной сфере. Ни один из ее сегментов не оказался в кризисе и депрессии.

Материалы и методы. Наблюдаемое сжатие времени возникновения новых нарастающих внешних вызовов, вскрывших и позволивших выявить латентно протекающие процессы торможения модернизации строительной отрасли, побудили авторов изменить общепринятый ракурс изучения строительного рынка с использования метода декомпозиции его сегментов на реализацию методического подхода «управления временем в реструктурируемом пространстве» с целью дополнения мегаполисной концепции расселения стратегией ускоренного освоения территорий в точках и коридорах экономического роста.

Результаты. Синтезированные задачи тотального ускорения территориального, проектного, субъектного и ресурсного маневрирования позволили выявить цели и задачи трансформации товарно-денежных отношений, складывающихся в рамках строительного рынка в разрезе выделенных типов объектов капитального строительства (ОКС). В этом контексте авторами выявлено и раскрыто содержание следующих задач развития строительного рынка: обеспечение пространственно-временной маневренности производственных мощностей рыночных субъектов; синхронизация и масштабирование инвестиционно-строительных процессов; решоринг и технологическое замещение импорта; ликвидация незавершенного строительства; поддержка темпов развития социально ориентированного сегмента строительного рынка.

Выводы. Были учтены подходы к ускорению ввода различных типов ОКС, что позволило в результате исследования выявить направления совершенствования рыночных механизмов по различным ОКС. Единство различных направлений обеспечивается превентивными методами недопущения конфликта экономических интересов, а разрешение неизбежно возникающих противоречий развития предлагается с помощью методов внесудебного разрешения хозяйственных споров, в основе которых использование пространственно-территориальной, правовой, судебной, стоимостной, строительной-технической, экологической экспертизы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительный рынок, концепция расселения, формы территориального освоения, пространственно-территориальный девелопмент, точки роста, задачи ускорения, типы объектов капитального строительства, превентивные и внесудебные методы разрешения хозяйственных споров

Благодарности. Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Механизмы трансформации инвестиционно-строительных процессов как фактор преодоления санкционного давления на строительный рынок» государственного задания РАНХиГС.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Яськова Н.Ю., Зайцева Л.И. Формирующиеся тенденции развития строительного рынка в условиях нарастающего санкционного давления // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 2025–2036. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.2025-2036

Автор ответственный за переписку: Наталья Юрьевна Яськова, yaskova-ny@ranepa.ru.

Emerging trends in the construction market under increasing sanctions pressure

Natalia Yu. Yaskova¹, Larisa I. Zaitseva^{1,2}

¹ Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA);
Moscow, Russian Federation;

² Arbitration Court of the Moscow District; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The geopolitical and economic agenda for Russia's economic sovereignty has required significant changes in the modes of production and, consequently, in the economic environment. The construction market is an extremely important and integral part of it in the conditions of increasing sanctions pressure. The analysis of the SMO period has convincingly proved the viability of market rules of business turnover in the investment and construction sector. None of its segments turned out to be in crisis and depression.

Materials and methods. Business activity grew frontally. Meanwhile, the observed time compression of the emergence of new growing external challenges, which revealed and made it possible to identify latent processes slowing down the modernization of the construction industry, prompted the authors to change the generally accepted perspective of studying the construction market from the use of the method of decomposition of its segments to the implementation of the methodological approach of "time management in restructured space" in order to complement the megapolis concept of settlement with the strategy of accelerated development of territories in the points and corridors of economic.

Results. The synthesized objectives of total acceleration of territorial, project, subject and resource maneuvering allowed to identify goals and objectives of transformation of commodity-money relations emerging within the construction market in the context of the selected types of capital construction. In this context, the authors have identified and disclosed the content of the following tasks of construction market development: providing spatial and temporal maneuverability of production capacities of market entities; synchronization and scaling of investment and construction processes; reshoring and technological import substitution; unfinished construction liquidation; supporting development rates of socially-oriented segment of construction market. Solving these tasks will require territorial, project, subject and resource front-end maneuvering. As practice has shown, this is impossible without institutionalization of a new toolkit of spatial-territorial development. Its goal is to fully realize the country's geospatial advantage by mitigating the risks of the megacity concept of settlement, while simultaneously developing territories not only at points, but also along major spatial corridors of economic growth.

Conclusions. The article took into account approaches to accelerate the commissioning of various types of capital construction projects, which allowed the study to identify the directions of improving market mechanisms across different CCP. The unity of different directions is ensured by preventive methods of avoiding the conflict of economic interests, and the resolution of inevitably arising contradictions of development is proposed using methods of extrajudicial resolution of economic disputes, based on the use of spatial-territorial, legal, judicial, cost, construction and technical, environmental expertise.

KEYWORDS: construction market, settlement concept, forms of spatial development, spatial-territorial development, growth points, acceleration tasks, types of capital construction projects, preventive and extrajudicial methods of resolving economic disputes

Acknowledgements. The article was prepared within the framework of the research work "Mechanisms of transformation of investment and construction processes as a factor of overcoming the sanctions pressure on the construction market" of the state assignment of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration.

FOR CITATION: Yaskova N.Yu., Zaitseva L.I. Emerging trends in the construction market under increasing sanctions pressure. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12): 2025-2036. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.2025-2036 (rus.).

Corresponding author: Natalia Yu. Yaskova, yaskova-ny@ranepa.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых неопределенных прогнозов в складывающихся условиях стала оценка жизнеспособности российского рынка. Смогут ли рыночные устои выдержать разрушительное воздействие санкций и военного противостояния? Насколько мощным будет скатывание к мобилизационной экономике? Что противопоставит российская экономика глобальной повестке выдавливания страны не только из торговых потоков, но и из технологических трендов? Как быстро социально ориентированные цели будут отложены до лучших времен? По прошествии 15 месяцев с начала СВО очевидно, что рыночные конструкции устояли, обеспечивая не только кратный рост продукции оборонной промышленности, ускорение инфраструктурного строительства, но и взятые обязательства социальной направленности: от решения жилищной проблемы, приумноженной послевоенной разрухой новых российских территорий, до расширяющейся адресной поддержки населения.

