

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 18 Выпуск 5/2023
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 18. Выпуск 5
2023**

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

Сквозной номер 174

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 18. Issue 5
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	25.05.2023.
Подписан в свет	26.05.2023.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 18,20. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 147

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Анна Александровна Дядичева

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Иван Владимирович Вечкутов

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рашид Абдуллович Мангушев, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего обра-

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	25.05.2023

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dmitry V. Kozlov, Moscow State University of civil engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova* **Layout:** *Ivan V. Vechkutov*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

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

<i>А.Г. Макаров</i> Новая концепция каркасно-панельной технологии индустриального строительства	673
<i>В.Н. Сидоров, А.М. Примкулов</i> Численно-аналитическое решение нестационарной задачи теплопроводности с переменными теплофизическими параметрами среды	685
<i>Т.А. Зиннуров, Е.В. Новицкий</i> Определение прогиба составных деревянных изгибаемых элементов, армированных цилиндрическими полимеркомпозитными нагелями	697

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Нгуен Зоан Тунг Лам, С.В. Самченко</i> Комплексный модификатор на основе алюминатного цемента и пуццолановой добавки	709
---	-----

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>А. Тахерифард, В.В. Елистратов</i> Трехмерное моделирование эрозии трубопровода с двойным коленом в многофазной среде метан – вода – песок	717
---	-----

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

<i>А.Л. Торопов</i> Энергетическая эффективность циркуляционных насосов при использовании незамерзающих теплоносителей	726
<i>Ю.В. Елистратова, А.С. Семиненко, В.А. Уваров, В.А. Минко</i> Влияние накипных отложений на температурный режим в каналах теплообменников пластинчатого типа	737
<i>О.А. Самодолова, А.П. Самодолов, Д.В. Ульрих, Т.М. Лонзингер</i> Использование растительных отходов в очистке сточных вод, загрязнённых тяжелыми металлами	747

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

<i>С.В. Колобова</i> Обзор зарубежного и московского опыта реновации городской застройки.	757
<i>А.Дж.Н. Наджи, А.М. Эльшейх</i> A review of sustainability applications in the construction industry: perspectives and challenges (Обзор применения устойчивого развития в строительной отрасли: перспективы и проблемы).	771
<i>Г.Л. Сафина, Д.С. Ершов, А.С. Корнев, Р.З. Хайруллин</i> Моделирование процессов создания высокотехнологичной продукции строительного назначения.	785
<i>В.В. Глазкова, Е.Г. Господарик</i> Развитие государственно-частного партнерства на основе концессий в сфере теплоснабжения	798
Требования к оформлению научной статьи	808

CONTENTS

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

Andrey G. Makarov

New concept of frame and panel technology for industrial construction 673

Vladimir N. Sidorov, Alim M. Primkulov

**Semi-analytical solution to steady-state and transient heat transfer problem
with variable conductivity properties of the domain 685**

Tagir A. Zinnurov, Egor V. Novitsky

**Deflection determination of composite wood bending elements
reinforced with cylindrical polymer composite dowels 697**

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Nguyen Doan Tung Lam, Svetlana V. Samchenko

Complex modifier based on alumina cement and pozzolanic addition 709

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Alireza Taherifard, Victor V. Elistratov

3D Modelling of double elbow pipeline erosion in methane – water – sand multiphase medium. 717

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Alexey L. Toropov

Energy efficiency of circulating pumps when using non-freezing heat transfer fluids 726

Yulia V. Elistratova, Artem S. Seminenko, Valeriy A. Uvarov, Vsevolod A. Minko

Influence of scale deposits on the temperature conditions in the channels of plate-type heat exchangers 737

Olesya A. Samodolova, Aleksandr P. Samodolov, Dmitrii V. Ulrikh, Tatiana M. Lonzinger

Use of plant waste in the treatment of heavy metal polluted wastewater. 747

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Svetlana V. Kolobova

Overview of international and Moscow experience in urban renovation. 757

Naji Alaa Jalil Naji, Elsheikh Asser Mohamed

**A review of sustainability applications in the construction industry:
perspectives and challenges 771**

Galina L. Safina, Denis S. Ershov, Aleksey S. Kornev, Rustam Z. Khayrullin

Modelling of processes of creation of hi-tech construction products 785

Valeria V. Glazkova, Catherine G. Gospodarik

Development of public-private collaboration on the basis of heat supply concessions 798

Requirements for research paper design 808

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18, Выпуск 5, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18, Issue 5, 2023

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).

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 694.5
DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.673-684

Новая концепция каркасно-панельной технологии
индустриального строительства

Андрей Георгиевич Макаров

Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ); г. Хабаровск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследован опыт научных сообществ в развитии строительных систем и концепций индустриальных каркасных (каркасно-панельных) технологий. Обзор публикаций по совершенствованию технологии строительства в мировой практике деревянного строительства дает основание для разработки новой технологической концепции индустриальной строительной системы (ИСС). Установлено, что в независимости от предлагаемых новых методов и подходов задача разработки теории единой ИСС на основе деревянных клееных конструкций с учетом классических концепций архитектуры и промышленного строительства остается первостепенной в поисках и исследованиях ученых из многих стран и международных научных сообществ. Предлагается новая концепция в подходе решения проблемы индустриализации производства, монтажа и строительства зданий. Приведены предварительные результаты разработанной системы промышленного строительства нового поколения. Представлено краткое описание и структурная схема инновационной системы.

Материалы и методы. На основе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ предлагается новый подход к решению задач, стоящих перед мировым научным сообществом в части повышения уровня степени индустриализации, заключающийся в абстрагировании от существующих тенденций, технологических приемов и методов строительства.

Результаты. Представлена новая универсальная силовая схема жесткой пространственной рамы, на основе которой создана новая конструкторско-технологическая платформа унифицированной каркасно-панельной технологии. Разработана унифицированная геометрия всех элементов и узлов, составляющих каркас здания любой архитектурно-планировочной схемы. Все детали, сборные конструкции и элементы крепления объемной пространственной рамы унифицированы и систематизированы в каталог, входящий в единую систему производственной логистики проектирования, производства и строительства, формирующую корпоративную информационную систему.

Выводы. ИСС нового поколения предполагает дальнейшее научное обоснование и исследование, тем не менее можно утверждать, что внедрение ее в промышленное производство даст большие возможности реализации целей и задач, поставленных в федеральных и региональных стратегиях развития лесопромышленного, строительного и жилищно-коммунального комплексов, а также социально-экономического развития.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: индустриальное строительство, каркасно-панельная технология, унифицированная геометрия, сортамент деталей, структура системы, каталог деталей, сквозная производственная логистика, модульная координация размеров

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Макаров А.Г. Новая концепция каркасно-панельной технологии индустриального строительства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С. 673–684. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.673-684

Автор, ответственный за переписку: Андрей Георгиевич Макаров, skelpik@gmail.com.

New concept of frame and panel technology for industrial
construction

Andrey G. Makarov

Pacific National University (PNU); Khabarovsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The experience of scientific communities in the development of building systems and concepts of industrial frame (frame-panel) technologies has been studied. A review of publications about development of construction technology in the world practice of wooden construction provides a basis for the development of a new technological concept of an industrial

building system (IBS). It is found that, regardless of the proposed new methods and approaches, the task of developing a unified IBS theory based on glued wood structures (GWS), taking into account the classical concepts of architecture and industrial construction, remains paramount in the search and research of scientists from many countries and international scientific communities. A new concept in the approach to solving the problem of industrialization of production, installation and construction of buildings is proposed and preliminary results of the developed system of industrial construction of a new generation are presented. A brief description and an innovation system diagram are given.

Materials and methods. On the basis of R&D, a new approach is proposed to solve the problems facing the global scientific community in terms of increasing the level of industrialization, which involves abstracting from existing trends, technological methods and construction methods.

Results. A new universal power circuit (UPC) of a rigid spatial frame is proposed, on the basis of which a new design and technological platform (DTP) of a unified frame-panel technology has been created. A unified geometry of all elements and nodes that make up the frame of a building of any architectural and planning scheme has been developed. All parts, prefabricated structures and fastening elements of the three-dimensional space frame are unified and systematized into a single catalog, which is part of a single system of industrial logistics for design, production and construction, forming a corporate information system.

Conclusions. The new generation IBS requires further scientific substantiation and research, however, it can be argued that its introduction into industrial production will provide great opportunities for achieving the goals and objectives set in the federal and regional development strategies for the timber industry, construction and housing and communal services complexes, as well as socio-economic development.

KEYWORDS: industrial construction, frame-panel technology, unified geometry, assortment of parts, system structure, parts catalog, end-to-end production logistics, modular size coordination

FOR CITATION: Makarov A.G. New concept of frame and panel technology for industrial construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):673-684. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.673-684 (rus.).

Corresponding author: Andrey G. Makarov, skelpik@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Начало опытного применения строительных деревянных клееных конструкций (ДКК) в Советском Союзе относится к 30-м годам прошлого столетия, примерно в этот период были изданы и первые нормативные регламенты (ТУ, СП) [1]. Промышленное производство было налажено в конце 40-х годов XX в. по результатам фундаментальных научных исследований советских ученых, труды которых были известны далеко за пределами страны и переведены на многие языки. Дальнейшее становление этого направления строительной отрасли не было стабильным, отмечалось падение производства (1955–1960, 1980 гг.) и его подъем (1961–1970, 1990 гг.). Примерно с середины 90-х годов и по настоящее время наблюдается медленное развитие производства ДКК. Большой вклад в разработку новых версий нормативных документов внесен специалистами Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций имени В.А. Кучеренко, научным сообществом вузов: Московского инженерно-строительного института (МИСИ, ныне — НИУ МГСУ), Ленинградского инженерно-строительного института (ЛИСИ, сегодня — СПбГАСУ), Хабаровского политехнического института (ХПИ, сейчас — ТОГУ), а также отраслевыми НИИ. Опыт и знания, накопленные в области строительства на основе ДКК в мировой практике, невозможно переоценить, но лишь в части возведения уникальных архитектурных сооружений, высотных зданий и большепролетных конструкций. Ситуация с развитием научно-обоснованных строительных технологий для массового мало- и среднеэтажного строительства (жилого, административного, социального, коммунального)

остается, к сожалению, на уровне XVII–XVIII вв. [4]. Тем не менее за последние несколько десятилетий современные тенденции устойчивого развития именно для массового строительства на основе ДКК требуют от научного сообщества создания новой концепции индустриального строительства. Задача разработки такой концепции на базе каркасной (каркасно-панельной) технологии домостроения ставится с середины XX в., и по сей день она актуальна не только для России, но для многих стран.

На основе проведенного анализа публикаций, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) предлагается концепция системы индустриального строительства на базе каркасной (каркасно-панельной) технологии нового поколения. Эффект увеличения степени индустриализации данной концепции основан на межотраслевой интеграции всех стадий производственного и эксплуатационного циклов [2]. Только на основе такого подхода возможно добиться желаемого результата, «уровень степени индустриализации должен включать весь жизненный цикл от разработки проекта до технического обслуживания строительного продукта» [3].

Актуальность новой технологической концепции

Исследуя развитие строительной технологии, авторы [4] приходят к выводу, что «сравнивая современный энтузиазм с быстровозводимым жильем с энтузиазмом двадцатого века, есть предположения, что история повторяется, когда сторонники сборных домов заявляют о своих преимуществах, которые похожи на это в прошлом». Вместе с тем «сборное жилье, имея долгую историю, уходящую в XI век, стигматизировано из-за неудачного строительства

в XX веке, все это снова используется в XXI веке при массовом строительстве» [4].

Существующие в настоящее время в мире принципы производства, сборки, а также силовая схема построения жесткой пространственной рамы идентичны, как и основные узлы каркаса и технология самого строительства. Особенность такой идентичности характеризуется обилием ручных операций на месте строительства, затратами временных и финансовых ресурсов, низким качеством строительства и высокими эксплуатационными затратами, коротким жизненным циклом (ЖЦ) строительного продукта. Каждое архитектурно-планировочное решение уникально и, как правило, является продуктом одноразового применения, при его проектировании требования модульной координации размеров¹ соблюдаются либо в меньшей степени, либо вообще не соблюдаются. Критериям унификации, типизации и модульности такая строительная продукция отвечает в наименьшей степени. Рост количества типоразмеров преимущественно определяется незначительными расхождениями конструктивных размеров деталей и конструкций при весьма ограниченном выборе планировочных параметров.

Все эти недостатки многие компании Европы и Северной Америки, производящие комплекты и сборные конструкции для строительства, пытаются нивелировать путем внедрения цифровизации и автоматизации производственных процессов, тем не менее, оставаясь в плену устаревшей парадигмы ящичного строительства. Несмотря на многообразие изделий, область применения деревянных технологий крайне ограничена, тем более опираться на них с целью разработки на их основе какой-либо индустриальной строительной системы бессмысленно. В этой связи «...необходимо, во-первых, извлечь уроки из своих предыдущих ошибок, а во-вторых, рассмотреть возможность проведения комплексных исследований для оценки и устранения препятствий на пути более широкого применения таких методов, чтобы избежать аналогичных социальных и экономических проблем» [5].

В значительном большинстве публикаций общая тенденция научных поисков сводится к понятиям стандартизация, модуляция, автоматизация процессов и формулировке различных новых терминов и понятий применительно к технологии, существующей более двух столетий. Одно из прорывных направлений повышения уровня индустриализации, по предложению многих авторов, это применение как в производстве конструкций, так и в их сборке и строительстве принципов организации интегрированного промышленного производства по аналогии с автомобильной, судовой и авиапромышленностью. «Перед мировым научным сообществом стоит задача в опреде-

лении главного вектора дальнейшего прогрессивного развития индустриальных деревянных конструкций, и выявить области и формы эффективного их применения. Индустриальные деревянные конструкции должны в полной мере удовлетворять современным требованиям надежности и долговечности в эксплуатации, а также требованиям комплексной механизации и экономичности в поточном производстве по аналогии обрабатывающей промышленности» [6]. В эпоху Индустрии 4.0 менять устаревшую парадигму, не разрабатывая концепцию нового поколения, это потерять огромную отраслевую интеграцию лесопромышленного и строительного комплексов, поскольку «...разработка сложных инженерных узлов и сегодня остается первостепенной проблемой, а отпавлять ее решение на строительную площадку — значит открывать путь дискредитации ДКК, как уникального строительного материала» [1].

По итогам обзора научных публикаций напрашивается вывод, что исследуемая проблема индустриализации строительной отрасли ДКК малой и средней этажности вышла из внутрисовременного уровня и приняла характер международной научной проблематики. «Новый подход к промышленному жилью должен включать повышенную ориентацию на клиента и улучшенные процессы интеграции дизайна, производства, информации и управления, которые должны быть достигнуты путем изменений и инноваций» [7].

Новая технологическая концепция

Если принять за основу, что «господствующая парадигма строительства как «промышленности» не совсем отражает сложности, заложенные в процессе создания инфраструктуры и/или здания. Динамика построения выходит за рамки динамики системы в силу характера ее сложностей. Применение текущих усилий по повышению эффективности и результативности продолжает приводить к значительным различиям между ожиданиями и результатами. Эти различия указывают на аномалии между нынешней парадигмой и реальностью» [8, 9], несложно прийти к выводу о необходимости разработки новой технологической концепции и принятия ее за новую парадигму инновационной технологической платформы. «У большинства отраслей промышленности строительства есть ресурсы, но все еще не хватает концепций конструктивности и передовых технологий, которые могут повысить скорость строительства, улучшить качество конструкции и быть в состоянии защитить окружающую среду» [10]. Вместе с тем нельзя не согласиться с тем, что «крайне важно, чтобы ИСС рассматривался как эволюция строительства с использованием новых и инновационных методов, а не революция» [3].

¹ ГОСТ 28984–2011. Модульная координация размеров в строительстве. Основные положения. ISO 1006 Modular coordination of construction dimensions. General. URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4293789/4293789429.pdf>

Как отмечалось выше, научная проблематика разработки внедрения концепции индустриальной строительной системы (ИСС) на основе ДКК в России освещена многими авторами советского периода и на сегодняшний день отражена в работах [1, 11–13]. Но, как видно из зарубежных публикаций за последние десятилетия, эта же проблема стоит и перед научным сообществом Европы и Северной Америки. Например, формулируя задачу создания «...сильной и конкурентоспособной промышленной сборки» [14], автор справедливо обозначил не менее актуальную проблему разработки унифицированных элементов крепления. «Критическим элементом большинства деревянных конструкций является устройство соединений между несущими элементами» [15]. В целом обозначенные в публикациях проблемы ставят задачу разработки унифицированных узлов соединений деревянных деталей и конструкций для условий заводской сборки или, как минимум, сборки готовых конструкций на месте строительства. Процессы производства и технологическая концепция могут быть приняты по аналогии автомобильного производства, следовательно, можно заключить, что «...строительные фирмы должны иметь возможность «перехватывать» технологии и реконфигурировать их для своих собственных целей» [16], в то время как существующие технологии и «технические решения, разработанные в конкретных проектах, часто имеют встроенные архитектуры продуктов, которые трудно повторно использовать в процессах непрерывного совершенствования» [17].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обобщая и систематизируя публикации авторов Европы, Северной Америки, Австралии, Китая, Малайзии и других стран, можно заключить, что научные поиски в большинстве ведутся по следующим трем направлениям: исследуются экономические аспекты автоматизации и цифровизации существующих не технологических операций; анализируются попытки обосновать целесообразность использования опыта поточного производства аналогичного в машиностроении; рассматривается утверждение о несоответствии господствующей технологической парадигмы современным вызовам и принципам устойчивого развития.

Исходя из системного анализа публикаций и НИОКР с выделением ключевых факторов, а также используя метод научной логики, метод полного абстрагирования от существующих тенденций, технологических приемов и методов строительства, выработанных в мировой практике в период глубокого исторического периода, было определено новое направление, основанное на формировании технологической концепции, объединяющей все три направления. Предмет разработки новой технологической концепции — это процесс формирования

жесткой пространственной рамы путем сборки как из отдельных деталей, так и сборных конструкций.

Исследуя и анализируя советский, российский и мировой опыт проектирования и строительства зданий по технологии деревянного каркаса, предложена новая конструкторско-технологическая платформа (КТП) унифицированной каркасно-панельной технологии нового поколения. КТП, представляющая собой конструктивно-технологический комплекс унифицированных узлов соединений, состоящий из деревянных строительных деталей креплений и сборных конструкций. Методом трехмерного 3D-моделирования разработана универсальная силовая схема (УСС) жесткой пространственной рамы, а также унифицированная геометрия всех элементов, составляющих тот или иной узел. Новая КТП унифицированных узлов соединения на основе УСС дала возможность разрабатывать широкий спектр архитектурно-планировочных схем зданий различного назначения (жилой, социальной или промышленной инфраструктуры) по определенным правилам, определяющим закономерность распределения деталей, сборных конструкций и элементов крепления в жесткой пространственной раме.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Формулировка задачи

Для решения задачи создания ИСС на основе ДКК в первую очередь необходимо решить более сложную задачу — разработать новую унифицированную технологию сборки деревянного каркаса, отвечающую всем критериям индустриального производства. Как уже отмечено, существующие технологии каркасного строительства, широко используемые в России и в мире, таким критериям не отвечают. Широко применяемые зарубежными компаниями строительные технологии среднего и высотного строительства на основе деревянных конструкций, изготавливаемых в заводских условиях, тем не менее критериям ИСС отвечают в наименьшей степени, поскольку среди них преобладают архитектурно-дизайнерские решения одноэтажного использования. Каждый проект имеет собственную номенклатуру изделий. Таким образом, на первый план выходит задача разработки инновационной унифицированной технологии, предназначенной для строительства жилой, общественной, социальной инфраструктуры, максимально отвечающей требованиям индустриального производства. Наиболее значимой с точки зрения разработки технологии как базовой для ИСС является, прежде всего, унификация геометрии и конструкций всех составных деталей деревянного каркаса, а также, что не менее важно, деталей крепления. Это даст возможность «...значительно снизить затраты при производстве и реализовать правила, регулирующие технологичность геометрии» [5].

Помимо этого необходима в том числе унификация деталей лестничных маршей, деталей оконных и дверных проемов, устройств инженерного оборудования (санитарно-технического, отопления, вентиляции, кондиционирования и т.д.). Итак, на основе универсальной геометрии и конструкционного принципа формируется *архитектурно-конструктивно-технологическая система* (АКТС), дающая возможность легко формировать сборочные узлы всего каркаса. Разработка ИСС — это часть общей проблемы повышения степени индустриализации при разработке технологической концепции. Следующей важнейшей задачей служит повышение качества строительной продукции, максимальное увеличение ЖЦ строительного продукта и уровня пожарной безопасности деталей и конструкций «...чтобы гарантировать, что здание может сохранять свою структурную целостность в течение достаточного времени либо для эвакуации жителей здания, либо для тушения пожара» [15].

Описание индустриальной строительной системы

В сложившейся практике количество звеньев в узле доходит до пяти. Как правило, такая конфигурация существует в самых ответственных и нагруженных узлах: «стойка – обвязка – саморез (гвоздь) – башмак (хомут) – балка» (рис. 1), каждое звено в цепи находится под максимальной нагрузкой.

С помощью 3D-моделирования разработана унифицированная пространственная геометрия узлов и конструкции всех составных элементов и деталей пространственного каркаса. Подобным образом были разработаны конструкции всех основных узлов: межэтажного узла, углового соединения и углового межэтажного соединения, узлов соединения колонны с ригелем, узла соединения перемычек проемов со стойкой и (или) колонной и т.д. В процессе моделирования конструкций всех узлов жесткого пространственного каркаса создан полный сортамент деревянных деталей, сортамент деталей крепления, в дальнейшем на этой основе скомплектован отдельный раздел каталога — сборные конструкции.

Выбор рациональных пропорций в значительной степени способствует уменьшению проблем промышленного производства, «если будут реализованы правила, регулирующие технологичность геометрии». Во многих публикациях авторы предлагают различные размеры сечений. Например, в работе [11] рекомендуется градация размеров профиля, которая больше подходит для фахверковой технологии. В этой связи для обеспечения энергетической эффективности несущей ограждающей конструкции в климатических условиях российского Дальнего Востока, а также с целью унификации геометрии



Рис. 1. Примеры традиционного крепления балок перекрытия к стене и ригелям²

Fig. 1. Examples of traditional fastening of floor beams to the wall and to crossbars²

² APA — The Engineered Wood Association. URL: <https://www.apawood.org/photography>

профиля и конструкций всех узлов была определена зависимость 1:4. Такая зависимость, как показали эксперименты, в наибольшей степени удовлетворяет тому, что «концепция экономного производства применяется к промышленному жилью путем сочетания индивидуализации и стандартизации при разработке эффективных производственных процессов» [6].

Сортамент профилей основных деталей каркаса

Assortment of profiles of the main frame parts

Размеры профиля, мм Profile dimensions, mm	
Ширина <i>b</i> Width	Высота <i>h</i> Height
50	200
55	220
60	240
65	260
70	280
75	300

Сортамент деталей в зависимости от типа проектируемого здания, его планировочной схемы, количества и высоты этажей основывается на унифицированных сечениях профилей (табл.). Для упрощения процесса разработки АКТС необходимо задаться условным параметром сечения профиля основных деревянных элементов, образующих весь сортамент деталей каркаса здания, при выборе оптимальных вариантов конструкций и геометрии узлов принято использование профиля (позиция 1), т.е. 50 × 200 мм. Межэтажная обвязка — единственный элемент, имеющий наиболее сложную геометрию с точки зрения количества технологических операций, необходимых для ее изготовления.

В целом унифицированная геометрия строительных и крепежных деталей предполагает ограниченный набор простых технологических операций и последовательность их выполнения при изготовлении всего комплекта деталей возводимого здания, что дало возможность максимально упростить и сократить сборочные, строительные операции, а также операции по монтажу инженерных систем на месте строительства. На начальном этапе определение размеров сечения профиля основных деталей каркаса не является принципиальным, поэтому, принимая

Номер п/п Order Number	Номер каталога Catalog Number	Наименование детали Part name	Марка детали Part brand	Шифр чертежа Drawing code	Примечание Note
1.	2.	3.	4.	5.	6.

a

1. Детали 1. Details 1.1. Стойки 1.1. Racks 1.1.1. Несущие (продольная стена) 1.1.1. Racks longitudinal wall 1.1.2. Ненесущие (торцевая стена) 1.1.2. Racks face wall 1.1.3. Межэтажные несущие (продольная стена) 1.1.3. Interstorey longitudinal wall 1.1.4. Межэтажные ненесущие (торцевая стена) 1.1.4. Interstorey face wall 1.1.5. Детали колонн, ригелей, перемычек и косоуров 1.1.5. Details of columns, rigels, rods and crosses 1.1.6. Стойки внутренних перегородок 1.1.6. Rack internal partitions 1.2. Детали лестничных маршей 1.2. Ladder parts details 1.3. Ригели и перемычки проемов 1.3. Rigels and jumper	1.4. Проемы 1.4. Details of open 1.5. Обвязка 1.5. The interstorey 1.6. Вставки 1.6. Inserts 1.7. Бруски и лаги 1.7. Brusks and lags 2. Сборочные детали 2. Assembly details 2.1. Стойки основные 2.1. Racks basic 2.1.1. Несущие (продольная стена) 2.1.1. Racks longitudinal wall 2.1.2. Ненесущие (торцевая стена) 2.1.2. Racks face wall 2.1.3. Комбинированные 2.1.3. Racks combined 2.2. Стойки межэтажные 2.2. Racks interstorey 2.2.1. Несущие (продольная стена) 2.2.1. Racks longitudinal wall 2.2.2. Ненесущие (торцевая стена) 2.2.2. Racks face wall 2.2.3. Комбинированные 2.2.3. Racks combined	2.3. Колонны 2.3. The columns 2.4. Колонны межэтажные 2.4. Columns interstorey 2.5. Ригели 2.5. The rigels 2.6. Косоуры лестничных маршей 2.6. Ladder parts details 2.7. Перемычки оконных и дверных проемов 2.7. Details of open 3. Крепежные элементы 3. Fixing elements 3.1. Продольная стена 3.1. Longitudinal wall 3.2. Торцевая стена 3.2. Face wall 3.3. Крепление угловой стойки 3.3. Fixing corner racks 3.4. Крепление Т-образной стойки 3.4. Fixing T-pillar 3.5. Крепление крестовой стойки 3.5. Fixing x-pillar 3.6. Колонна-ригель (перемычка) 3.6. Fixing columns-rigels (jumper)	3.7. Крепление фундаментной обвязки 3.7. Fixing interstorey 3.8. Детали крепления лестничных маршей 3.8. Ladder mounting details 3.9. Ответные элементы 3.9. Responsible elements 3.10. Установочные детали 3.10. Installation details 3.11. Стандартные изделия 3.11. Standard products Приложение № 1 Расположение элементов в профилях сборочных частей Appendix No. 1 Location of elements in profiles of assembly parts 1.1. Колонны, ригели, перемычки 1.1. Columns, crossbars, crosspieces 1.2. Комерческие стойки 1.2. Comer racks 1.3. Стеллажи T-PILLAR 1.3. Racks T-PILLAR 1.4. Стойки X-PILLAR 1.4. Racks X-PILLAR 1.5. Лестничные колонны 1.5. Staircase columns
--	---	---	--

b

Рис. 2. Структура каталога по наименованию, маркировке и шифру конструкторской документации изделия (а); структура каталога по составу (b)

Fig. 2. Structure of the catalog by name, marking and cipher of the design documentation of the product (a); structure of the catalog by composition (b)

их как условные, необходимо проработать унифицированную геометрию всех элементов системы. Задача разработки системы модульной координации размеров отнесена в перечень дальнейшей научной работы. Для производства всего комплекса сортаментов разработаны технические условия (ТУ), технические требования, а также нормы и технологические параметры к качеству, заводскому контролю, приемке, упаковке, транспортировке клееных деталей и конструкций заводского изготовления, что в дальнейшем предполагается отразить в разрабатываемых нормативных документах.

Как отмечалось, в период 2009–2011 гг. на основе двухзвенной УСС и единой конструктивной геометрии были разработаны различные узлы, в том числе: «стойка – обвязка – балка»; «колонна – ригель»; «угловая стойка – обвязка»; «перемычка проема – стойка (колонна)». С более подробным описанием некоторых из перечисленных узлов можно познакомиться в работах [18–20]. Жесткая пространственная рама каркаса собирается с помощью уже описанных и в том числе других узлов с аналогичной геометрией в независимости от архитектурно-планировочной схемы и этажности здания. АКТС позволяет формировать тип пространственной рамы как со сквозными стойками (*баллонная система*), так и (или) по типу *платформенной системы*.

Таким же образом формируются стеновые панели, при этом полная заводская сборка производится как целой стены, так и, например, двух или трех фрагментов с их последующим соединением между собой на стройплощадке в единую трехслойную «пространственную» панель. Вся номенклатура составных деталей силового каркаса сведена в единый сортамент, объединенный каталогом. Структура каталога представлена на рис. 2, а. В состав каталога (рис. 2, б), помимо деревянных деталей каркаса, входят дополнительные деревянные, а также основные и дополнительные детали крепления. Структура каталога состоит из четырех разделов: деревянные детали, детали крепления, сборочные конструкции и приложения, в которых приводятся эскизы типовых узлов. Детали крепления состоят из двух основных типов: 1 — накладные и 2 — закладные. Тип 1 применяется для сборки узлов из деталей простых профилей, тип 2 — для сборки узлов из сложных составных профилей: колонны, ригели, перемычки проемов, косоуры лестничных маршей. Детали крепления связывают между собой деревянные элементы болтами в узлы, формируя объемную пространственную раму. Состав каталога имеет ограниченный перечень, тем не менее обеспечивает создание различных архитектурно-планировочных и объемных структур зданий, позволяющих разнообразить планировку любых типов и назначений. Например, при проектировании гаража или крупного торгового центра, благодаря унифицированной геометрии, состав и структура каталога остается

неизменной. Набор и последовательность выполнения технологических операций при изготовлении комплекта всех деталей каркаса здания любой архитектурно-планировочной схемы всегда одни и те же. При разработке рабочего проекта здания основные геометрические параметры размеров, пропорции и взаимное расположение базовых поверхностей деталей и (или) сборных конструкций остаются неизменными, изменяются только линейные размеры в соответствии с системой модульной координации:

- взаимное расположение базовых поверхностей в межэтажном узле, определяющем закономерность распределения несущих деталей в каркасе с учетом соответствующей пространственно-планировочной схемы здания;
- длина стоек и колонн для обеспечения высоты потолка проектируемого здания;
- номер и размеры профиля ригелей, балок перекрытия и перемычек оконных и дверных проемов;
- геометрические параметры деталей лестничных маршей;
- геометрические параметры деталей оконных и дверных коробок.

В рамках государственного контракта № 6914р/9185 с Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, используя разработанную номенклатуру унифицированных узлов и деталей, построены 3D-модели каркасов двух жилых зданий: многоквартирный жилой дом, жилой трехэтажный дом на 12 квартир и административное здание. В том числе по плану НИОКР собран макет фрагмента многоквартирного жилого дома в М1:10 (рис. 3). Во всех планировочных схемах для формирования силового каркаса этих зданий были использованы составные элементы, взятые из сводного каталога.

Разработанная АКТС на основе двухзвенной УСС в совокупности с унифицированной геометрией дали возможность значительно упростить и автоматизировать технологический процесс изготовления всего сортамента деталей, а также технологию заводской сборки конструкций, сократить количество и время сборочных операций. С помощью инновационной технологии решается главная задача: с одной стороны, преодоление противоречия между индустриальным производством и возможностью реализовать любой замысел архитектора; с другой — строго ограниченная номенклатура изделий (деталей и сборных конструкций) не приводит к однотипности планировочных схем зданий. В инновационной ИСС удачно «сохраняется баланс между эффективностью и однообразием» [21]. «Использование перспективы системной инженерии может быть полезно, когда все здание является общей системой, содержащей подсистемы в иерархическом порядке» [21]. На стадии промышленного освоения каталог деталей и конструкций разработанной системы, как информационная база для проектиро-

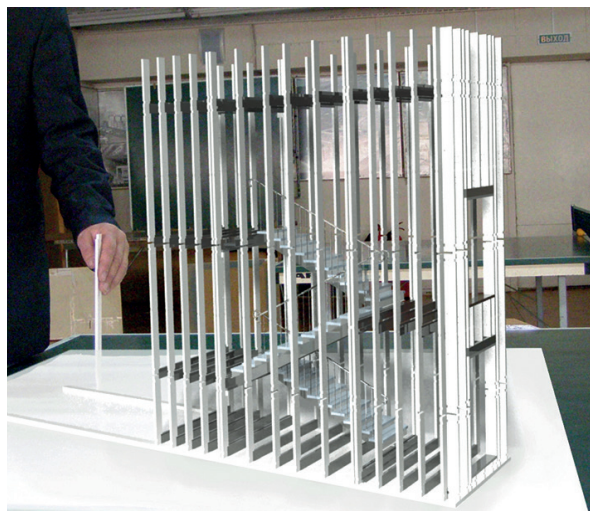
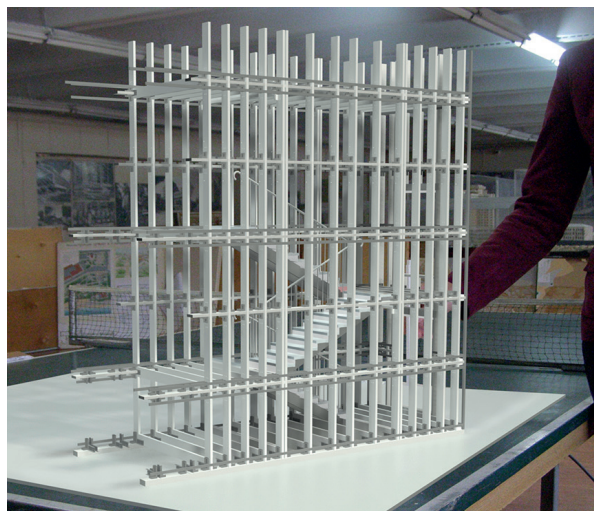


Рис. 3. Макет входной группы и лестничной клетки

Fig. 3. Layout of the entrance group and staircase

вания на основе ВІМ-технологий, будет входить в состав *корпоративной информационной системы* (КИС) для комплексной автоматизации всех процессов под единым управлением. ИСС и созданная на ее основе централизованная информационная база «...являются неотъемлемой частью надлежащим образом сформированной информационной структуры» [22].