Важнейшим фактором быстрого реагирования и успешного противостояния санкционному да-

влению оказалась готовность строительного рынка парировать вызовы бюджетного сжатия, ухода ключевых поставщиков строительных материалов и оборудования, частичной готовности предприятий стройиндустрии к импортозамещению, усиленные тектоническими изменениями геополитического ландшафта [1–4]. Стратегический разворот страны с Запада на Восток потребовал переориентации экономики на новые транспортно-логистические коридоры. Следовательно, в кратчайшие сроки требовалоськратно нарастить объемы дорожного строительства. На это наложилась необходимость реализации программы импортозамещения, что потребовало активизации сегмента промышленного строительства [5, 6]. Не снятые с повестки цели создания комфортной среды вынудили ускоренно модернизировать изношенную к настоящему времени жилищно-коммунальную инфраструктуру. А новые горизонты развития сельского хозяйства потребовали создания локальных перерабатывающих производств и др.

В области жилищного строительства, несмотря на наметившийся структурный сдвиг в сторону сегмента индивидуального жилищного строитель-

ства, темпы решения жилищной проблемы были поддержаны проектами комплексной застройки [7]. Все это свидетельствует о жизнеспособности механизмов строительного рынка и выстроенных товарно-денежных отношений между его субъектами: застройщиками, инвесторами, банками, заказчиками, подрядчиками, проектировщиками, предприятиями стройиндустрии и др. В то же время фронтальный характер внешних угроз, внутренние, зачастую носящие хронический характер, проблемы, часть из которых до сих пор носит латентный характер, ставят перед строительным рынком новые по существу задачи¹. При этом речь идет не только о поддержке, но и о развитии фактически всех его сегментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для структуризации задач развития строительного рынка предлагается в первую очередь учесть требования обеспечения национальной безопасности, включающей военно-техническую, экологическую, технологическую, экономическую, продовольственную, энергетическую, транспортную и др. безопасность, а также цели нового освоения и устойчивого развития территорий РФ, распространенные не только на сельское хозяйство, промышленность, энергетику, лесное хозяйство, дорожно-транспортную инфраструктуру, научно-технологический и образовательный сегменты, обработку, утилизацию и обезвреживание отходов, рекультивацию и мелиорацию земель и др., но и на формы расселения в диапазоне от мегаполисов до поселений [8]. То есть цели развития строительного рынка определяются направленностью фактически всех сегментов национальной экономики, формами расселения, уровнем освоения территорий и базируются на документах стратегического планирования^{2, 3, 4, 5}. Именно поэтому выделение задач развития какого-либо сегмента или региона не-

целесообразно. Фронтальный и высокодинамичный характер инвестиционно-строительных процессов требует от строительного рынка создания условий парирования вызовов как в отраслевом/межотраслевом, так и в территориальном разрезах, отвечая в целом за качество пространственного развития. Например, в формате замкнутого жизненного цикла (ЖЦ) городской недвижимости речь идет о пространственно-территориальном девелопменте [9], требующем новой градостроительной политики, реконструкции жилищно-коммунального хозяйства, модернизации гражданского, промышленного, дорожного и трубопроводного строительства, цифровой трансформации, учета климатической повестки, новых механизмов ресурсного обеспечения и партнерского взаимодействия. Очевидно, такого рода стратегический маневр, с одной стороны, базируется на потенциале и имеющихся возможностях, с другой — выдвигает новые требования к объемам, структуре и скорости реализации инвестиционно-строительных процессов. Проведенный авторами в рамках НИР «Механизмы трансформации инвестиционно-строительных процессов как фактор преодоления санкционного давления на строительный рынок» государственного задания РАНХиГС анализ традиционных методов декомпозиции сегментов строительного рынка показал, что на фоне фронтального характера их развития стратегический фокус смещается на использование методов управления временем в условиях реструктурируемого пространства, что позволяет выделить следующие задачи, имеющие принципиальное значение для выявления тенденций развития строительного рынка в современных условиях.

1. Обеспечение *пространственно-временной маневренности* производственных мощностей проектных и строительных организаций, а также предприятий стройиндустрии; ресурсного обеспечения, включая квалифицированные кадры и потоки трудовой миграции; капитальных вложений и частных инвестиций в целях решения динамических задач глобальной реструктуризации внешнеэкономических связей и изменения торгово-партнерского ландшафта. Скорость переброски и оперативной аккумуляции ресурсов в приоритетных проектах различной территориальной локализации в условиях угрозы безопасности страны становится едва ли не важнейшим фактором поддержки жизнеспособности и условием отраслевого и территориального развития страны.

2. *Синхронизация и масштабирование инвестиционно-строительных процессов*, сфокусированных в первую очередь в производственных и транспортно-логистических сегментах. Необходимое обновление, а в ряде сегментов создание новых производств связано с обострением противостояния коллективному Западу и усилением санкционного режима. Неслучайно в Стратегии развития строи-

¹ Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г. : Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2022 № 3268-р.

² Об утверждении Программы фундаментальных научных исследований в РФ на долгосрочный период (2021–2030 гг.) : Распоряжение Правительства РФ от 31.12.2020 № 3684-р. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400070256/>

³ Об утверждении Бюджетного прогноза Российской Федерации на период до 2036 г. : Распоряжение Правительства РФ от 29.03.2019 № 558-р.

⁴ Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года : утв. Правительством РФ 03.01.2014 № ДМ-П8-5. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70484380/>

⁵ Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года.

тельной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года заявлен новый ритм строительства. Административная трансформация, совершенствование системы технического регулирования, государственного кадастра и регистрации прав призваны ускорить инвестиционно-строительные процессы. Новый формат государственных комплексных программ с использованием штабного принципа управления направлен на синхронизацию адресных программ и проектов⁶. Масштабирование, предполагающее сингулярное наращивание объемов работ и ввод в действие объектов капитального строительства (ОКС), требует создания адекватных механизмов организационного и ресурсного обеспечения, включая использование типовых проектов, организационных механизмов и др.