Система построена исходя из базовых принципов стандартизации и унификации, а также в соответствии с модульной координацией размеров в строительстве (МКРС) с учетом зарубежных стандартов (DIN, ISO, ASTM, BS и др.). По результатам проведенных исследований, анализа мирового опыта каркасного строительства, а также по проектным решениям в рамках пилотного проекта такую платформу можно рассматривать как наиболее подходящую основу для формирования единых принципов проектирования объектов жилой, социальной и промышленной инфраструктур.

Вместе с тем можно с уверенностью утверждать, что система учитывает классические положения архитектуры при индустриальном строительстве, отвечающие требованиям серийного промышленного автоматизированного производства изделий и конструкций для строительства на основе клееной древесины, как направление ИСС нового поколения. «Производство модульных домов переняло методы, разработанные для производства автомобилей, в том числе ЛТ³, контроль качества, использование станков с ЧПУ, где это уместно, и автоматизацию передачи и хранения деталей» [22]. Структурная схема ИСС при полном технологическом цикле представлена на рис. 4.

В соответствии со структурой разработка строительной продукции производится в следующей последовательности:

I ЭТАП:

1. Промышленное производство:

- 1) изготовление деревянных деталей;
- 2) изготовление деталей крепления;
- 3) изготовление сборных деталей и конструкций.

2. Разработка проектной документации⁴.

3. Производство элементов экстерьера и интерьера здания.

II ЭТАП:

4. Строительно-монтажные работы (СМР). Включает производство нулевого цикла, монтаж конструкций каркаса, монтаж инженерных коммуникаций, отделочные работы, сервисное обслуживание.

При сокращенном технологическом цикле этап производства СМР исключается, а произведенные детали и конструкции поставляются подрядным организациям в соответствии с приобретенными правами и лицензиями. Единая сквозная система логистики, входящая в состав КИС, управляет всем комплексом объединенных технологических процессов от архитектурного замысла проектировщика до построенного здания в целом. Следует отметить одно из достоинств ИСС, повышающее степень ее индустриализации, нет необходимости транспортировать на место сборки большие сборные модули. Все части здания транспортируются в виде отдельных сборных конструкций и элементов (фрагменты стен, межэтажных перекрытий, внутренних перегородок, лестничных маршей и т.д.). Монтаж здания производится путем соединения всех элементов в единую конструкцию набором простых операций.

³ ЛТ — аббревиатура, принятая автором [6], «поставка точно в срок».

⁴ О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию (с изм. от 27.05.2022) : Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87.

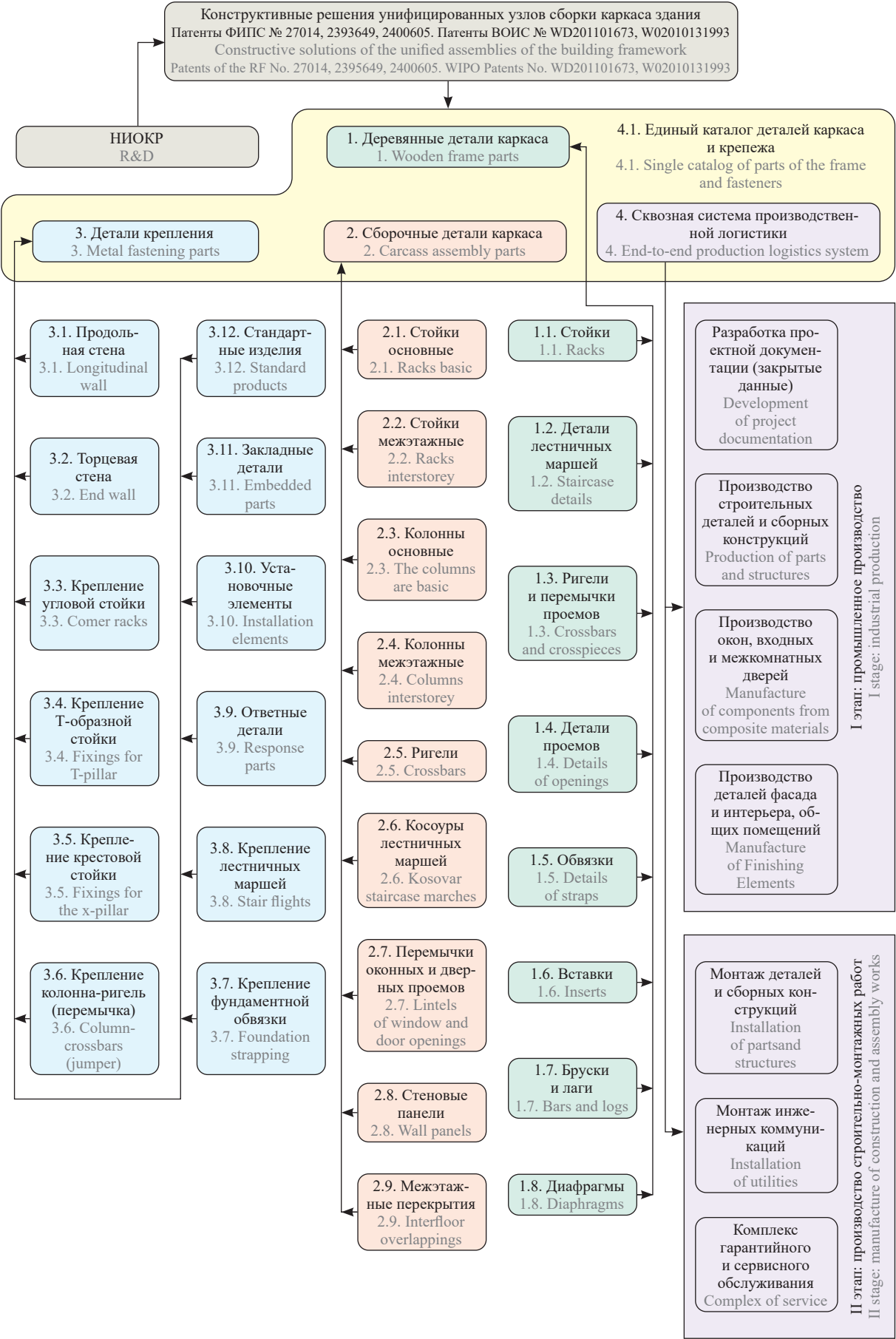


Рис. 4. Структурная схема инновационной ИСС

Fig. 4. Block diagram of innovative IBS

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на огромный вклад советских, российских и мировых научных сообществ в развитие строительных систем производства и строительства на основе инженерной древесины, эволюции технологий ИСС не наблюдается на протяжении нескольких десятилетий. Аналитический обзор научных статей университетов Европы, Северной Америки и других дает основание для утверждения, что:

- актуальность смены технологической парадигмы на основе инновационных концепций ИСС все более остро обсуждается как в научных, так и производственных сообществах;
- цифровизация и автоматизация производственных процессов, основанных на технологии прошлого и позапрошлого столетия, не дают желаемых результатов;
- разработку инновационных технологических концепций необходимо осуществлять на основе новых методов с применением критериев унификации, типизации и модульности всех компонентов системы;
- высокая степень индустриализации новых технологических концепций возможна по модели полного технологического цикла на основе принципа межотраслевой интеграции.

Предлагаемая инновационная технологическая концепция в наиболее полной степени отвечает критериям индустриального производства и базовой модели технологической платформы для ИСС. Освоение инновационной ИСС в промышленном производстве и строительстве возможно и в настоящее время, тем не менее необходимо провести ряд научных исследований и разработок в области технологических процессов, методик, новых материалов и инженерных задач, в том числе:

- теоретической основы инновационной концепции для формирования единых принципов типового проектирования объектов жилой, социальной и промышленной инфраструктур, а также классиче-

ских положений архитектуры при индустриальном строительстве, отвечающих требованиям серийного промышленного производства строительных изделий и конструкций для малоэтажного строительства, как альтернативного направления ИСС;

- системы модульной координации размеров с учетом зарубежных стандартов (DIN, ISO, ASTM, BS и др.) для гармонизации и эффективного применения унифицированной ИСС для строительства с учетом различных географо-климатических условий;
- инновационных решений узлов в каркасно-панельной системе средней и большей этажности, большепролетных мостовых конструкций;
- состава и технологии производства огнезащитного и теплоизолирующего покрытия для деревянных строительных деталей и сборных конструкций;
- состава и технологии производства материалов для защиты и отделки фасадов и помещений общего пользования многоквартирных зданий;
- программного обеспечения BIM-технологии сквозного трехмерного проектирования на основе информационной системы электронного каталога деталей и конструкций инновационной ИСС;
- технологического процесса обработки древесины (гидротермическая, импрегнация и др.) для обеспечения необходимых свойств и качеств деталей, конструкций и прочности узловых соединений.

В настоящей статье инновационная ИСС приведена в сжатом виде, более полное описание со всеми основными узлами и возможными их комбинациями представить в рамках одной статьи невозможно. Тем не менее следует отметить, что за последние три года узлы и принципы их сборки изменились коренным образом при неизменной их унификации и ключевых геометрических параметрах (модульности). На основании этого можно утверждать, что потенциал развития инновационной концепции на базе указанных выше исследований еще предстоит изучить.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Серов Е.Н., Лабудин Б.В. Клееный брус: современное состояние и проблемы развития // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. № 2 (332). С. 137–146.
2. Makarov A.G. Innovative concept for industrial construction: A new generation of frame-panel technology // Life-Cycle Civil Engineering: Innovation, Theory and Practice. 2021. Pp. 1431–1438. DOI: 10.1201/9780429343292-190
3. Kamar K.A.M., Hamid Z.A., Azman M.N.A., Ahamad M.S.S. Industrialized Building System (IBS): Revisiting Issues of Definition and Classification // International Journal of Emerging Sciences. 2011. Vol. 1. Issue 2. Pp. 120–132.
4. O'Neill D., Organ S. A literature review of the evolution of British prefabricated low-rise housing // Structural Survey. 2016. Vol. 34. Issue 2. Pp. 191–214. DOI: 10.1108/SS-08-2015-0037
5. Hashemi A. Review of the UK housing history in relation to system building // Alam Cipta. 2013. Vol. 6. Issue 1. Pp. 47–58.
6. Gann D.M. Construction as a manufacturing process? Similarities and differences between industrialized housing and car production in Japan // Construction Management and Economics. 1996. Vol. 14. Issue 5. Pp. 437–450. DOI: 10.1080/014461996373304
7. Lessing J., Stehn L., Ekholm A. Industrialised housing: Definition and categorization of the concept //

13th International Group for Lean Construction Conference. 2005. Pp. 471–480.

8. Fernandez-Solis J.L. The systemic nature of the construction industry // *Architectural Engineering and Design Management*. 2008. Vol. 4. Issue 1. Pp. 31–46. DOI: 10.3763/aedm.2008.S807

9. Fernández-Solis J.L., Arch B. How the Construction Industry does differ from manufacturing? Texas A&M University College Station, TX, 2009.

10. Azman M.N.A., Ahamad M.S.S., Hussin W.M.A. Comparative Study on Prefabrication Construction Process // *International Surveying Research Journal*. 2012. Vol. 2. Issue 1. Pp. 45–58.

11. Ковальчук Л.М. Строительные деревянные конструкции на основе серийно изготавливаемых стандартных элементов // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2009. № 4. С. 2–3.

12. Макаров А.Г., Пятикоп А.И. Описание и сравнительный анализ инновационной строительной системы // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2013. № 2–3. С. 32–38.

13. Макаров А.Г. Проблема индустриализации отрасли деревянного строительства и мостовых конструкций // *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплекса*. 2016. С. 15.

14. Wimmers G. Wood: a construction material for tall buildings // *Nature Reviews Materials*. 2017. Vol. 2. Issue 12. DOI: 10.1038/natrevmats.2017.51

Поступила в редакцию 19 декабря 2022 г.

Принята в доработанном виде 16 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 19 апреля 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Андрей Георгиевич Макаров** — инженер-исследователь; **Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ)**; 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 136; РИНЦ ID: 838183, ResearcherID: HGD-7139-2022, ORCID: 0000-0002-4020-1398; skelpik@gmail.com.

REFERENCES

1. Serov E.N., Labudin B.V. Glued timbering: present state and development problems. *Russian Forestry Journal*. 2013; 2(332):137-146. (rus.).

2. Makarov A.G. Innovative concept for industrial construction: A new generation of frame-panel technology. *Life-Cycle Civil Engineering: Innovation, Theory and Practice*. 2021; 1431-1438. DOI: 10.1201/9780429343292-190

3. Kamar K.A.M., Hamid Z.A., Azman M.N.A., Ahamad M.S.S. Industrialized Building System (IBS): Revisiting Issues of Definition and Classification. *International Journal of Emerging Sciences*. 2011; 1(2):120-132.

4. O'Neill D., Organ S. A literature review of the evolution of British prefabricated low-rise housing. *Structural Survey*. 2016; 34(2):191-214. DOI: 10.1108/SS-08-2015-0037

15. Ramage M.H., Burrridge H., Busse-Wicher M., Fereday G., Reynolds T., Shah D.U. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 68. Pp. 333–359. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.107

16. Barlow J. From craft production to mass customisation. Innovation requirements for the UK House-building Industry // *Housing Studies*. 1999. Vol. 14. Issue 1. Pp. 23–42. DOI: 10.1080/02673039982984

17. Lennartsson M., Elgh F. Exploring product development in industrialized housing to facilitate a platform strategy // 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. 2018. DOI: 10.24928/2018/0283

18. Макаров А.Г. РСТ/РУ 2010/000411 (WO 2011016755). Сборка межэтажных элементов объемного каркаса здания из трех модулей.

19. Макаров А.Г. РСТ/РУ 2010/000411 (WO 2010131995). Совместная сборка межэтажного соединения элементов объемного каркаса здания.

20. Макаров А.Г. 2009129764/03 (RU 02400605). Узел стыка перекрытий пространственного каркаса здания из трех модулей.

21. Bertelsen S. Modularization — a third approach to making construction lean? // 13th International Group for Lean Construction Conference. 2005.

22. Scott D., Cheong M., Li H. Web-based construction information management system // *Construction Economics and Building*. 2012. Vol. 3. Issue 1. Pp. 43–52. DOI: 10.5130/ajceb.v3i1.2910

5. Hashemi A. Review of the UK housing history in relation to system building. *Alam Cipta*. 2013; 6(1):47-58.

6. Gann D.M. Construction as a manufacturing process? Similarities and differences between industrialized housing and car production in Japan. *Construction Management and Economics*. 1996; 14(5):437-450. DOI: 10.1080/014461996373304

7. Lessing J., Stehn L., Ekholm A. Industrialised housing: Definition and categorization of the concept. *13th International Group for Lean Construction Conference*. 2005; 471-480.

8. Fernandez-Solis J.L. The systemic nature of the construction industry. *Architectural Engineering and Design Management*. 2008; 4(1):31-46. DOI: 10.3763/aedm.2008.S807

9. Fernández-Solís J.L., Arch B. *How the Construction Industry does differ from manufacturing?* Texas A&M University College Station, TX, 2009.
10. Azman M.N.A., Ahamad M.S.S., Hus-sin W.M.A. Comparative Study on Prefabrication Construction Process. *International Surveying Research Journal*. 2012; 2(1):45-58.
11. Kovalchuk L.M. Building wooden structures based on mass-produced standard elements. *Woodworking Industry*. 2009; 4:2-3. (rus.).
12. Makarov A.I., Pyatikop A.I. Description and comparative analysis of the innovative construction system. *Woodworking Industry*. 2013; 2-3:32-38. (rus.).
13. Makarov A.G. The problem of industrialization of the branch of wooden construction and bridge structures. *Far East: problems of development of the architectural, construction and road transport complex*. 2016; 15. (rus.).
14. Wimmers G. Wood: a construction material for tall buildings. *Nature Reviews Materials*. 2017; 2(12). DOI: 10.1038/natrevmats.2017.51
15. Ramage M.H., Burrige H., Busse-Wicher M., Fereday G., Reynolds T., Shah D.U. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 68:333-359. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.107
16. Barlow J. From craft production to mass customisation. innovation requirements for the UK House-building Industry. *Housing Studies*. 1999; 14(1):23-42. DOI: 10.1080/02673039982984
17. Lennartsson M., Elgh F. Exploring Product Development in Industrialized Housing to Facilitate a Platform Strategy. *26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 2018. DOI: 10.24928/2018/0283
18. Makarov A.G. PCT/RU 2010/000411 (WO 2011016755). *Assembly for the inter-storey of elements of a three-dimensional building framework comprising three modules*.
19. Makarov A.G. PCT/RU 2010/000411 (WO 2010131995). *Joint assembly of an interfloor connection the elements of a three-dimensional building frame*.
20. Makarov A.G. 2009129764/03 (RU 02400605). *Unit of floor joint of spatial building frame from three modules*.
21. Bertelsen S. Modularization — a third approach to making construction lean? *13th International Group for Lean Construction Conference*. 2005.
22. Scott D., Cheong M., Li H. Web-based construction information management system. *Construction Economics and Building*. 2012; 3(1):43-52. DOI: 10.5130/ajceeb.v3i1.2910

Received December 19, 2022.