3. *Решоринг и технологическое замещение* импортных ресурсных потоков, локализация производства строительной техники, материалов, деталей, конструкций, программного и организационно-технологического обеспечения, проектных и строительных мощностей на российской территории, включая новые территории Донецкой Народной Республики, Луганской Народной Республики, Запорожской и Херсонской областей. Отметим, что возврат производств, размещенных на территориях других стран, так же как создание замещающих производств, должен учесть все современные инновации и возможности экономии потребляемых ресурсов.

4. *Экономически целесообразное снижение с последующей ликвидацией объемов незавершенного строительства*, опережающее перепрофилирование производственных мощностей, в том числе на нужды специальной военной операции. Недопустимое «омертвление капитала» в форме незавершенного строительства не может быть использовано в формате устаревших подходов.

5. *Поддержка темпов решения жилищной проблемы и социально ориентированного сегмента* пространства жизнедеятельности с использованием различных моделей инвестиционно-строительной деятельности (ИСД), контрактных конструкций, методов разрешения споров и др. Многообразие разлоков потребительского спроса активизирует не только различные методы решения жилищной проблемы, но и альтернативные формы недвижимости: антикафе, коливинги, апарт-отели, кондо-формат совместной деятельности и др. [10–13].

По существу, как показал проведенный анализ [14–17], необходим внятный, структурированный и разделяемый субъектами ИСД ответ на вы-

зовы развития в форме изменения правил и норм функционирования строительного рынка. В современных условиях изменение характера рыночных отношений — это не просто дань сложившейся политической или научно-технической повестки, а важнейшее условие стабильности строительного рынка, а следовательно, выживания и устойчивого развития России, как суверенной страны.

Объединяя выявленные выше задачи, создающие объективные условия купирования вызовов нарастающего санкционного давления, заметим, что практически все они могут быть сведены к скоростным характеристикам осуществления совокупности маневров:

- 1) территориального, сфокусированного на создании новых транспортно-логистических коридоров;
- 2) проектного, обеспечивающего решение задач импортоопережения;
- 3) субъектного, направленного на замещение ушедших западных компаний;
- 4) ресурсного, раскрывающего возможности использования альтернативных источников финансирования и поставок.

В то же время, к примеру, скорость территориального маневра, определяемая временем развертывания производственных мощностей и сопровождающей его социальной инфраструктуры, не может достигаться в ущерб экологическим требованиям и региональным интересам. Они являются объективным фильтром выбора места и масштаба передислокации. Таким образом, целевая функция минимизации времени реализации этапов пространственно-территориального дивелопмента ($T_i \rightarrow \min$) обеспечивается оптимизацией ресурсного наполнения ΣZ_i^j решения тех или иных производственно-хозяйственных задач $\Sigma Z_i^j \rightarrow \text{опт}$ в заданных экологических и социальных ограничениях. Говоря об ИСД, финальные цели в диапазоне ускорения ввода в действие до вывода из хозяйственного оборота ОКС достигаются в следующих формах.

1. *Вновь строящиеся ОКС*, что предполагает запуск ЖЦ недвижимости с момента идеи и ее инициации до создания проекта, контрактинга, строительства, последующей эксплуатации (с проведением текущих и капитальных ремонтов, реконструкции и реновации), ликвидации и рекультивации земельного участка. При этом, как показал анализ [18, 19], целевая функция времени на различных этапах ЖЦ неоднородна. На этапах инициации $T_{\text{и}}$, контрактинга $T_{\text{к}}$, строительства $T_{\text{с}}$ и ввода в эксплуатацию $T_{\text{вв}}$ управляющее воздействие направлено на минимизацию затрат времени, т.е.:

$$\{T_{\text{и}}, T_{\text{к}}, T_{\text{с}}, T_{\text{вв}}\} \rightarrow \min.$$

Период эксплуатации в условиях морального и физического старения недвижимости по факту в современных условиях характеризуется двумя

прямо противоположными тенденциями [20–22]. Сроки службы стандартной/типовой недвижимости сокращаются. А вот для объектов исторического наследия (ОИН) или приравненной к ним недвижимости (к примеру, по объектам, выявленным на основе общественного мнения населения) он максимизируется. Зданиям и сооружениям придается новое функциональное назначение, обновляется оборудование и в целом недвижимость доводится до состояния, соответствующего современным стандартам. Необходимо понимать, что зачастую это требует новых проектных решений и немалых затрат [9, 22]. При этом чем дольше эксплуатируется недвижимость $T_{\text{оин}}^3$, тем выше обновляющие затраты Z_o^i , осуществляемые для минимизации поддерживающих/эксплуатационных затрат Z_n^i . При этом Z_o^i , следуя логике рыночного оборота, должны оптимизироваться. Таким образом:

$T_{\text{оин}}^3 \rightarrow \max$ при условии $Z_o^i \rightarrow Z_o^{\text{опт}}$ с целью $Z_n^i \rightarrow \min$.

2. *Воспроизводимые ОКС.* К их виду отнесем объекты, находящиеся на капитальном ремонте и подлежащие модернизации, а также объекты незавершенного строительства (ОНС). Целевой фокус работы с этим типом недвижимости заключается в ускорении ввода в действие и включения их в хозяйственный оборот. Очевидно, что интенсивность ресурсного обеспечения инвестиционно-строительных процессов при прочих равных условиях напрямую влияет на сокращение времени ввода в эксплуатацию. Качество вложений, их инновационная направленность (обеспечение энергоэффективности, долговечности, износоустойчивости, ремонтпригодности и др.) лежат в основе стремящихся к минимуму эксплуатационных затрат. Касательно ОКС Правительством РФ поставлена задача ликвидации к 2030 г. незавершенного строительства в сегменте государственного строительного заказа [22]. При этом возможны варианты ускорения как за счет опережающего финансирования или пообъектной корректировки затрат, либо за счет привлечения частных хозяйствующих субъектов коммерческого сегмента к инвестированию процессов вовлечения в хозяйственный оборот ОНС вплоть до прямой передачи объектов с баланса на баланс. Таким образом:

$T_{\text{онс}} \rightarrow \min$ за счет $Z_o^z = Z_o^{\Phi} + \Delta Z_o$ или $Z_o^z = Z_o^{\Phi} + \Delta Z_k$, где Z_o^z — ожидаемые вложения в ОНС; Z_o^{Φ} — фактические вложения в ОНС; ΔZ_o — дополнительные вложения госбюджета, необходимые для ввода ОНС в действие; ΔZ_k — дополнительные вложения коммерческого сегмента, необходимые для ввода ОНС в действие.