Adopted in revised form on March 16, 2023.

Approved for publication on April 19, 2023.

B I O N O T E S: **Andrey G. Makarov** — research engineer; **Pacific National University (PNU)**; 136 Pacific st., Khabarovsk, 680035, Russian Federation; ID RSCI: 838183, ResearcherID: HGD-7139-2022, ORCID: 0000-0002-4020-1398; skelpik@gmail.com.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 004.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.685-696

Численно-аналитическое решение нестационарной задачи теплопроводности с переменными теплофизическими параметрами среды

Владимир Николаевич Сидоров, Алим Махмудович Примкулов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен случай задачи теплопередачи, при котором теплотехническая характеристика среды не является постоянной величиной и зависит от своей температуры. В частности, проанализирована ситуация, когда данная зависимость линейна. В рамках поставленной задачи предложено развитие расчетных соотношений для численно-аналитического решения стационарной и нестационарной задач теплопроводности.

Материалы и методы. Рассматриваемое пространство переведено в математическую модель с использованием метода конечных элементов, в котором учитывается предложенная нелинейность. Решение задачи по временной переменной в нестационарной постановке определяется аналитическим методом, для чего выведены соответствующие расчетные формулы. Полученные нелинейные задачи решены как методом Ньютона, так и методом Пикара.

Результаты. Для проверки предложенных расчетных соотношений решена практическая нестационарная задача на примере многослойной стены. В качестве граничных условий использованы функциональные зависимости. Граничные условия имеют второй род, т.е. в виде производных температур первого порядка. Нелинейная задача решена двумя различными методами, которые дали идентичные результаты. При расчете нелинейных задач этими способами была возможность сравнить эффективность метода Ньютона и метода Пикара для рассматриваемой задачи. Оба метода дали результат при одинаковом количестве итераций. Приведены алгоритмы расчета поставленной задачи. Использовалась расчетная среда MatLab, в которой применены данные алгоритмы.

Выводы. Предложенная методика позволяет решать связанные задачи теплопроводности в многослойных ограждающих конструкциях, в которых связанность физических процессов передается за счет переменной характеристики среды. Принятая в расчете многослойность в более общей постановке задачи означает неоднородность среды, что, в свою очередь, дает возможность решать задачи с большим количеством слоев с различными характеристиками. Расчеты по предложенной методике позволяют с обоснованной достоверностью рассчитывать теплотери через ограждающие конструкции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод конечных элементов, теплопроводность, нелинейная задача, численно-аналитическое решение, стационарная задача, нестационарная задача, алгоритм решения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сидоров В.Н., Примкулов А.М. Численно-аналитическое решение нестационарной задачи теплопроводности с переменными теплофизическими параметрами среды // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С. 685–696. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.685-696

Автор, ответственный за переписку: Алим Махмудович Примкулов, a.primkulov@prodim.ru.

Semi-analytical solution to steady-state and transient heat transfer problem with variable conductivity properties of the domain

Vladimir N. Sidorov, Alim M. Primkulov

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

ABSTRACT

Introduction. Present paper studies the case of heat transfer problem where the conductivity property of the domain is not a constant value but varies depending on its temperature. In particular, a conductivity that linearly dependent on the temperature is reviewed. A semi-analytical formulation is developed and proposed to solve steady-state and transient types of these kinds of heat transfer problems.

Materials and methods. The domain is mathematically modeled by using finite element method where non-linearity property of the problem has been incorporated. For time-dependent (transient) case, the temporal solution has been achieved by analytical methods wherefore all necessary formulation has been derived. Non-linear equations have been solved by both Newton and Picard methods.

Results. In order to proof check, the proposed calculations a wall with three layers has been calculated by using the proposed transient problem formulation. The derivative boundary conditions at the faces of the wall are given as the functions of time. Non-linearity has been solved by two different methods that gave the identical results. Having solved the non-linearity by these two methods, allowed to compare the efficiency of Newton method versus Picard method. Both methods reached the solution with the same number of iterations. The paper proposes the algorithms for solving the problems. The authors have used MatLab environment to implement those algorithms.

Conclusions. Proposed formulation solves coupled heat transfer problems in multi-layered exterior walls. Multi-layered calculation ability allows to cover all non-homogeneous cases of the computation domain. The formulation solves the heat loss problems through the multi-layered walls with due and reliable accuracy.

KEYWORDS: finite element method, heat conduction, non-linear problem, numerical-analytical solution, steady-state problem, non steady-state problem, solution algorithm

FOR CITATION: Sidorov V.N., Primkulov A.M. Semi-analytical solution to steady-state and transient heat transfer problem with variable conductivity properties of the domain. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):685-696. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.685-696 (rus.).

Corresponding author: Alim M. Primkulov, a.primkulov@prodim.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается решение задачи теплопроводности с изменяющимися во времени теплофизическими характеристиками теплопроводящих материалов в зависимости от значений искомой функции температуры. На практике данные изменения наблюдаются в теплопроводящих материалах, например при экстремально высоких перепадах температуры, приводящих к существенным изменениям их теплофизических характеристик. Эти изменения в свойствах материалов могут также происходить под влиянием сопутствующих физических процессов, например, таких как паропроницание, т.е. образование конденсата, который, в свою очередь, аккумулируясь в материале среды, трансформирует ее теплофизические характеристики [1]. Последнее явление может быть численно смоделировано подходами, приведенными в настоящей статье. Рассмотренный подход интересен и тем, что является примером решения прикладной инженерной задачи с использованием численно-аналитических математических методов [2, 3], когда изменение значений искомой функции по одной из переменных определяется аналитически, по другой — численно [4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Общая формулировка задачи

Приведем формулировку и численно-аналитическое решение на примере одномерных в пространстве стационарной и нестационарной задач теплопроводности. Общий вид уравнения, описывающего процесс распространения тепла в одномерном пространстве и времени, имеет следующий вид [5–7]:

$$\nabla(a(x, t)\nabla\varphi) + f(x, t) = \partial\varphi/\partial t, \quad (1)$$

где $a(x, t) = \frac{\lambda(x, t)}{\rho(x, t)c_p(x, t)}$ — теплотехническая

характеристика (температуропроводность) среды; $\lambda(x, t)$, $\rho(x, t)$, $c_p(x, t)$ — соответственно теплопроводность, плотность и теплоемкость материала, кото-

рые могут быть переменными как в пространстве, так и во времени, т.е. характеризовать нестационарную, неоднородную теплопроводящую среду. В составе алгоритма метода конечных элементов (МКЭ) изменение параметра a по пространственной переменной x учитывается в процедуре построения расчетных сеток, т.е. построения расчетной модели, как ансамбля КЭ. В пределах каждого КЭ в линейной задаче значения a считаются постоянными по его локальной координате (далее в обозначениях зависимость a от x опускается); $\Delta\varphi = \partial^2\varphi/\partial x^2$; $\varphi = \varphi(x, t)$ искомая функция температуры; $f(x, t) = w(x, t)/(\rho(x, t)c_p(x, t))$; $w(x, t)$ — удельная мощность (плотность) теплопоступлений/теплопотреблений от тепловых источников; x, t — пространственная и временная переменные; $\partial\varphi/\partial t$ — изменение искомой функции во времени.

Согласно условию поставленной задачи, рассмотрим параметр a , характеризующий теплофизические характеристики среды, зависимым от температуры, т.е. от искомой функции [8]:

$$a = a(\varphi). \quad (2)$$

Тогда уравнение (1) примет следующий вид:

$$\nabla(a(\varphi)\nabla\varphi) + f(x, t) = \partial\varphi/\partial t. \quad (3)$$

Такое уравнение является нелинейным. К примеру, в работе [9] получено решение уравнения (3) методом Галеркина с использованием конечно-элементной аппроксимации.

Метод решения нелинейной связанной задачи теплопроводности методом конечных элементов

Стационарная задача

Стационарная задача является частным случаем уравнения (3), при котором слагаемое $\partial\varphi/\partial t = 0$:

$$\nabla(a(\varphi)\nabla\varphi) + f(x, t) = 0. \quad (4)$$

Решение задачи (4) методом Галеркина сводится к решению следующего уравнения [4]:

$$R = -\int_0^L W(x) (\nabla(a(\varphi)\nabla\varphi) + f(x, t)) dx = 0, \quad (5)$$

где R — остаточная функция; L — длина одномерного пространства, в пределах которого рассматривается задача теплопроводности; $W(x)$ — «взвешивающая» функция, зависящая от x (далее обозначается как W).

В соответствии с алгоритмом МКЭ задача рассматривается в одномерном конечномерном пространстве, обозначим его \mathcal{L} , которое на его отрезке длиной L представляется множеством точек (узлов) с координатами $(x_0), (x_1), (x_2) \dots (x_i) \dots (x_{N+1})$. Узлы делят отрезок L на конечное количество участков (КЭ) $E_1, E_2, E_3, \dots, E_i, \dots, E_N$ с концевыми координатами

$$(x_0, x_1), (x_1, x_2), \\ (x_2, x_3) \dots (x_{i-1}, x_i) \dots (x_N, x_{N+1}),$$

где N — количество элементов в одномерном пространстве (рис. 1).

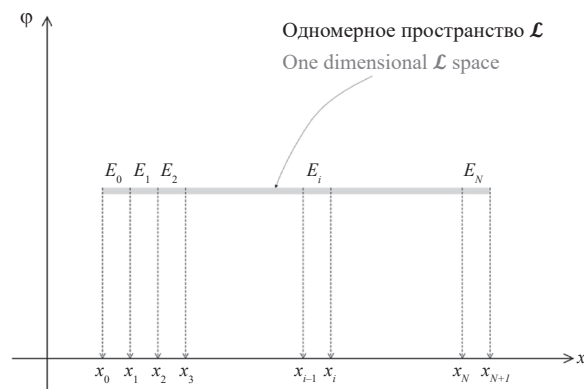


Рис. 1. Деление отрезка L на элементы: N — количество элементов; $E_0, E_1, E_2 \dots E_N$ — конечные элементы с концевыми координатами $(x_0, x_1), (x_1, x_2), (x_2, x_3) \dots (x_N, x_{N+1})$

Fig. 1. Division of segment L into elements: N — number of elements; $E_0, E_1, E_2 \dots E_N$ — finite elements with end coordinates $(x_0, x_1), (x_1, x_2), (x_2, x_3) \dots (x_N, x_{N+1})$

Остаточная функция R , представляющая уравнение (5) и сводящаяся к нулю, состоит из двух слагаемых:

$$-\int_0^L W \nabla (a(\varphi) \nabla \varphi) dx - \int_0^L W f(x, t) dx = 0, \quad (6)$$

а в пределах произвольного элемента E_e дискретного пространства \mathcal{L} :

$$R^{(e)} = - \int_{x_i}^{x_{i+1}} W^{(e)} \nabla (a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}) dx - \\ - \int_{x_i}^{x_{i+1}} W^{(e)} f^{(e)}(x, t) dx = 0, \quad (7)$$

где верхний индекс (e) обозначает соответствующую функцию в пределах элемента E_e . Для случая, когда в пределах элемента E_e дискретного пространства \mathcal{L} изменение функций W, f, φ в направлении ор-

динаты x линейно, второе слагаемое интеграла (7) принимает следующий вид [10]:

$$\{f^{(e)}\} = \frac{f^{(e)}(x, t)}{2} \left\{ \frac{L^{(e)}}{L^{(e)}} \right\}, \quad (8)$$

где $L^{(e)}$ — длина элемента E_e .

Следует отметить, что второе слагаемое присутствует в формуле (7) при наличии источников тепла, выделяющих (или поглощающих) тепловую энергию внутри элементов. Рекомендуется размещать в местах действия таких источников (потребителей) тепла узлы, в этом случае функция $f(x, t)$ будет участвовать в уравнении (4) в качестве свободного слагаемого.

Первый интеграл в выражении (7) требует отдельного рассмотрения:

$$- \int_{x_i}^{x_{i+1}} W_i^{(e)} \nabla (a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}) dx = \\ = - \int_{x_i}^{x_{i+1}} W_i^{(e)} \nabla a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} dx - \\ - \int_{x_i}^{x_{i+1}} W_i^{(e)} a(\varphi) \Delta \varphi^{(e)} dx. \quad (9)$$

Второй член правой части выражения (9) вычислим интегрированием по частям:

$$\nabla (W_i^{(e)} a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}) = \nabla (a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}) W_i^{(e)} + \\ + \nabla W_i^{(e)} (a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}) = \nabla a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} W_i^{(e)} + \\ + W_i^{(e)} a(\varphi) \Delta \varphi^{(e)} + \nabla W_i^{(e)} (a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)})$$

или

$$W_i^{(e)} a(\varphi) \Delta \varphi^{(e)} = \nabla (W_i^{(e)} a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}) - \\ - \nabla a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} W_i^{(e)} - \nabla W_i^{(e)} (a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}). \quad (10)$$

Тогда он примет вид:

$$- \int_{x_i}^{x_{i+1}} W_i^{(e)} a(\varphi) \Delta \varphi^{(e)} dx = \int_{x_i}^{x_{i+1}} - \left(\nabla (W_i^{(e)} a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}) - \right. \\ \left. - \nabla a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} W_i^{(e)} - \nabla W_i^{(e)} (a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}) \right) dx; \quad (11)$$

$$- \int_{x_i}^{x_{i+1}} W_i^{(e)} a(\varphi) \Delta \varphi^{(e)} dx = - W_i^{(e)} a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} \Big|_{x_i}^{x_{i+1}} + \\ + \int_{x_i}^{x_{i+1}} \nabla a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} W_i^{(e)} dx + \int_{x_i}^{x_{i+1}} \nabla W_i^{(e)} a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} dx. \quad (12)$$

Первое слагаемое правой части формулы (12), как правило, игнорируется или используется для задания граничных условий второго рода в виде первой производной от функции φ . Если мы также ее опустим, тогда выражение (9) примет вид:

$$\begin{aligned}
& - \int_{x_i}^{x_{i+1}} W_i^{(e)} \nabla (a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}) dx \cong \\
& \cong - \int_{x_i}^{x_{i+1}} W_i^{(e)} \nabla a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} dx + \\
& + \int_{x_i}^{x_{i+1}} \nabla a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} W_i^{(e)} dx + \int_{x_i}^{x_{i+1}} \nabla W_i^{(e)} a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} dx
\end{aligned}$$

или

$$- \int_{x_i}^{x_{i+1}} W_i^{(e)} \nabla (a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}) dx \cong \int_{x_i}^{x_{i+1}} \nabla W_i^{(e)} a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} dx. \quad (13)$$

Для вычисления интеграла правой части формулы (13) необходимо определить зависимость между функцией a и искомой φ . Предположим, что в пределах элемента E_e данная зависимость линейна и имеет следующий вид:

$$a^{(e)}(\varphi) = a_k^{(e)} \varphi + a_f^{(e)}, \quad (14)$$

где $a_k^{(e)}$, $a_f^{(e)}$ — некие постоянные. Следуя алгоритму МКЭ [4], запишем:

$$W_i^{(e)} = \begin{bmatrix} x_{i+1} - x & x - x_i \\ x_{i+1} - x_i & x_{i+1} - x_i \end{bmatrix} \{1 \ 0\}^T; \quad (15)$$

$$W_{i+1}^{(e)} = \begin{bmatrix} x_{i+1} - x & x - x_i \\ x_{i+1} - x_i & x_{i+1} - x_i \end{bmatrix} \{0 \ 1\}^T; \quad (16)$$

$$\frac{\partial W_i^{(e)}}{\partial x} = -\frac{1}{L^{(e)}}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial W_{i+1}^{(e)}}{\partial x} = \frac{1}{L^{(e)}}; \quad (18)$$

$$\frac{\partial \varphi^{(e)}}{\partial x} = \left[\frac{-1}{L^{(e)}} \ \frac{1}{L^{(e)}} \right] \{\varphi_i \ \varphi_{i+1}\}^T. \quad (19)$$