Второй вариант предпочтительнее и может иметь различные формы, в том числе комбинированного инвестирования.

3. *Ликвидируемые объекты капитального строительства.* Период времени для сноса, вывоза

мусора и последующего обустройства земельного участка для повторного использования также чрезвычайно важен. Завершая ЖЦ недвижимости, этот период может быть растянут, небезопасен и экономически неэффективен. Лучшие практики свидетельствуют не только о возможностях современных технологий без ущерба для окружающей среды сносить здания и сооружения, но и о целесообразности вторичного оборота и утилизации материалов.

Структурирование ОКС и подразделение их на три типа: вновь строящиеся, воспроизводимые и ликвидируемые объекты позволяет корректно поставить задачу взаимосогласованного управления временными параметрами инвестиционно-строительных процессов. Их новые ритмы по видам объектов недвижимости должны быть синхронизированы. Важно понимать, что процессы ускорения и синхронизации сопровождаются не только с помощью дополнительного ресурсного обеспечения во всем его многообразии, но и за счет замещающих ресурсов улучшенного качества. В условиях быстрой сменяемости ценностей и, соответственно, приоритетов развития, задающих стратегический фокус объектной реструктуризации строительного рынка, объемы ликвидируемой недвижимости могут пополняться как за счет приостановленных/замороженных ОКС воспроизводимого типа, так и за счет признанных аварийными (в том числе в зоне проведения СВО) объектов.

Во всех случаях своего рода безусловным приоритетом программ и проектов развития территорий становятся меры обеспечения безопасности и социального равновесия, а также прозрачные и инклюзивные правила хозяйствования, установленные в диалоговом режиме всеми участниками развития с учетом национальных ценностей и традиций делового оборота. Такой методический подход призван сформировать условия для достижения консенсуса экономических интересов и бесконфликтного функционирования строительного рынка. Указанные методы безупречно сработали в условиях освоения новых присоединяемых или высвобождаемых территорий городской застройки. Использовать указанные методы в условиях исторической застройки также необходимо, но, как показывает практика, недостаточно. Требования создания комфортной, экологически устойчивой среды жизнедеятельности дополняются необходимостью:

- 1) сохранения исторического наследия;
- 2) функциональной реструктуризацией капитальных фондов;
- 3) сноса и вывода экологически токсичных фондов производственного назначения за границы проживания населения.

Заметим, что задача обеспечения производственной и непроизводственной деятельности, осуществляемой в городских условиях, транспортная и социальная инфраструктура должны отвечать не только

постоянно обновляющимся требованиям и запросам по форматам проживания, моделям отдыха и питания, методам поддержки здоровья и лечения, видам образования и трендам личностного развития, формам проведения досуга, типам развлечений и туризма, но и нарастающим рискам национальной безопасности России, связанным с угрозами мегаполисной концепции пространственного развития.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Понимая, что необходимость ускорения территориального, проектного, субъектного и ресурсного маневра должна отвечать стратегической цели обеспечения территориальной связанности, невозможной без сбалансированного и относительно равномерного расселения и концентрации трудовых ресурсов в точках и коридорах роста экономики, расширенное воспроизводство недвижимости модифицируется в плоскость ускоренного *пространственного переосвоения* страны. Именно оно становится целевым фокусом институциональной перестройки строительного рынка. Востребованными становятся, с одной стороны, институты, противостоящие угрозам мегаполисного расселения, с другой — институты развития территорий, снимающие барьеры интенсивного переселения в точки и коридоры экономического развития.

Первая группа институтов касается превентивного характера купирования базовых противоречий функционирования мегаполисов. Это:

- 1) техногенные угрозы, как отражение масштаба жилищно-коммунальной, технологической, дорожно-транспортной инфраструктуры;
- 2) эпидемиологические, связанные с кучностью проживания (в РФ население проживает в 7–10 раз плотнее, чем в Великобритании и Германии);
- 3) социальные, определяемые как нарастание конфликтности различных групп горожан (по критериям дохода, образования, возраста и др.), что провоцирует социальные взрывы, массовые протесты на фоне углубляющегося отчуждения, потери доверия и солидарности;
- 4) демографические, являющиеся следствием малогабаритных личных пространств, расфокусированности предпочтений, роста непроизводительных затрат времени (в общественном или личном транспорте, очередях и ожиданиях в сфере услуг, образования, медицинского обслуживания и т.п.);
- 5) экономические, связанные с внутригородским расселением и углубляющимся неравенством городского центра или элитного пригорода и городских окраин. Билет в театр может стоить средней месячной зарплаты, а чек в ресторане среднемесячной стоимости жилищно-коммунальных услуг молодой семьи, что, несомненно, актуализирует вопрос формирования единого стандарта качества жизни не только во всех районах города, но и по всей территории России.