Используем формулы (15)–(19) для вычисления интегралов в выражении (13):

$$\begin{aligned}
& \int_{x_i}^{x_{i+1}} \nabla W_i^{(e)} a^{(e)}(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} dx = -\frac{1}{(L^{(e)})^2} (-\varphi_i + \varphi_{i+1}) \times \\
& \times \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(a_k^{(e)} \frac{x_{i+1} - x}{L^{(e)}} \varphi_i + a_k^{(e)} \frac{x - x_i}{L^{(e)}} \varphi_{i+1} + a_f^{(e)} \right) dx = \\
& = \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \varphi_i^2 - \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \varphi_{i+1}^2 + \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \varphi_i - \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \varphi_{i+1}.
\end{aligned} \quad (20)$$

Подставим формулу (20) в выражение (13):

$$\begin{aligned}
& - \int_{x_i}^{x_{i+1}} W_i^{(e)} \nabla (a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}) dx \cong \left(\frac{a_k^{(e)}}{L^{(e)}} \varphi_i + \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \right) \varphi_i - \\
& - \left(\frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \varphi_{i+1} + \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \right) \varphi_{i+1}.
\end{aligned} \quad (21)$$

Аналогичным образом вычисляем интеграл для функции $W_{i+1}^{(e)}$:

$$\begin{aligned}
& - \int_{x_i}^{x_{i+1}} W_{i+1}^{(e)} a^{(e)}(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} dx \cong - \left(\frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \varphi_i + \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \right) \varphi_i + \\
& + \left(\frac{a_k^{(e)}}{L^{(e)}} \varphi_{i+1} + \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \right) \varphi_{i+1}.
\end{aligned} \quad (22)$$

Представим выражения (21) и (22) в матричной форме:

$$\begin{aligned}
& - \int_{x_i}^{x_{i+1}} W^{(e)} \nabla (a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)}) dx \cong \\
& \cong \begin{bmatrix} \frac{a_k^{(e)}}{L^{(e)}} \varphi_i + \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} - \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \varphi_{i+1} - \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \\ - \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \varphi_i - \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \ \frac{a_k^{(e)}}{L^{(e)}} \varphi_{i+1} + \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_{i+1} \end{Bmatrix}.
\end{aligned} \quad (23)$$

Итоговая матричная запись остаточной функции для отдельного элемента пространства \mathcal{L} с учетом выражений (8) и (23):

$$R^{(e)} = [K_a^{(e)}(\varphi)] \begin{Bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_{i+1} \end{Bmatrix} - \frac{f^{(e)}(x, t)}{2} \begin{Bmatrix} L^{(e)} \\ L^{(e)} \end{Bmatrix}, \quad (24)$$

где

$$[K_a^{(e)}(\varphi)] = \begin{bmatrix} \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \varphi_i + \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} - \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \varphi_{i+1} - \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \\ - \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \varphi_i - \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \ \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \varphi_{i+1} + \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \end{bmatrix} \quad (25)$$

является нелинейной матрицей теплопроводности для элемента E_e с концевыми координатами (x_i, x_{i+1}) .

При $a_k = 0$ формула (25) принимает вид, как для линейного одномерного элемента [4]:

$$[K_a^{(e)}] = \begin{bmatrix} \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} - \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \\ - \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \ \frac{a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

И остаточная функция для концевых узлов элемента E_e принимает вид:

$$\begin{Bmatrix} R_i^{(e)} \\ R_{i+1}^{(e)} \end{Bmatrix} = [K_a^{(e)}(\varphi)] \begin{Bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_{i+1} \end{Bmatrix} - \{f^{(e)}\}. \quad (27)$$

Для быстрой сходимости решения нелинейной задачи важно принять значения распределения температуры на отрезке L в первом приближении максимально близкими к точному решению. В предложенных алгоритмах данные значения рекомендуется принять по результатам, получаемым при решении линейной стационарной задачи теплопроводности, т.е. используя только выражение (26) для формирования матрицы теплопроводности.

Построение глобальной матрицы теплопроводности

Формирование глобальной матрицы в нелинейной стационарной задаче для ансамбля КЭ пространства \mathcal{L} осуществляется так же, как и для линейной задачи.

Используя матричное представление:

$$\left\{ \begin{matrix} R_0^{(1)} \\ R_1^{(1)} + R_1^{(2)} \\ R_2^{(2)} + R_2^{(3)} \\ \vdots \\ R_i^{(e)} + R_i^{(e+1)} \\ \vdots \\ R_{N+1}^{(N)} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{matrix} \right\}, \quad (28)$$

уравнение (4) может быть представлено в виде системы нелинейных алгебраических уравнений, образуемой при приравнивании остаточной функции к нулю, которая в матричной форме может быть представлена в следующем виде:

$$[K_a(\Phi)]\{\Phi\} - \{F\} = \{0\}. \quad (29)$$

Нестационарная задача

Уравнение теплопроводности в одномерном пространстве для нестационарной задачи (3) отличается от стационарной (4) наличием составляющей, учитывающей изменение искомой функции температуры во времени, и которая не равна нулю $\partial\varphi/\partial t \neq 0$.

Для получения общего решения перепишем уравнение (3) в следующем виде:

$$\nabla(a(\varphi)\nabla\varphi) + f(x, t) = \lambda \frac{\partial\varphi}{\partial t}, \quad (30)$$

где λ — некий коэффициент, который иногда называют коэффициентом замедления. Действительно, при переносе его в левую сторону уравнения он становится делителем для a , тем самым «замедляя» передачу тепла.

По аналогии с уравнением (5) запишем выражение (30) в интегральном виде для решения методом Галеркина:

$$R = -\int_0^L W(x) \left(\nabla(a(\varphi)\nabla\varphi) + f(x, t) - \lambda \frac{\partial\varphi}{\partial t} \right) dx = 0. \quad (31)$$

В данном выражении (31) дополнительно появляется слагаемое:

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} W_i^{(e)} \lambda \frac{\partial\varphi}{\partial t} dx. \quad (32)$$

Ниже приведена матричная форма вычисления интеграла (32), основанная на технике МКЭ [10]:

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} W^{(e)} \lambda \frac{\partial\varphi}{\partial t} dx = \lambda \begin{bmatrix} \frac{L^{(e)}}{3} & \frac{L^{(e)}}{6} \\ \frac{L^{(e)}}{6} & \frac{L^{(e)}}{3} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} \frac{\partial\varphi_i}{\partial t} \\ \frac{\partial\varphi_{i+1}}{\partial t} \end{matrix} \right\} = [k_\lambda^{(e)}] \left\{ \begin{matrix} \dot{\varphi}_i \\ \dot{\varphi}_{i+1} \end{matrix} \right\}, \quad (33)$$

где $[k_\lambda^{(e)}]$ — матрица констант; $\left\{ \begin{matrix} \dot{\varphi}_i \\ \dot{\varphi}_{i+1} \end{matrix} \right\}$ — вектор первых производных по времени в концевых узлах элемента E_e .

Добавим выражение (33) в уравнение (27):

$$\left\{ \begin{matrix} R_i^{(e)} \\ R_{i+1}^{(e)} \end{matrix} \right\} = [K_a^{(e)}(\Phi)] \left\{ \begin{matrix} \varphi_i \\ \varphi_{i+1} \end{matrix} \right\} - \{f^{(e)}\} + [k_\lambda^{(e)}] \left\{ \begin{matrix} \dot{\varphi}_i \\ \dot{\varphi}_{i+1} \end{matrix} \right\}. \quad (34)$$

Используя принцип, описанный в разделе «Построение глобальной матрицы теплопроводности», формируем глобальную матрицу теплопроводности и полученные уравнения для остаточных функций приравниваем нулю:

$$\{R\} = [K_a(\Phi)]\{\Phi\} - \{F\} + [K_\lambda]\{\dot{\Phi}\} = \{0\} \quad (35)$$

или

$$\{\dot{\Phi}\} = [C_a(\Phi)]\{\Phi\} + \{F\}, \quad (36)$$

где

$$[C_a(\Phi)] = -[K_\lambda]^{-1}[K_a(\Phi)]; \quad (37)$$

$$\{F\} = -[K_\lambda]^{-1}\{F\}. \quad (38)$$

Матричное уравнение (36) представляет собой дискретный аналог системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка.

Решение системы нелинейных уравнений методом Ньютона

Стационарная задача

Как было показано выше, стационарная задача теплопроводности с нелинейными характеристиками теплопроводящей среды может быть представлена в матричном виде системой уравнений (29). Данная система состоит из нелинейных алгебраических уравнений второй степени. Для ее решения применим метод Ньютона [11], представленный в известной матричной форме метода Ньютона – Рафсона [9].

Суть метода состоит в последовательном приближении к точному решению системы с использованием так называемой касательной матрицы (матрицы Якоби).

Представим уравнение (29) в следующем виде:

$$\{K(\Phi)\} = \{F\}, \quad (39)$$

где

$$\{K(\Phi)\} = [K_a(\Phi)]\{\Phi\}. \quad (40)$$

Если в первом приближении значения элементов вектора узловых значений температуры $\{\Phi\}$ принять равными:

$$\{\Phi^{(1)}\} = \{\Phi_1^{(1)} \quad \Phi_2^{(1)} \quad \Phi_3^{(1)} \quad \dots \quad \Phi_{N+1}^{(1)}\}^T, \quad (41)$$

где индекс $\langle 1 \rangle$ — номер итерации (приближения)

метода Ньютона – Рафсона, в данном случае первой.

Тогда во втором приближении значения искомого вектора $\{\Phi^{(2)}\}$ могут быть вычислены следующим образом:

$$\{K(\Phi^{(2)})\} \approx \{K(\Phi^{(1)})\} + [K_T^{(1)}]\{\Delta\Phi^{(1)}\} = \{F\}, \quad (42)$$

где $[K_T^{(1)}]$ — глобальная касательная матрица или матрица Якоби, построенная на первом шаге итерации:

$$[K_T^{(1)}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial K_1(\{\Phi^{(1)}\})}{\partial \Phi_1} & \frac{\partial K_1(\{\Phi^{(1)}\})}{\partial \Phi_2} & \frac{\partial K_1(\{\Phi^{(1)}\})}{\partial \Phi_{N+1}} \\ \frac{\partial K_2(\{\Phi^{(1)}\})}{\partial \Phi_1} & \frac{\partial K_2(\{\Phi^{(1)}\})}{\partial \Phi_2} & \dots & \frac{\partial K_2(\{\Phi^{(1)}\})}{\partial \Phi_{N+1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial K_{N+1}(\{\Phi^{(1)}\})}{\partial \Phi_1} & \frac{\partial K_{N+1}(\{\Phi^{(1)}\})}{\partial \Phi_2} & \dots & \frac{\partial K_{N+1}(\{\Phi^{(1)}\})}{\partial \Phi_{N+1}} \end{bmatrix}. \quad (43)$$

При этом корректировка к первому приближению может быть вычислена из выражения (42) по матричной формуле:

$$\{\Delta\Phi^{(1)}\} = \{K_T^{(1)}\}^{-1} (\{F\} - \{K(\Phi^{(1)})\}). \quad (44)$$

Тогда значения искомого вектора $\{\Phi\}$ во втором приближении:

$$\{\Phi^{(2)}\} = \{\Phi^{(1)}\} + \{\Delta\Phi^{(1)}\} \quad (45)$$

или в более общей записи (в i -м приближении):

$$\{\Phi^{(i+1)}\} = \{\Phi^{(i)}\} + \{\Delta\Phi^{(i)}\}. \quad (46)$$

Итерационные вычисления продолжим до тех пор, пока получаемые значения корректировок вектора $\{\Phi^{(i+1)}\}$ в относительном выражении продолжают превышать величину допустимой ошибки. Относительная корректировка или относительная ошибка может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\varepsilon_{\text{отн}}^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{N+1} (\Delta\Phi_j^{(i)})^2}{1 + \sum_{j=1}^{N+1} (\Phi_j^{(i)})^2} = \frac{\|\Delta\Phi^{(i)}\|}{1 + \|\Phi^{(i)}\|}. \quad (47)$$

Очевидно, ошибка на текущей i -й итерации вычисляется как сумма квадратов приращений $\{\Delta\Phi^{(i)}\}$ в этой итерации, отнесенная к сумме квадратов значений вектора $\{\Phi^{(i)}\}$ в этой итерации. Единица в знаменателе (47) добавлена во избежание возможного деления на ноль. После каждого приближения по выражению (47) вычисляется ошибка $\varepsilon_{\text{отн}}$ и, когда она не превышает установленный лимит, расчет можно считать выполненным.

Теперь рассмотрим глобальную касательную матрицу более детально. Для ее определения про-

дифференцируем формулу (25) по выражению (43), получим касательную матрицу для отдельного элемента:

$$\frac{d[K_a^{(e)}(\varphi)]}{d\varphi} = \begin{bmatrix} \frac{a_k^{(e)}\varphi_i + a_f^{(e)}}{L^{(e)}} & -\frac{a_k^{(e)}\varphi_{i+1} + a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \\ -\frac{a_k^{(e)}\varphi_i + a_f^{(e)}}{L^{(e)}} & \frac{a_k^{(e)}\varphi_i + a_f^{(e)}}{L^{(e)}} \end{bmatrix}. \quad (48)$$

Используя путь, описанный в разделе «Построение глобальной матрицы теплопроводности», а также выражение (48), можно формировать глобальную касательную матрицу $[K_T^{(i)}]$. Как видно из формулы (48), она зависит от значений функций. Это означает, что, например, выражение (44) может быть написано в следующем виде:

$$\{\Delta\Phi^{(i)}\} = [K_T(\Phi^{(i)})]^{-1} (\{F\} - \{K(\Phi^{(i)})\}) \quad (49)$$

или в общем виде:

$$\{\Delta\Phi^{(i)}\} = [K_T(\Phi^{(i)})]^{-1} (\{F\} - \{K(\Phi^{(i)})\}). \quad (50)$$

Алгоритм решения стационарной задачи

Предлагаемый алгоритм решения стационарной одномерной задачи теплопроводности с переменным коэффициентом теплопроводности, описываемым уравнением (4), следующий.

Шаг 1. Одномерное пространство L , в котором решается задача, представляется конечным множеством точек (узлов), делящих отрезок L теплопроводящей среды на N -е количество элементов. В результате получаем расчетную модель, собранную из N элементов, каждый из них со своей длиной $L^{(e)}$, координатой начала элемента x_i и координатой его конца x_{i+1} .

Шаг 2. Для каждого элемента в матричном виде вычисляются функции теплопроводности (25), вектор (8), характеризующий влияние возможного источника тепла. Также строятся матрицы теплопроводности (26) для определения узловых значений температуры на первом приближении.

Шаг 3. Используя методику, изложенную в разделе «Построение глобальной матрицы теплопроводности», все матрицы и векторы элементов собираются в глобальные (26) для расчетной модели.

Шаг 4. Значения температуры на первом приближении для быстрой сходимости метода Ньютона – Рафсена рекомендуется принять по результатам решения стационарной линейной задачи теплопроводности с постоянными значениями элементов матрицы теплопроводности (26). Для этого необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений:

$$[K_D]\{\Phi\} - \{F\} = \{0\}, \quad (51)$$

где $[K_D]$ — глобальная матрица теплопроводности, построенная по формуле (26), вектор $\{F\}$ принимается как и в выражении (29).

Шаг 5. По вычисленным значениям температуры определяются матрицы теплопроводности (25) и касательные матрицы элементов (48), которые собираются в глобальные матрицы по методике, изложенной в разделе «Построение глобальной матрицы теплопроводности». По матричной формуле (50) устанавливается корректировка узловых значений температуры $\{\Delta\Phi^{(i)}\}$ на текущем i -м приближении.

Шаг 6. По формуле (46) корректируется вектор узловых значений температуры.

Шаг 7. С помощью выражения (47) рассчитывается ошибка и сравнивается с допустимым значением. Если ошибка на очередном итерационном шаге становится менее ее установленного допустимого значения, расчет считается законченным, если превышает, то с уточненными узловыми значениями температуры возвращаемся к шагу 5.

Нестационарная задача

Матрица $[C_a(\Phi)]$ в матричном уравнении (36) нелинейная. Если бы данная матрица не была зависима от Φ , уравнение (38) имело бы вид:

$$\{\dot{\Phi}\} = [C_a]\{\Phi\} + \{F\}, \quad (52)$$

можно было бы использовать аналитическое решение этой системы уравнений [4, 12–14]:

$$\{\Phi(t)\} = e^{[C_a]t} \{\Phi_0\} + \int_0^t e^{[C_a](t-\zeta)} \{F(\zeta)\} d\zeta, \quad (53)$$

где $\{\Phi_0\}$ — начальные значения искомой функции в узлах элементов в момент $t = 0$.