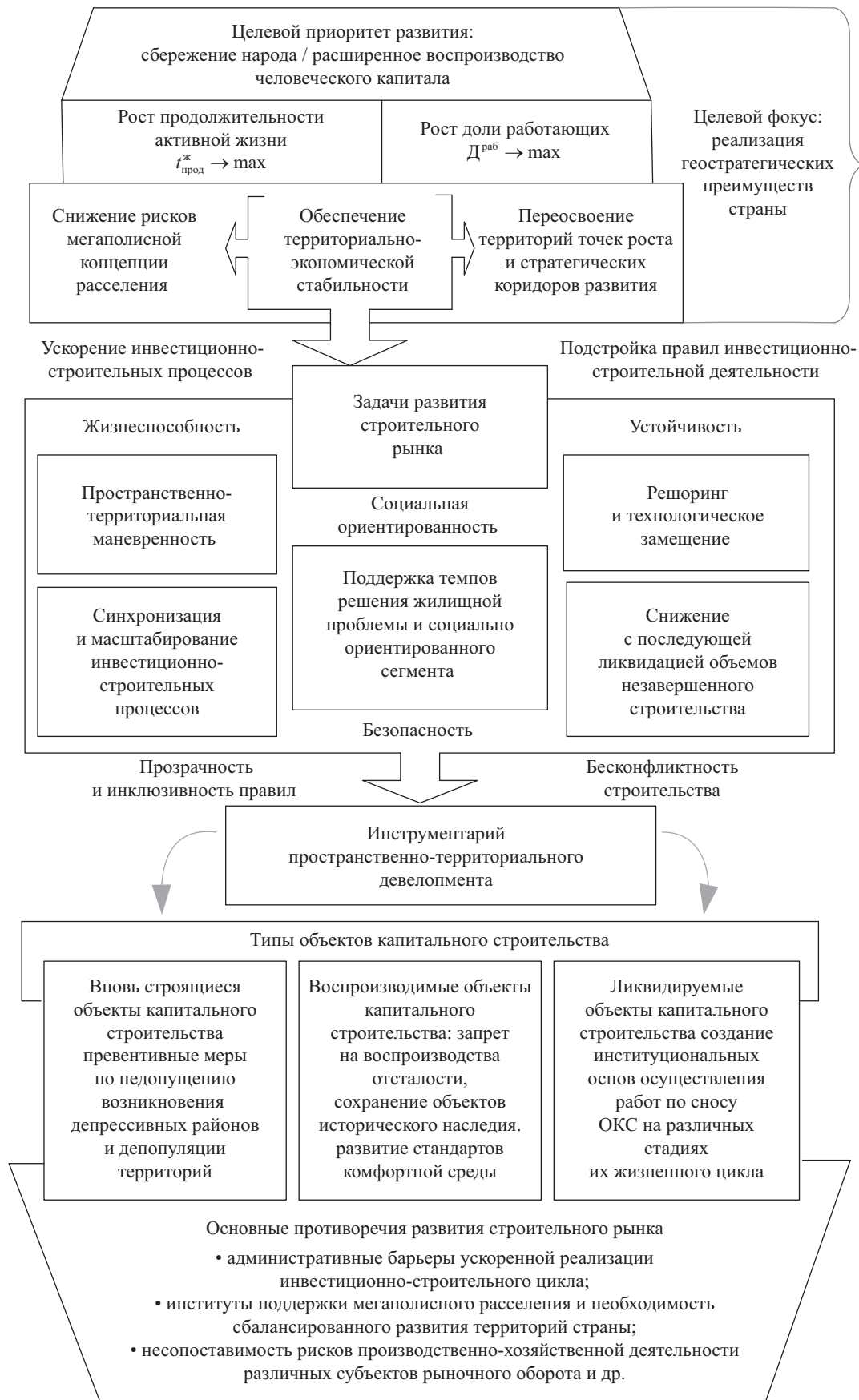
Как показывает практика, строительный рынок мегаполисов в рамках трех выделенных типов ОКС, с одной стороны, позволит поддерживать безопасный режим функционирования жилищно-коммунальной, дорожно-транспортной и социальной инфраструктуры города, с другой — по вновь строящимся объектам предусматривать их функциональную мобильность, ремонтпригодность, экологичность и экономичность эксплуатационных режимов. Таким образом, проектный маневр предусматривает необходимость новых конструктивных идей обеспечения функциональной мобильности, оптимизации капитальных и эксплуатационных затрат, технологичности сноса объекта, утилизации отходов и рекультивации земельного участка. Кроме того, рыночные инструменты должны позволять обновлять город, не допуская возникновения депрессивных районов городских окраин. Сверхконцентрация горожан в центрах должна уступать место обоснованному рассредоточению, в том числе в пригородах и городах-спутниках. Что касается воспроизводимой недвижимости, главным вызовом, с которым должны справиться рыночные институты, становится «запрет на воспроизводство отсталости». Институт строительно-технической экспертизы, становящийся все в большей мере консультативным органом, должен осваивать функционал инфорсменты (принуждения) к импортозамещению строительных материалов, деталей, конструкций, техники на новой отечественной инновационной основе.

Применительно к ОНС отметим, что порядок их вовлечения в хозяйственный оборот только формируется⁷. Действующие институты развития пока не восприимчивы к этому типу объектов. Создание механизмов борьбы с «омертвленным капиталом» в форме ОНС становится обостряющейся проблемой, а следовательно, первоочередной задачей развития строительного рынка. Товарно-денежные отношения его субъектов в этой связи следует нацелить на безбарьерное обеспечение перехода прав собственности, стимулирование ввода в действие ОНС, консервацию или модернизацию указанных объектов. При этом сохранение ОИС потребует пересмотра ряда строительных норм и правил^{8, 9}.

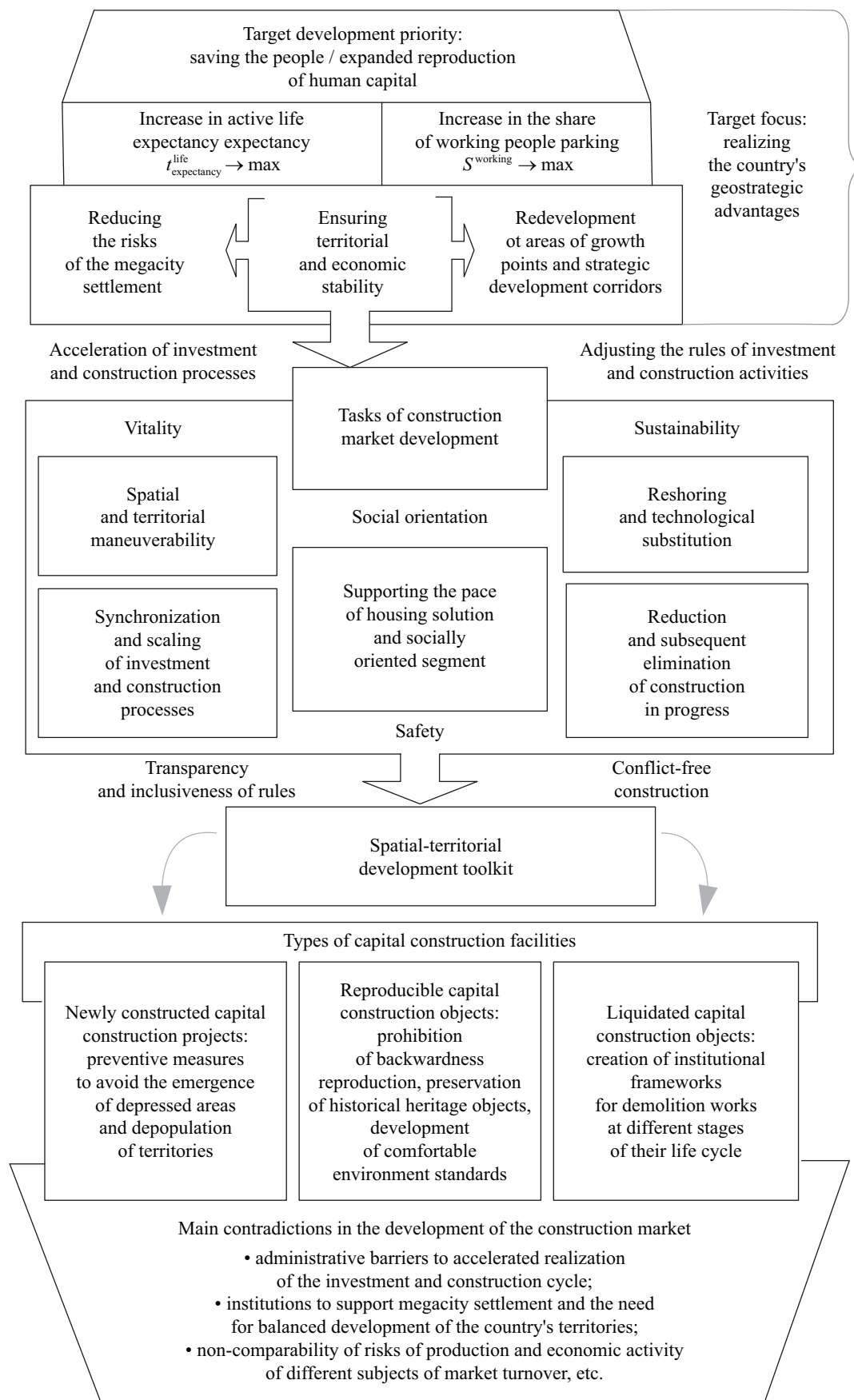
⁷ Юрий Гордеев принял участие в заседании Экспертного совета при Комитете Госдумы по вопросу незавершенных объектов. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/yuriy-gordeev-prinyal-uchastie-v-zasedanii-ekspertnogo-soveta-pri-komitete-gosdumy-po-voprosu-nezave/>

⁸ О работах по сохранению объектов культурного наследия : Письмо Министерства культуры РФ от 02.12.2019 № 18930-12-02. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_377618/

⁹ Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации : Федеральный закон от 25.06.2002 № 73-ФЗ (последняя редакция). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_37318/



Развертка задач развития строительного рынка



Development tasks of the construction market

Проблема сноса ОКС и высвобождения пространства от устаревших объектов в современных рамках также должна решаться с учетом новых экологических критериев и технологических возможностей. Пока рыночный специализированный сегмент строительных работ по сносу не сформировался, в то время как спрос, особенно с учетом присоединенных территорий, существенно возрос.

Проведенное исследование свидетельствует также о необходимости дополнения рыночных механизмов, сегментированных по типам ОКС, механизмами согласования экономических интересов и урегулирования, возникающих в процессе ИСД противоречий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Восстановление основного геостратегического преимущества России, связанного с огромным пространством, высоким ресурсным потенциалом, мультикультурными и многоконфессиональными особенностями, имеющимся человеческим капиталом, требует пересборки процессов расширенного производства всех источников и компонентов развития страны. Очевидно, фондовый каркас и пространственная структура ОКС должны отвечать требованиям ускоренного экономического развития, а значит, изменяться как в части местоположения, функциональных, технико-технологических и эксплуатационных характеристик, так и в условиях бесконфликтной среды реализации целевых приоритетов. Рыночный формат развития сформировал современную структуру субъектов рыночного оборота. Их функционирование сопряжено с необходимостью реализации экономических интересов, зачастую противоречащих друг другу. В целях устранения противоречий участников ИСД

востребованы технологии бесконфликтного строительства, пронизывающие не только все типы ОКС, но и все этапы пространственно-территориального девелопмента. Причем, бесконфликтность в данном контексте не означает фокусировку на устранение конфликтов в процессе ИСД, особенно в фазе обострения в связи с длительным уклонением от урегулирования. Основной акцент должен быть сделан на превентивную составляющую, предполагая, что эффективное разрешение споров будет осуществляться при помощи широкого спектра внесудебных способов и развития особых «сотруднических» подходов к формированию моделей реализации проектов. На практике их применение способно парировать фактически все непроизводственные потери времени. Более того, указанный методический подход к созданию бесконфликтного строительства предлагается использовать в практической реализации всех задач развития строительного рынка (рис.).