Предположим, что у нас есть значения искомого вектора в первом приближении $\{\Phi^{(1)}\}$ для задан-

ного момента времени $t = t_d$, тогда выражение (53) можно представить в следующем виде:

$$R(\{\Phi^{(1)}\}) = e^{[C_a(\{\Phi^{(1)}\})]t_d} \{\Phi_0\} + \int_0^{t_d} e^{[C_a(\{\Phi^{(1)}\})](t_d-\zeta)} \{F(\zeta)\} d\zeta - \{\Phi^{(1)}\} \equiv \{0\}, \quad (54)$$

при котором остаточная функция $R(\{\Phi^{(1)}\})$, вероятнее всего, не будет равна нулю. Необходимо найти такие значения элементов вектора $\{\Phi^{(i)}\}$, при которых выражение (54) стало бы тождеством. По аналогии со стационарной задачей можем утверждать [15, 16], что:

$$R(\{\Phi^{(i+1)}\}) = R(\{\Phi^{(i)}\}) + R_T(\{\Phi^{(i)}\})\{\Delta\Phi^{(i)}\}, \quad (55)$$

где $R(\{\Phi^{(i+1)}\})$, $R(\{\Phi^{(i)}\})$ — значения функции (54) для соответственно $i+1$ -го и i -го приближений; $R_T(\{\Phi^{(i)}\})$ — глобальная касательная матрица для i -го приближения; $\{\Delta\Phi^{(i)}\}$ — корректировка принятых значений для i -го приближения.

Предполагая для выражения (55) $R(\{\Phi^{(i+1)}\}) \equiv \{0\}$, получим следующее выражение для расчета корректировки $\{\Delta\Phi^{(i)}\}$:

$$\{\Delta\Phi^{(i)}\} = -R_T(\{\Phi^{(i)}\})^{-1} R(\{\Phi^{(i)}\}). \quad (56)$$

Касательная матрица на i -м шаге итерации по аналогии со стационарной задачей может быть вычислена следующим образом:

$$R_T(\{\Phi^{(i)}\}) = \frac{d}{d\{\Phi\}} (R(\{\Phi^{(i)}\})), \quad (57)$$

или

$$R_T(\{\Phi^{(i)}\}) = \frac{d}{d\{\Phi\}} \left(e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})]t_d} \{\Phi_0\} + \int_0^{t_d} e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})](t_d-\zeta)} \{F(\zeta)\} d\zeta - \{\Phi^{(i)}\} \right). \quad (58)$$

Продифференцируем правую сторону уравнения (58) по $\{\Phi\}$. Сначала:

$$\frac{d}{d\{\Phi\}} \left(e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})]t_d} \{\Phi_0\} \right). \quad (59)$$

Для вычисления формулы (59) разложим функцию $e^{[C_a]t_d}$ в ряд Тейлора:

$$e^{[C_a]t_d} = [I] + [C_a]t_d + \frac{t_d^2 [C_a]^2}{2!} + \frac{t_d^3 [C_a]^3}{3!} + \frac{t_d^4 [C_a]^4}{4!} + \dots, \quad (60)$$

тогда

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{d\{\Phi\}} \left(e^{[C_a]t_d} \right) &= \frac{d[C_a]}{d\{\Phi\}} t_d + \\
 &+ [C_a]^2 \frac{d[C_a]}{d\{\Phi\}} \frac{2t_d^3}{2!} + \\
 &+ [C_a]^3 \frac{d[C_a]}{d\{\Phi\}} \frac{3t_d^4}{3!} + \dots = \\
 &= t_d \left([I] + [C_a]t_d + \frac{t_d^2 [C_a]^2}{2!} + \right. \\
 &\left. + \frac{t_d^3 [C_a]^3}{3!} + \frac{t_d^4 [C_a]^4}{4!} + \dots \right) \frac{d[C_a]}{d\{\Phi\}} = \\
 &= t_d \left(e^{[C_a]t_d} \right) \frac{d[C_a]}{d\{\Phi\}},
 \end{aligned} \quad (61)$$

в этом случае

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{d\{\Phi\}} \left(e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})]t_d} \{\Phi_0\} \right) &= \\
 &= t_d e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})]t_d} \frac{d[C_a]}{d\{\Phi\}} \{\Phi_0\}.
 \end{aligned} \quad (62)$$

По аналогии вычислим производную второго слагаемого правой части выражения (61):

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{d\{\Phi\}} \left(\int_0^{t_d} e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})](t_d-\zeta)} \{F(\zeta)\} d\zeta \right) &= \\
 &= \int_0^{t_d} (t_d - \zeta) e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})](t_d-\zeta)} \frac{d[C_a]}{d\{\Phi\}} \{F(\zeta)\} d\zeta.
 \end{aligned} \quad (63)$$

Дифференциал третьего члена $R(\{\Phi^{(i)}\})$ в формуле (58):

$$\frac{d}{d\{\Phi\}} (\{\Phi^{(i)}\}) = [I], \quad (64)$$

где $[I]$ — единичная матрица.

Теперь вычислим $\frac{d[C_a]}{d\{\Phi\}} \{\Phi_0\}$. Согласно выражению (37) с учетом формулы (25) в глобальных матрицах можем написать:

$$[C_a(\Phi)] = -[K_\lambda]^{-1} [K_a(\Phi)]. \quad (65)$$

В этом случае:

$$\begin{aligned}
 \frac{d[C_a]}{d\{\Phi\}} \{\Phi_0\} &= \frac{d}{d\{\Phi\}} \left(-[K_\lambda]^{-1} [K_a(\Phi)] \{\Phi_0\} \right) = \\
 &= [K_\lambda]^{-1} \frac{d}{d\{\Phi\}} ([K_a(\Phi)] \{\Phi_0\}).
 \end{aligned} \quad (66)$$

Для отдельного элемента:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{d\{\Phi\}} ([K_a^{(e)}(\Phi)] \{\Phi_0^{(e)}\}) &= \\
 &= \left[\begin{array}{cc} \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} - \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \\ -\frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} & \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \end{array} \right] \cdot \left\{ \begin{array}{c} \Phi_{i_0} \\ \Phi_{i+1_0} \end{array} \right\} = [K_T^{(e)}] \cdot \{\Phi_0^{(e)}\},
 \end{aligned} \quad (67)$$

где

$$[K_T^{(e)}] = \left[\begin{array}{cc} \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} & -\frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \\ -\frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} & \frac{a_k^{(e)}}{2L^{(e)}} \end{array} \right]. \quad (68)$$

Учитывая формулу (33), можем вычислять для каждого элемента матрицу $[K_\lambda^{(e)}]$ и соответственно касательную матрицу. Далее по методике, изложенной в разделе «Построение глобальной матрицы теплопроводности», остается собрать их в глобальные касательную матрицу и матрицу $[K_\lambda]$ и вычислить производную $d[C_a]/d\{\Phi\}$:

$$d[C_a]/d\{\Phi\} = [K_\lambda]^{-1} [K_T]. \quad (69)$$

Подставляя полученные выражения (62)–(64) и (69) в (58), получим расчетную формулу для вычисления элементов касательной матрицы нестационарной нелинейной задачи:

$$\begin{aligned}
 R_T(\{\Phi^{(i)}\}) &= t_d e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})]t_d} [K_\lambda]^{-1} [K_T] \cdot [\Phi_0] + \\
 &+ \int_0^{t_d} (t_d - \zeta) e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})](t_d-\zeta)} [K_\lambda]^{-1} [K_T] \cdot [F(\zeta)] d\zeta - [I].
 \end{aligned} \quad (70)$$

Алгоритм решения нестационарной задачи

Предлагаемый алгоритм на примере решения одномерной нестационарной задачи теплопроводности с переменным коэффициентом температуропроводности, описываемым уравнением (3) или в более полном виде, следующий:

$$\nabla(a(\varphi)\nabla\varphi) + f(x, t) = \lambda \frac{\partial\varphi}{\partial t}. \quad (71)$$

Шаг 1. Задача формулируется в одномерном пространстве \mathcal{L} , на отрезке длиной L , в конечном количестве точек (узлов) конечно-элементной сетки. Узлы делят рассматриваемый отрезок L теплопроводящей среды на N -е количество элементов. Таким образом, расчетная модель собрана из N КЭ, каждый из них со своей длиной $L^{(e)}$, координатой начала элемента x_i и координатой его конца x_{i+1} , где i — здесь порядковый номер узла КЭ.

Шаг 2. Для каждого элемента вычисляются матрица теплопроводности (25), вектор воздействий источников тепла (8) и касательная матрица (68).

Шаг 3. Используя методику, приведенную в разделе «Построение глобальной матрицы теплопроводности», полученные матрицы и векторы ансамбля КЭ собираются в глобальные матрицы и векторы расчетной модели (28). С использованием выражений (37) и (38) вычисляются матричные функции $[C_a(\Phi)]$, $\{F\}$.

Шаг 4. Значения температуры для момента времени $t = t_d$ в первом приближении $\{\Phi^{(i)}\}$ рекомендуется принять по результатам решения линейной нестационарной задачи теплопроводности с постоянными значениями параметров теплопроводности с использованием формул (26) и (53).

Шаг 5. Вычисляются касательная матрица $R_T(\{\Phi^{(i)}\})$ по формуле (70) и функция $R(\{\Phi^{(i)}\})$ по выражению (54) или (72) с использованием значений $\{\Phi^{(i)}\}$:

$$R(\{\Phi^{(i)}\}) = e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})]t_d} \{\Phi_0\} + \int_0^{t_d} e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})](t_d-\zeta)} \{F(\zeta)\} d\zeta - \{\Phi^{(i)}\}. \quad (72)$$

Шаг 6. С помощью формулы (56) рассчитывается корректировка значений температур.

Шаг 7. По формуле (47) вычисляется ошибка, которая сравнивается с допустимым значением. Если ошибка менее установленного допустимого значения, расчет считается завершенным, если ошибка еще превышает допустимое значение, тогда с уточненными узловыми значениями температуры матричной операции (56) возвращаемся к шагу 5.

Решение системы нелинейных уравнений методом Пикара

Альтернативно методу Ньютона для решения системы нелинейных уравнений (29) стационарной задачи и выражения (54) нестационарной задачи можно использовать метод Пикара, описанный в работах [9, 17]. Данный метод предполагает последовательно подставлять каждое предыдущее значение искомой функции в соответствующее уравнение, тем самым линеаризировать его для расчета следующего приближения, т.е. для стационарной задачи используется численное решение:

$$[K_a(\Phi^{(i)})]\{\Phi^{(i+1)}\} - \{F\} = \{0\}; \quad (73)$$

для нестационарной задачи используется аналитическое решение:

$$\{\Phi^{(i+1)}\} = e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})]t_d} \{\Phi_0\} + \int_0^{t_d} e^{[C_a(\{\Phi^{(i)}\})](t_d-\zeta)} \{F(\zeta)\} d\zeta. \quad (74)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Авторы статьи с использованием предложенных формул разработали расчетную программу в среде MatLab, в которой реализовали вышеприведенные алгоритмы расчета и получили положительные результаты. Так, на рис. 2 показаны результаты расчета многослойной стены со следующими переменными характеристиками теплопроводности в Вт/(м·°C):

- кирпичная стена:

$$a = -0,0001\varphi + 2,5000; \quad (75)$$

- утеплитель:

$$a = -0,0109\varphi + 0,3268. \quad (76)$$

Обе зависимости (75), (76) подразумевают уменьшение теплопроводности с повышением температуры и увеличение при понижении температуры. Прочие исходные данные, использованные в расчете, следующие:

- толщина внутреннего кирпичного слоя: 0,167 м;
- толщина внешнего кирпичного слоя: 0,167 м;
- толщина утеплителя: 0,166 м.

Изменение по времени t температуры воздуха внутри помещения, с которой контактирует внутренний кирпичный слой стены, °C:

$$T_{\text{вн}}(t) = 20 + 2 \sin\left(\frac{t}{12}\pi\right). \quad (77)$$

Изменение по времени t температуры воздуха снаружи, с которой контактирует внешний кирпичный слой стены, °C:

$$T_{\text{нп}}(t) = -20 + 5 \cos\left(\frac{t}{12}\pi\right). \quad (78)$$

Граничные условия второго рода в модель включаются согласно закону Ньютона [18]:

$$-a(\varphi) \frac{d\varphi}{dx} = h(T_{\text{вн}}(t) - \Phi_1), \quad (79)$$

где Φ_1 — температура в первом узле отрезка L , находящемся на внутренней поверхности стены:

$$-a(\varphi) \frac{d\varphi}{dx} = h(\Phi_{N+1} - T_{\text{нп}}(t)), \quad (80)$$

где Φ_{N+1} — температура в $N+1$ -м узле пространства отрезка L , находящемся на внешней (уличной) поверхности стены. Коэффициент конвекционной теплоотдачи h как для внутренней, так и наружной поверхности стены $h = 0,8$ Вт/(м²·°C).

Включение выражений (79) и (80) в состав конечно-элементной модели выполняется с использованием опущенного в формуле (12) члена. Действие теплового потока происходит на первый узел, где модель контактирует с внутренней средой, заданной формулой (77), и на последний узел,

где модель контактирует с наружной средой, заданной в выражении (78). Соответственно в первое и последнее уравнение системы (35) необходимо добавить следующие члены.

В первое уравнение (соответствующее узлу 1) с учетом выражений (15) и (79):

$$\begin{aligned} -W_1^{(1)} a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} \Big|_{x_1}^{x_2} &= -W_1^{(1)} a(\varphi) \frac{d\varphi^{(1)}}{dx} \Big|_{x_1}^{x_2} = \\ &= \frac{1}{L^{(1)}} (x_2 - x_1) h (T_{\text{вн}}(t) - \Phi_1) \Big|_{x_1}^{x_2} = -h T_{\text{вн}}(t) + h \Phi_1 \end{aligned} \quad (81)$$

или

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} h & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -h T_{\text{вн}}(t) \\ 0 \end{Bmatrix} &= \\ &= \begin{bmatrix} K_{BC}^{(1)} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{BC}^{(1)} \\ 0 \end{Bmatrix}, \end{aligned} \quad (82)$$

где $\begin{bmatrix} K_{BC}^{(1)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ — дополнительная матрица элемента E_1 , учитывающая влияние внутренней температуры, добавляется к матрице теплопроводности $\begin{bmatrix} K_a^{(1)} \end{bmatrix}$; $\begin{Bmatrix} F_{BC}^{(1)} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -h T_{\text{вн}}(t) \\ 0 \end{Bmatrix}$ — дополнительный вектор теплового источника элемента E_1 , учитывающий влияние внутренней температуры. Добавляется к вектору $\{f^{(1)}\}$.

Аналогично рассчитываем дополнительные компоненты последнего узла модели:

$$\begin{aligned} -W_{N+1}^{(N)} a(\varphi) \nabla \varphi^{(e)} \Big|_{x_N}^{x_{N+1}} &= -W_{N+1}^{(N)} a(\varphi) \frac{d\varphi^{(N)}}{dx} \Big|_{x_N}^{x_{N+1}} = \\ &= \frac{1}{L^{(N)}} (x_{N+1} - x_N) h (\Phi_{N+1} - T_{\text{нр}}(t)) \Big|_{x_N}^{x_{N+1}} = \\ &= -h T_{\text{нр}}(t) + h \Phi_{N+1} \end{aligned} \quad (83)$$

или

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & h \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_N \\ \Phi_{N+1} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -h T_{\text{нр}}(t) \end{Bmatrix} &= \\ &= \begin{bmatrix} K_{BC}^{(N)} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_N \\ \Phi_{N+1} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{BC}^{(N)} \\ 0 \end{Bmatrix}, \end{aligned} \quad (84)$$

где $\begin{bmatrix} K_{BC}^{(N)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & h \end{bmatrix}$ — дополнительная матрица элемента E_N , учитывающая влияние внутренней температуры. Добавляется к матрице теплопроводности $\begin{bmatrix} K_a^{(N)} \end{bmatrix}$; $\begin{Bmatrix} F_{BC}^{(N)} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -h T_{\text{нр}}(t) \end{Bmatrix}$ — дополнительный вектор теплового источника элемента E_N , учитывающий влияние внутренней температуры. Добавляется к вектору $\{f^{(N)}\}$.

За начальные условия для нелинейной задачи взято решение линейной нестационарной задачи с тем-

пературопроводностью, рассчитанной для $\varphi = 20^\circ\text{C}$. Линейная нестационарная задача, в свою очередь, решалась с начальными условиями, имевшими вид кусочно-линейного распределения температуры по всей толщине стены со значением $+20^\circ\text{C}$ на внутренней поверхности и -20°C на наружной.