Таким образом, в современных условиях особенно востребован новый тип медиативного консалтинга, объединяющего пространственно-территориальную, правовую, судебную, стоимостную, строительно-техническую и экологическую экспертизу в рамках процедуры медиации. Это позволит регулировать хозяйственные споры в оперативном режиме времени. Достижение стабильности и взаимосогласованности деятельности субъектов, создающих, эксплуатирующих и ликвидирующих ОКС, должно стать залогом устойчивости и жизнеспособности строительного рынка, как одного из решающих условий не только решения оперативно-тактических задач СВО, но и достижения стратегических социально ориентированных приоритетов трансформации современного хозяйственного уклада России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яськова Н.Ю., Зайцева Л.И., Викторов М.Ю. Проблемы реализации стратегии импортозамещения в строительстве // Вестник Евразийской науки. 2022. Т. 14. № 4. С. 29. EDN HHCHOO.
2. Шмырев А.В., Яушев А.А. Импортозамещение в российской строительной отрасли в условиях западных санкций: проблемы и пути решения // Инновационная экономика. 2023. № 1 (34). С. 82–99. EDN QLFCFU.
3. Yaskova N.Yu., Zaitseva L.I. Construction: overcoming growth limits // Real Estate: Economics, Management. 2022. No. 4. Pp. 12–17. EDN SVMDQW.
4. Яськова Н.Ю., Лукманова И.Г., Зайцева Л.И. Организационно-экономические подходы и методы развития строительной отрасли в условиях санкционного давления // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 12. С. 1707–1715. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1707-1715. EDN CAXKQI.
5. Лемешко М.В. Тенденции развития промышленного строительства в России на современном этапе // Экономика строительства. 2023. № 3. С. 21–27. EDN EYIPPP.
6. Комарова А.В. Развитие строительной отрасли на современном этапе // Экономика нового мира. 2020. Т. 5. № 3 (18). С. 28–38. EDN OUDAZP.
7. Sarchenko V.I., Khirevich S.A., Sarchenko M.V. Problems of ensuring the competitiveness of investment and construction activities under new macroeconomic conditions and approaches to their resolution // Real Estate: Economics, Management. 2022. No. 1. Pp. 82–87. EDN YUNGEL.
8. Яськова Н.Ю., Сарченко В.И., Хиревич С.А. Комплексный подход к формированию качествен-

ной городской среды // Недвижимость: экономика, управление. 2020. № 2. С. 12–21. DOI: 10.22227/2073-8412.2020.2.12-21. EDN HDYWVW.

9. Алексеев С.А., Виктор М.Ю., Грабовый П.Г., Зайцева Л.И., Казанский Н.В., Каминский М.А. и др. Пространственная реструктуризация. Новые смыслы и правила инвестиционно-строительной деятельности. М.: Дело, 2019. 454 с. EDN KGWAKW.

10. Азизова-Полуэктова А.Н., Дьяков И.А., Иванова У.В. Коливинг — новый формат жилья // Архитектурные исследования. 2021. № 1 (25). С. 45–51. EDN KNEYXQ.

11. Шумакова Е.В. Апартамент-отель как инновационная форма организации гостиничного бизнеса // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2019. Т. 8. № 3 (28). С. 400–402. DOI: 10.26140/anie-2019-0803-0093. EDN EWPKOM.

12. Musavengane R. Small hotels and responsible tourism practice: Hoteliers' perspectives // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 220. Pp. 786–799. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.143

13. Weber K. Service failure and recovery in an all-suite hotel/serviced apartment context: A case study // Journal of Travel & Tourism Marketing. 2009. Vol. 26. Issue 2. Pp. 195–199. DOI: 10.1080/10548400902864834

14. Dossche C., Boel V., De Corte W. Use of life cycle assessments in the construction sector: critical review // Procedia Engineering. 2017. Vol. 171. Pp. 302–311. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.338

15. Akinradewo O., Aigbavboa C., Aghimien D., Oke A., Ogunbayo B. Modular method of construction in developing countries: the underlying challenges // International Journal of Construction Man-

agement. 2021. Vol. 23. Issue 8. Pp. 1344–1354. DOI: 10.1080/15623599.2021.1970300

16. Shoar S., Yiu T.W., Payan S., Parchami-jalal M. Modeling cost overrun in building construction projects using the interpretive structural modeling approach: a developing country perspective // Engineering, Construction and Architectural Management. 2021. Vol. 30. Issue 2. Pp. 365–392. DOI: 10.1108/ECAM-08-2021-0732

17. Россохин В.В., Рябова Е.В. Выявление характеризующих стадий жизненного цикла факторов // Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика. 2019. № 3. С. 92–109. EDN XCEZLX.

18. Shtefan M.A., Elizarova J.M. Investment project efficiency and risk evaluation: an integrated approach // Business Informatics. 2018. Vol. 2018. Issue 4. Pp. 54–65. DOI: 10.17323/1998-0663.2018.4.54.65

19. Mozurkunaite S., Sabaityte J. To what extent we do understand smart cities and characteristics influencing city smartness // Journal of Architecture and Urbanism. 2021. Vol. 45. Issue 1. Pp. 1–8. DOI: 10.3846/jau.2021.12392

20. Scott A.J. Urbanization, work and community: the logic of city life in the contemporary world // Quality Innovation Prosperity. 2017. Vol. 21. Issue 1. P. 9. DOI: 10.12776/QIP.V21I1.785

21. Sarchenko V.I., Khirevich S.A., Sarchenko M.V. The cost modeling of urbanized areas // Real Estate: Economics, Management. 2021. No. 4. Pp. 42–48. EDN UDFYPD.

22. Zaitseva L.I. Conditions and background for the introduction of non-judicial dispute resolution methods in the investment and construction sphere // Public Administration. 2019. Vol. 21. No. 4 (120). Pp. 66–69. DOI: 10.22394/2070-8378-2019-21-4-66-69. EDN NTASUN.

Поступила в редакцию 12 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 16 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 3 ноября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Наталья Юрьевна Яськова — доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой инвестиционно-строительного бизнеса и управления недвижимостью; **Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС);** 119571, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 82; РИНЦ ID: 490267, Scopus: 56209112800, ResearcherID: O-7581-2018, ORCID: 0000-0002-3245-1549; yaskova-ny@ranepa.ru;

Лариса Игоревна Зайцева — кандидат юридических наук, доцент кафедры инвестиционно-строительного бизнеса и управления недвижимостью; **Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС);** 119571, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 82; начальник отдела обобщения судебной практики, учета и статистики; **Арбитражный суд Московского округа;** 127994, г. Москва, ГСП-4, ул. Селезневская, д. 9; РИНЦ ID: 1027747, Scopus: 57194457897, ResearcherID: P-9941-2019, ORCID: 0000-0002-8325-4342; zaitseva-li@ranepa.ru.

Вклад авторов:

Яськова Н.Ю. — разработка концепции исследования, написание текста статьи, подготовка итоговых выводов.

Зайцева Л.И. — нормативно-методическое обеспечение.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Yaskova N.Yu., Zaytseva L.I., Viktorov M.Yu. Issues in the implementation of an import substitution strategy in Russia's construction sector. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022; 14(4):29. EDN HHCHOO. (rus.).
2. Shmyrev A.V., Yaushev A.A. Import substitution in the Russian construction industry under western sanctions: problems and solutions. *Innovational Economics*. 2023; 1(34):82-99. EDN QLFCFU. (rus.).
3. Yaskova N.Yu., Zaitseva L.I. Construction: overcoming growth limits. *Real Estate: Economics, Management*. 2022; 4:12-17. EDN SVMQW.
4. Yaskova N.Yu., Lukmanova I.G., Zaytseva L.I. Organizational and economic approaches and methods of development of the construction industry in a climate of sanctions pressure. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(12):1707-1715. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1707-1715. EDN CAXKQI. (rus.).
5. Lemeshko M.V. Trends in the development of industrial construction in Russia at the present stage. *Construction Economy*. 2023; 3:21-27. EDN EYIPPP. (rus.).
6. Komarova A.V. Development of the construction industry at the current stage. *Economics of the New World*. 2020; 5(3):18:28-38. EDN OUDAZP. (rus.).
7. Sarchenko V.I., Khirevich S.A., Sarchenko M.V. Problems of ensuring the competitiveness of investment and construction activities under new macro-economic conditions and approaches to their resolution. *Real Estate: Economics, Management*. 2022; 1:82-87. EDN YUNGEL.
8. Yas'kova N.Yu., Sarchenko V.I., Khirevich S.A. Comprehensive approach to creating a quality urban environment. *Real Estate: Economics, Management*. 2020; 2:12-21. DOI: 10.22227/2073-8412.2020.2.12-21. EDN HDYWVW. (rus.).
9. Alekseev S.A., Viktorov M.Yu., Grabovyi P.G., Zaitseva L.I., Kazansky N.V., Kaminsky M.A. et al. *Spatial restructuring. New meanings and rules of investment and construction activities*. Moscow, Delo, 2019; 454. EDN KGWAKW. (rus.).
10. Azizova-Poluektova A.N., Dyakov I.A., Ivanova U.V. Coliving — new format of housing. *Architectural Research*. 2021; 1(25):45-51. EDN KNEYXQ. (rus.).
11. Shumakova E.V. Apart-hotel as an innovative form of organization of a hotel business. *Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration*. 2019; 8(3):28:400-402. DOI: 10.26140/anie-2019-0803-0093. EDN EWPKOM. (rus.).
12. Musavengane R. Small hotels and responsible tourism practice: Hoteliers' perspectives. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 220:786-799. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.143
13. Weber K. Service failure and recovery in an all-suite hotel/serviced apartment context: a case study. *Journal of Travel & Tourism Marketing*. 2009; 26(2):195-199. DOI: 10.1080/10548400902864834
14. Dossche C., Boel V., De Corte W. Use of life cycle assessments in the construction sector: critical review. *Procedia Engineering*. 2017; 171:302-311. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.338
15. Akinradewo O., Aigbavboa C., Aghimien D., Oke A., Ogunbayo B. Modular method of construction in developing countries: the underlying challenges. *International Journal of Construction Management*. 2021; 23(8):1344-1354. DOI: 10.1080/15623599.2021.1970300
16. Shoar S., Yiu T.W., Payan S., Parchamijalal M. Modeling cost overrun in building construction projects using the interpretive structural modeling approach: a developing country perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2021; 30(2):365-392. DOI: 10.1108/ECAM-08-2021-0732
17. Rossokhin V.V., Ryabova E.V. Identification of life cycle stages characterising factors. *Moscow University Economics Bulletin*. 2019; 3:92-109. EDN XCEZLX. (rus.).
18. Shtefan M.A., Elizarova J.M. Investment project efficiency and risk evaluation: an integrated approach. *Business Informatics*. 2018; 2018(4):54-65. DOI: 10.17323/1998-0663.2018.4.54.65
19. Mozuriunaite S., Sabaityte J. To what extent we do understand smart cities and characteristics influencing city smartness. *Journal of Architecture and Urbanism*. 2021; 45(1):1-8. DOI: 10.3846/jau.2021.12392
20. Scott A.J. Urbanization, work and community: the logic of city life in the contemporary world. *Quality Innovation Prosperity*. 2017; 21(1):9. DOI: 10.12776/QIP.V21I1.785
21. Sarchenko V.I., Khirevich S.A., Sarchenko M.V. The cost modeling of urbanized areas. *Real Estate: Economics, Management*. 2021; 4:42-48. EDN UDFYPD.
22. Zaitseva L.I. Conditions and background for the introduction of non-judicial dispute resolution methods in the investment and construction sphere. *Public Administration*. 2019; 21(4):66-69. DOI: 10.22394/2070-8378-2019-21-4-66-69. EDN NTASUN.

Received October 12, 2023.

Adopted in revised form on October 16, 2023.

Approved for publication on November 3, 2023.

B I O N O T E S: **Natalia Yu. Yaskova** — Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Investment and Construction Business and Real Estate Management; **Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA)**; 82 Vernadsky avenue, Moscow, 119571, Russian Federation; ID RSCI: 490267, Scopus: 56209112800, ResearcherID: O-7581-2018, ORCID: 0000-0002-3245-1549; yaskova-ny@ranepa.ru;

Larisa I. Zaitseva — Candidate of Legal Sciences, Associate Professor of the Department of Investment and Construction Business and Real Estate Management; **Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA)**; 82 Vernadsky avenue, Moscow, 119571, Russian Federation; Head of the Department for Generalization of Judicial Practice, Accounting and Statistics; **Arbitration Court of the Moscow District**; 9 Seleznevskaya st., GSP-4, Moscow, 127994, Russian Federation; ID RSCI: 1027747, Scopus: 57194457897, ResearcherID: P-9941-2019, ORCID: 0000-0002-8325-4342; zaitseva-li@ranepa.ru.

Contribution of the authors:

Natalia Yu. Yaskova — development of the research concept, writing the text of the article, preparation of final conclusions.

Larisa I. Zaitseva — scientific editing, normative and methodological support.

The authors declare no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен **в соответствии со стандартом IMRaD** и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников *на русском языке* оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников *на английском языке* (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия^{2...}

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

² Место работы 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.

В **ionotes**: **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.