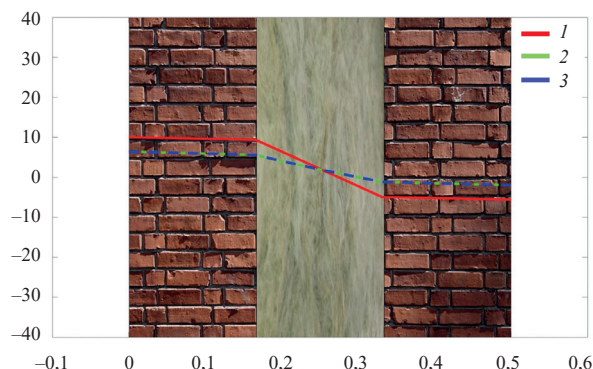


Рис. 2. Распределение температуры в пределах стены, рассчитанное различными методами: 1 — задача в линейной постановке; 2 — задача в нелинейной постановке, решенная методом Пикара; 3 — нелинейная задача, решенная методом Ньютона

Fig. 2. Temperature distribution throughout the wall structure: 1 — linear problem; 2 — non-linear problem linearized by Picard Method; 3 — non-linear problem solved by Newton Method

Как видно из полученных графиков, методы Ньютона и Пикара дали идентичные результаты. Согласно принятому закону изменения теплопроводности (75), (76) чем холоднее конструкция, тем выше ее теплопроводность. Это привело к ухудшению изоляционных характеристик стены, что, в свою очередь, вызвало уменьшение температуры на внутренней поверхности стены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в настоящей статье методика позволяет решать стационарную и нестационарную задачи теплопроводности с переменными характеристиками теплопроводящей среды. Потенциал МКЭ дает возможность включать в расчет различные прочие физические явления, такие как конвекция, перенос тепла [19, 20]. Аналитическая часть для временной переменной позволяет выполнять расчет сразу для заданного момента времени. Предложенный алгоритм численно-аналитического решения нелинейной задачи представляется довольно эффективным. В рассмотренном примере решения нелинейной нестационарной задачи количество итераций не превышало трех. Рассмотренный алгоритм реализует численно-аналитическое решение нелинейного параболического дифференциального уравнения в частных производных второго порядка и может быть использован для решения ряда инженерных задач, описываемых данным уравнением.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Koniorczyk M., Grymin W. Influence of the thermal conductivity and ambient temperature uncertainty on the heat losses through the external wall // *Buildings*. 2021. Vol. 11. Issue 3. P. 84. DOI: 10.3390/buildings11030084
2. Сидоров В.Н., Ахметов В.К. Математическое моделирование в строительстве : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2007. 336 с.
3. Walder O. Mathematical methods for engineers and geoscientists. Springer Berlin, Heidelberg, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-75301-8
4. Золотов А.Б., Акимов П.А. Практические методы расчета строительных конструкций. Численно-аналитические методы. М. : Изд-во АСВ, 2006. 208 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М. : Высшая школа, 1967. 600 с.
6. Fang W., An Z., Yu T., Bui T.Q. Analysis of unsteady heat transfer problems with complex geometries using isogeometric boundary element method // *Computers, Materials & Continua*. 2020. Vol. 62. Issue 2. Pp. 929–962. DOI: 10.32604/cmc.2020.05022
7. Forsberg C.H. Heat transfer principles and applications. London : Academic Press, Elsevier Inc., 2020.
8. Khebchareon M., Pany A.K., Pani A.K. An H1-Galerkin mixed finite element method for identification of time dependent parameters in parabolic problems // *Applied Mathematics and Computation*. 2022. Vol. 424. P. 127045. DOI: 10.1016/j.amc.2022.127045
9. Bhatti M.A. Advanced topics in finite element analysis of structures: With Mathematica and MATLAB Computations. New York : John Wiley & Sons, 2006.
10. Segerlind L.J. Applied finite element analysis. New York : John Wiley & Sons, 1984.
11. Langtangen H.P., Mardal K.A. Introduction to numerical methods for variational problems // *Texts in Computational Science and Engineering*. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-23788-2
12. O'Neil P.V. Advanced engineering mathematics. Boston : PWS Publishing Company, 1995.
13. Brunton S.L., Kutz J.N. Machine learning, dynamical systems and control. New York : Cambridge University Press, 2022.
14. Мацкевич С.М., Сидоров В.Н. Нестационарная задача теплопроводности в операторном виде и ее численно-аналитическое решение // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2014. Т. 10. № 3. С. 176–183.
15. Reddy J.N. An introduction to nonlinear finite element analysis: with applications to heat transfer, fluid mechanics, and solid mechanics 2nd edition. Oxford : Oxford University Press, 2015.
16. Лобанов А.И., Петров И.Б. Математическое моделирование нелинейных процессов. М. : Изд-во Юрайт, 2017.
17. Cassel K.W. Variational methods with applications in science and engineering. Cambridge University Press, 2013. DOI: 10.1017/CBO9781139136860
18. Carey V.P. Liquid-vapor phase-change phenomena. CRC Press, 2020. 730 p. DOI: 10.1201/9780429082221
19. Зубарев К.П. Использование дискретно-континуального подхода к решению уравнения нестационарного влагопереноса в многослойных стенах зданий // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Т. 17. № 2. С. 50–57. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-50-57
20. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. Минск : Новое знание, 2013. 584 с.

Поступила в редакцию 11 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 20 апреля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Николаевич Сидоров — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и прикладной математики, член-корреспондент РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 39161892000, ResearcherID: C-3057-2018, ORCID: 0000-0001-8812-80; SidorovVN@mgisu.ru;

Алим Махмудович Примкулов — аспирант кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8274-5450, ORCID: 0000-0003-2583-0281; a.primkulov@prodim.ru.

Вклад авторов:

Сидоров В.Н. — научное руководство, идея, обработка материала, доработка текста, итоговые выводы.

Примкулов А.М. — сбор материалов и их обработка, вычисления, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Koniorczyk M., Grymin W. Influence of the thermal conductivity and ambient temperature uncertainty on the heat losses through the external wall. *Buildings*. 2021; 11(3):84. DOI: 10.3390/buildings11030084

2. Sidorov V.N., Akhmetov V.K. *Mathematical modelling in Construction : tutorial*. Moscow, Publishing House ASV, 2007; 336. (rus.).
3. Walder O. *Mathematical Methods for Engineers and Geoscientists*. Springer Berlin, Heidelberg, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-75301-8
4. Zolotov A.B., Akimov P.A. *Applied Structural Analysis. Semi-analytical methods*. Moscow, Publishing House ASV, 2007; 208. (rus.).
5. Lykov A.V. *Heat transfer theory*. Moscow, High Education, 1967; 600. (rus.).
6. Fang W., An Z., Yu T., Bui T.Q. Analysis of unsteady heat transfer problems with complex geometries using isogeometric boundary element method. *Computers, Materials & Continua*. 2020; 62(2):929-962. DOI: 10.32604/cmc.2020.05022
7. Forsberg C.H. *Heat Transfer Principles and Applications*. London, Academic Press, Elsevier Inc., 2020.
8. Khebchareon M., Pany A.K., Pani A.K. An H1-Galerkin mixed finite element method for identification of time dependent parameters in parabolic problems. *Applied Mathematics and Computation*. 2022; 424:127045. DOI: 10.1016/j.amc.2022.127045
9. Bhatti M.A. *Advanced Topics in Finite Element Analysis of Structures: With Mathematica and MATLAB Computations*. New York, John Wiley & Sons, 2006.
10. Segerlind L.J. *Applied Finite Element Analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1984.
11. Langtangen H.P., Mardal K.A. Introduction to numerical methods for variational problems. *Texts in Computational Science and Engineering*. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-23788-2
12. O'Neil P.V. *Advanced Engineering Mathematics*. Boston, PWS Publishing Company, 1995.
13. Brunton S.L., Kutz J.N. *Machine Learning, Dynamical Systems and Control*. New York, Cambridge University Press, 2022.
14. Matskevich S.M., Sidorov V.N. Unsteady-state heat conduction transfer problem in operator form and it's solving using discrete-analytic method. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2014; 10(3):176-183. (rus.).
15. Reddy J.N. *An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis: with applications to heat transfer, fluid mechanics, and solid mechanics 2nd edition*. Oxford, Oxford University Press, 2015.
16. Lobanov A.L., Petrov I.B. *Mathematical Modeling of Non-linear Processes*. Moscow, Yurait Publishing House, 2017. (rus.).
17. Cassel K.W. *Variational Methods with Applications in Science and Engineering*. Cambridge University Press, 2013. DOI: 10.1017/CBO9781139136860
18. Carey V.P. *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena*. CRC Press, 2020; 730. DOI: 10.1201/9780429082221
19. Zubarev K.P. Using discrete-continuous approach for the solution of unsteady-state moisture transfer equation for multilayer building walls. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(2): 50-57. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-50-57 (rus.).
20. Tarasik V.P. *Mathematical Modeling of Technical Systems*. Minsk, Novoe znanie, 2013; 584. (rus.).

Received January 11, 2023.

Adopted in revised form on April 20, 2023.

Approved for publication on April 20, 2023.

B I O N O T E S : **Vladimir N. Sidorov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Science and Applied Mathematics, member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 39161892000, ResearcherID: C-3057-2018, ORCID: 0000-0001-8812-80; SidorovVN@mgsu.ru;

Alim M. Primkulov — postgraduate student of the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8274-5450, ORCID: 0000-0003-2583-0281; a.primkulov@prodim.ru.

Contribution of the authors:

Vladimir N. Sidorov — scientific guidance, general review and editing, final conclusions.

Alim M. Primkulov — materials gathering and their analyzing, calculations, text preparation.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 694.14

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.697-708

Определение прогиба составных деревянных изгибаемых элементов, армированных цилиндрическими полимеркомпозитными нагелями

Тагир Альмирович Зиннуров, Егор Владиславович Новицкий

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время актуальны экологические и логистические проблемы строительства быстровозводимых и временных мостовых сооружений. На основе возобновляемых и перерабатываемых материалов возможно создать новые конструктивные решения, удовлетворяющие требованиям несущей способности и долговечности. Целью исследования является изучение работы нагелей в составной конструкции и нахождение зависимости прогибов от количества и материала нагелей.

Материалы и методы. В качестве современного конструктивного решения предлагается деревянная составная балка, объединенная полимеркомпозитными нагелями. Имеется ряд вопросов, которые заставляют сомневаться в целесообразности возведения деревянных модифицированных конструкций. Один из них требует изучения совместной работы полимеркомпозита и дерева: позволит ли сочетание материалов привести к улучшению механических свойств по сравнению с классическими решениями. Проведены испытания образцов нагельных соединений с полимеркомпозитной арматурой, определена несущая способность такого соединения, а также исследованы деформации составных балок при различном количестве нагелей с помощью программного комплекса ЛИРА-САПР.

Результаты. На основе нормативных расчетов несущей способности нагелей и проверке по второй группе предельных состояний выведено уравнение, позволяющее уточнить необходимое количество нагелей при существующих прогибах.

Выводы. Расчеты по прогибам изгибаемых элементов хоть и имеют большое количество необходимых уточнений, но не учитывают присутствие дополнительных усиливающих частей, например нагелей. Получена зависимость, которая может быть внедрена в имеющиеся нормативные вычисления для лучшего описания работы реальной конструкции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деревянная балка, усиление, несущая способность, нагельное соединение, прогиб, композитная арматура

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зиннуров Т.А., Новицкий Е.В. Определение прогиба составных деревянных изгибаемых элементов, армированных цилиндрическими полимеркомпозитными нагелями // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С. 697–708. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.697-708

Автор, ответственный за переписку: Егор Владиславович Новицкий, egorka.no@gmail.com.

Deflection determination of composite wood bending elements reinforced with cylindrical polymer composite dowels

Tagir A. Zinnurov, Egor V. Novitsky

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. At the present time, environmental and logistical problems of the construction of prefabricated and temporary bridge structures are relevant. It is possible to create new constructive solutions based on renewable and recyclable materials to meet the requirements of load-bearing capacity and durability. The aim of the research is to study the operation of dowels in a composite structure and to find the dependence of deflections on the number and material of nagels.

Materials and methods. A wooden composite beam combined with polymer composite dowels is proposed as a modern structural solution. There are a number of issues that cast doubt on the feasibility of building modified wooden structures. One of them requires studying how the polymer composite and wood work together: whether the combination of materials will lead to improved mechanical properties compared with classical solutions. The samples of dowel joints with polymer-composite reinforcement have been tested, the load-carrying ability of such a joint has been estimated, and the deformations of composite beams with a varying number of dowels have been studied using the LIRA-SAPR software package.

Results. On the basis of normative calculations of dowel load-carrying ability and verification in the second group of the limiting states the equation allowing to specify the required number of dowels under the existing deflections was derived.

Conclusions. Calculation of deflections of bendable elements have a large number of necessary specifications, but do not take into account the presence of additional reinforcing parts, such as dowels. With the help of the work done the dependence has been obtained which can be implemented in the existing normative calculations to better describe the performance of a real structure.

KEYWORDS: wooden beam, reinforcement, load-carrying ability, dowel connection, deflection, composite reinforcement

FOR CITATION: Zinnurov T.A., Novitsky E.V. Deflection determination of composite wood bending elements reinforced with cylindrical polymer composite dowels. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):697-708. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.697-708 (rus.).

Corresponding author: Egor V. Novitsky, egorka.no@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о целесообразности строительства деревянных мостов на территории Российской Федерации стоит довольно остро, хотя в открытых источниках имеется много информации об актуальности возведения мостовых сооружений из восполняемого природного материала [1–5]. Дешевизна и доступность материала для строительства мостов на основе древесины являются его главными преимуществами по сравнению с другими конструкционными материалами. На сегодняшний день для увеличения сроков службы, разнообразия сортамента и показателей несущей способности деревоматериалы нуждаются в дополнительной модификации [6–8]. С целью повышения их несущей способности можно обратиться к традиционным методам усиления отечественных и зарубежных инженеров [9–12]. Однако в распоряжении инженеров имеются и более современные решения [13–16]. Древесина — это вновь воспроизводимый материал, при верном подходе к восполнению запасов человечество может обеспечить себя древесиной на долгие годы, поэтому проблемам зеленого строительства уделяется много внимания, особенно за рубежом [17–19]. Разумеется, в РФ также осознают важность использования восстанавливаемых ресурсов, но, помимо этого, актуальным вопросом остается создание условий эксплуатации и применения деревянных мостов на дорогах низших технических категорий или в процессе предотвращения тяжелых последствий при чрезвычайных ситуациях во время паводка, наводнений и т.п. [20–22].

Новые технические задачи требуют иных подходов к их решению. Цель исследования — разработка и обоснование модифицированной конструкции балок пролетного строения, способных удовлетворить все требования по долговечности и несущей способности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В разработке современных конструктивных решений за основу принимается составная балка Деревягина, расчет которой заключается в определении геометрических параметров сечения, количества, размеров и расстановки пластинчатых нагелей в зависимости от числа швов сплочения балок [23]. Модифицированная вариация балки Деревягина представляет собой брус, объединенные полимеркомпозитными цилиндрическими нагелями, что обеспечивает совместную работу сложного сечения. Так как полимеркомпозит на основе пултрузионных стеклянных волокон имеет отличные физико-механические ха-

рактеристики, необходимо выполнить ряд испытаний образцов на срез согласно ГОСТ 33082–2014. Полученные результаты позволят дать оценку деформируемому состоянию модифицированной балки.

На первом этапе проводилось сравнение несущей способности нагельного соединения из различных материалов. В первой серии испытаний участвовали образцы: два образца с гвоздевым соединением диаметром 5 мм номера 1,1 и 1,2; два образца с соединением на саморезах диаметром 4 мм номера 2,1 и 2,2 и два образца с нагелями из полимеркомпозитной арматуры номинальным диаметром 6 мм номера 3,1 и 3,2. Номинальный диаметр определяет размер арматуры с учетом рельефа изделия. Испытания осуществлялись на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4 (рис. 1). На втором этапе рассматривалось изменение несущей способности соединения на полимеркомпозитных нагелях в зависимости от диаметра и направления действия усилия. Для данного исследования изготовлено пять образцов на срез поперек волокон с диаметром полимеркомпозитной арматуры 8 мм, пять образцов на срез поперек волокон с диаметром полимеркомпозитной арматуры 6 мм и семь образцов на срез вдоль волокон с диаметром полимеркомпозитной арматуры 6 мм. Образец представляет собой три деревянные доски размерами 150 × 150 × 40 мм, объединенных между собой цилиндрическим нагелем. В соответствии с ГОСТ Р 56711–2015 данное соединение является по конструктивному сочетанию симметричным. Образец воздействовал на опорную доску, распределяя нагрузку на всю верхнюю площадь грани средней доски, нагрузка задавалась с помощью нижнего перемещаемого рабочего цилиндра.

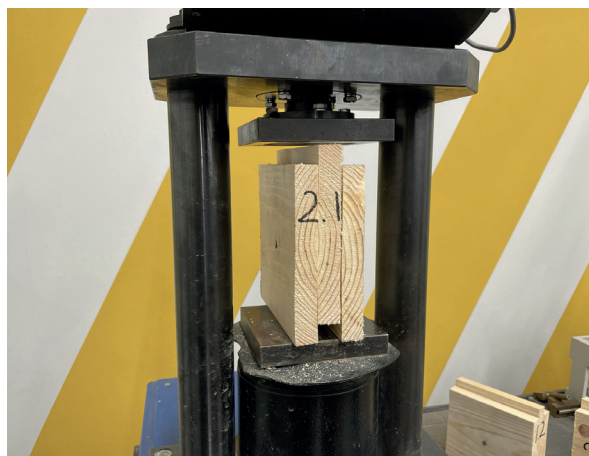


Рис. 1. Вид нагельной системы

Fig. 1. View of dowel system

Результаты испытания на срез необходимы для нахождения требуемого количества нагелей в составной балке по формуле, предложенной Деревягиным:

$$n = \frac{1,8M}{hT},$$

(1)

где M — максимальный момент в середине сечения балки, кН·м; h — высота балки, м; T — несущая способность нагеля, кН.

Для расчетной схемы с двухточечным нагружением прогиб находится по формуле:

$$f_0 = \frac{Fa}{24EJ_xk_{\text{ж}}} (3l^2 - 4a^2),$$

(2)

где E — модуль упругости дерева, МПа; J_x — момент инерции сечения, м⁴; $k_{\text{ж}}$ — коэффициент, учитывающий сдвиг податливых соединений; l — длина балки.

Расчетный прогиб по требованиям СП 64.13330.2017 определяют по формуле:

$$f = \frac{f_0}{k} [1 + c(h/l)^2],$$

(3)

где k — коэффициент, учитывающий влияние переменности высоты сечения, принимаемый равным 1 для балок постоянного сечения; c — коэффициент, учитывающий влияние деформаций сдвига от поперечной силы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первый этап испытаний образцов на срез продемонстрировал результаты, которые занесены в табл. 1 и отражены на графике (рис. 2).

Анализируя график на рис. 2, можно сделать вывод о том, что полимеркомпозитная арматура

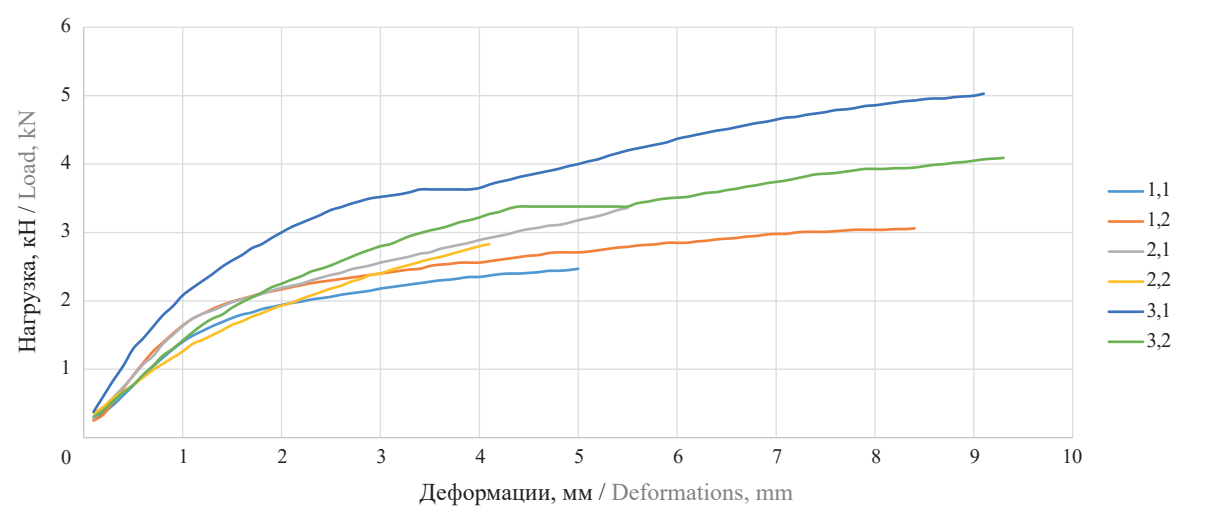


Рис. 2. График зависимости нагрузки к деформациям различных нагельных систем
Fig. 2. Graph of load-to-strain curves for various dowel systems

Табл. 1. Результаты первого этапа испытания образцов
Table 1. Results of first stage of sample testing

Номер образца Number of sample	Вертикальные деформации образца, мм, при нагрузке, кН Vertical deformations of the sample, mm, under load on sample, kN					
	1,1	1,2	2,1	2,2	3,1	3,2
1	1,4	1,64	1,63	1,26	2,08	1,42
2	1,94	2,17	2,19	1,93	3,01	2,25
3	2,18	2,4	2,56	2,4	3,52	2,8
4	2,35	2,56	2,89	2,8	3,65	3,22
5	2,47	2,71	3,18	—	4,02	3,38
6	—	2,85	3,36	—	4,37	3,51
7	—	2,98	—	—	4,65	3,74
8	—	3,04	—	—	4,86	3,93
9	—	—	—	—	5,00	4,05

имеет наибольшую несущую способность по сравнению с другими цилиндрическими нагелями. Максимальная несущая способность для гвоздя составила 2,75 кН, для самореза — 3,08 кН, для полимеркомпозитной арматуры — 4,53 кН. Авторы отмечают, что превосходство полимеркомпозитной арматуры над другими связано с различиями диаметра, который подбирался исходя из технологических и конструктивных требований. Однако, рассматривая процесс деформации соединения, можно отметить, что гвоздь лучше всего описывается логарифмической зависимостью по результатам аппроксимации с коэффициентом детерминации 0,984. На графике ярко выражен участок пропорциональности при упругой работе, где отношение предельного значения участка упругости к разрушающей нагрузке не превышает 0,55. Саморез показал большую несущую способность, чем гвоздь на 12 %, но участок пропорциональности не так заметен, отношение конечного участка зоны пропорциональности к разрушающей нагрузке составляет 0,45. Деформации нагельного соединения с полимеркомпозитной арматурой не имеют четкой кривой, в зоне пластических деформаций происходят скачки, связанные с особенностями работы полимеркомпозитной арматуры.

Характер разрушения нагелей из стали и полимеркомпозита различен. У гвоздя заметны остаточные пластические деформации, у самореза произошел срез по металлу в результате хрупкой работы. Полимеркомпозитная арматура до разрушения вела себя псевдоупруго, так как при остановке испытаний образец почти восстанавливал свою форму. Для

подтверждения данных выводов предоставляются фотографии на рис. 3.

По итогам сравнительного анализа и проведенным испытаниям можно сделать промежуточный вывод о возможности использования цилиндрических нагелей из полимеркомпозитной арматуры в качестве соединительных элементов, но вопрос о расчетной несущей способности пока остается открытым.

Возвращаясь к теме исследования данной статьи, для определения расчетной несущей способности необходима большая выборка, поэтому были созданы дополнительные образцы с полимеркомпозитной арматурой для второго этапа испытаний.

Характер работы образцов второй партии под нагрузкой описывается графиками на рис. 4, а результаты испытаний по форме «нагрузка – деформации» указаны в табл. 2–4. Отметим образцы: 1,1–1,5 — нагельная система с полимеркомпозитной арматурой номинальным диаметром 8 мм; образцы 2,1–2,5 — нагельная система с полимеркомпозитной арматурой номинальным диаметром 6 мм; образцы 3,1–3,7 — нагельная система с полимеркомпозитной арматурой номинальным диаметром 6 мм, испытываемые вдоль волокон. На графиках (см. рис. 4) деформации образцов при действии усилий поперек волокон во много превышают деформации образцов с усилиями вдоль волокон, что в принципе сходится с естественной работой древесины. Также без сомнений получено увеличение разрушающей силы для всех образцов с номинальным диаметром 8 мм по сравнению с образцами номинальным диаметром 6 мм.



Рис. 3. Формы деформации нагелей из различных материалов: *a* — гвоздь; *b* — полимеркомпозитная арматура
Fig. 3. Forms of dowel's deformation from various materials: *a* — a nail; *b* — polymer composite reinforcement

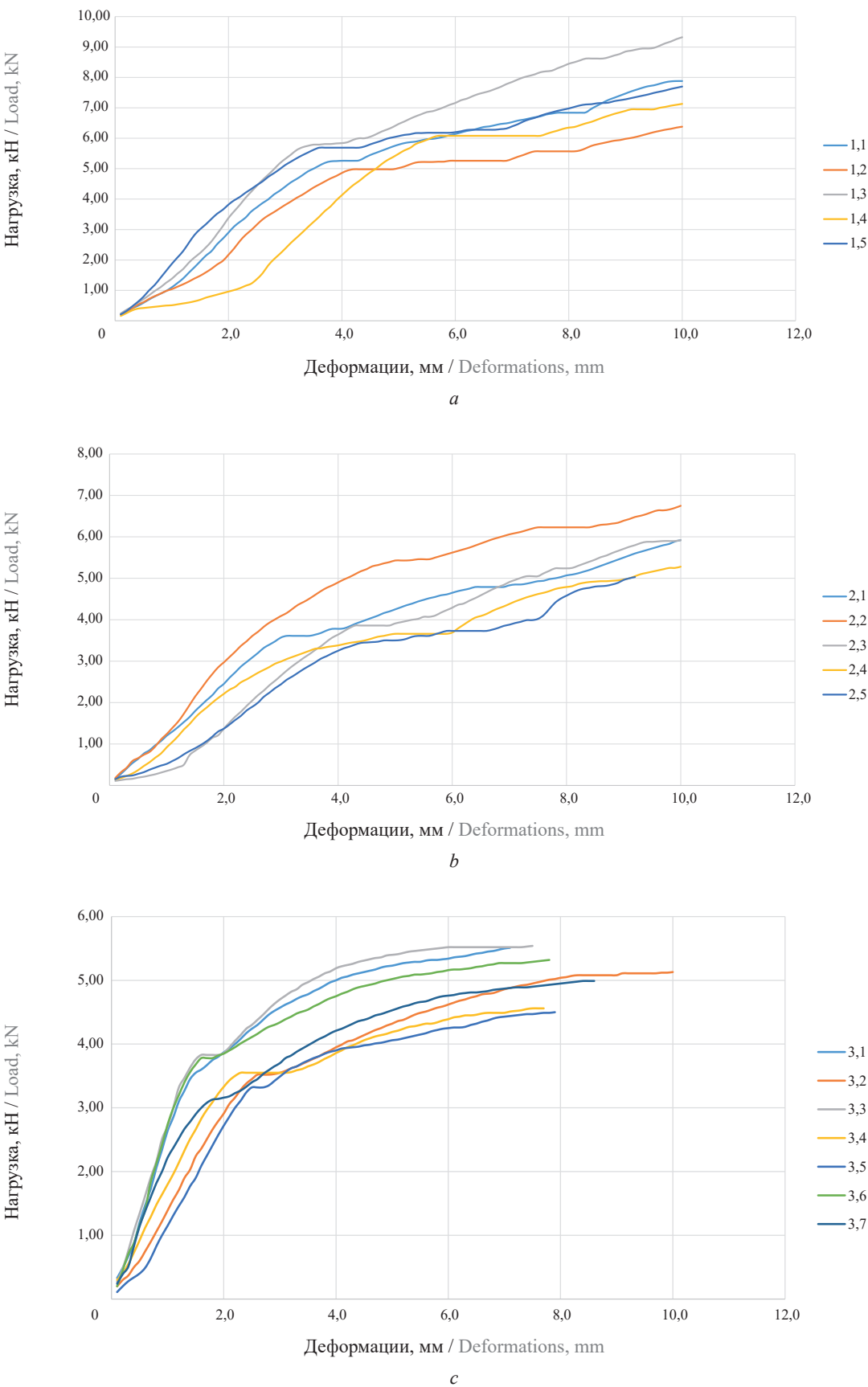


Рис. 4. Графики зависимости нагрузки к деформациям нагельной системы: *a* — поперек волокон с арматурой 8 мм; *b* — поперек волокон с арматурой 6 мм; *c* — вдоль волокон с арматурой 6 мм

Fig. 4. Graph of load-to-strain curve of a dowel system: *a* — across the fibers with reinforcement of 8 mm; *b* — across the fibers with reinforcement of 6 mm; *c* — along the fibers with reinforcement of 6 mm

Табл. 2. Показатели нагрузок и деформаций испытаний нагельных систем поперек волокон с арматурой 8 мм
Table 2. Indicators of loads and deformations of tests of dowel systems across the fibers with reinforcement 8 mm

Номер образца Number of sample	Вертикальные деформации образца, мм, при нагрузке, кН Vertical deformations of the sample, mm, under load on sample, kN				
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
1	1,10	1,04	1,38	0,51	1,87
2	2,90	2,17	3,38	0,96	3,82
3	4,41	3,81	5,32	2,37	5,12
4	5,26	4,86	5,84	4,13	5,69
5	5,79	5,02	6,47	5,49	6,07
6	6,14	5,26	7,16	6,08	6,20
7	6,53	5,32	7,85	6,08	6,39
8	6,84	5,57	8,45	6,35	6,98
9	7,47	5,98	8,85	6,90	7,28
10	7,88	6,38	9,32	7,13	7,70

Табл. 3. Показатели нагрузок и деформаций испытаний нагельных систем поперек волокон с арматурой 6 мм
Table 3. Indicators of loads and deformations of tests of dowel systems across the fibers with reinforcement 6 mm

Номер образца Number of sample	Вертикальные деформации образца, мм, при нагрузке, кН Vertical deformations of the sample, mm, under load on sample, kN				
	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
1	1,20	1,24	0,35	0,92	0,52
2	2,45	2,97	1,37	2,21	1,37
3	3,57	4,09	2,65	2,99	2,44
4	3,78	4,90	3,64	3,38	3,25
5	4,25	5,43	3,91	3,66	3,50
6	4,65	5,62	4,29	3,69	3,73
7	4,83	6,06	4,91	4,38	3,88
8	5,07	6,23	5,24	4,79	4,58
9	5,50	6,39	5,71	4,97	4,96
10	5,92	6,75	5,92	5,28	5,01

Табл. 4. Показатели нагрузок и деформаций испытаний нагельных систем вдоль волокон с арматурой 6 мм
Table 4. Indicators of loads and deformations of tests of dowel systems along the fibers with reinforcement 6 mm

Номер образца Number of sample	Вертикальные деформации образца, мм, при нагрузке, кН Vertical deformations of the sample, mm, under load on sample, kN						
	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7
1	2,64	1,39	2,71	1,80	1,15	2,74	2,22
2	3,87	2,91	3,86	3,33	2,72	3,85	3,16
3	4,57	3,55	4,70	3,55	3,49	4,34	3,70
4	5,00	3,95	5,19	3,86	3,90	4,75	4,21
5	5,23	4,32	5,40	4,19	4,06	5,02	4,53

Окончание табл. 4 / End of the Table 4

Номер образца Number of sample	Вертикальные деформации образца, мм, при нагрузке, кН Vertical deformations of the sample, mm, under load on sample, kN						
	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7
6	5,34	4,62	5,52	4,39	4,25	5,16	4,76
7	5,50	4,86	5,52	4,49	4,43	5,27	4,87
8	–	5,04	–	–	–	–	4,95
9	–	5,08	–	–	–	–	–
10	–	5,13	–	–	–	–	–

Получена логарифмическая аппроксимирующая зависимость (4) для средних значений испытания партии образцов с полимеркомпозитной арматурой номинальным диаметром 6 мм, испытываемых

вдоль волокон. График аппроксимации построен на рис. 5:

$$y = 1,309 \ln(x) + 2,4.$$

(4)

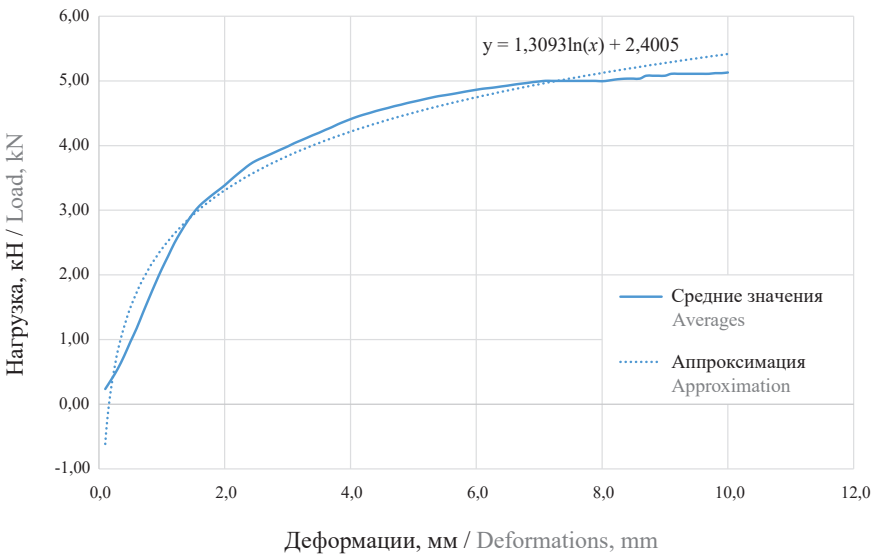


Рис. 5. График аппроксимации несущей способности полимеркомпозитной арматуры 6 мм, испытываемой вдоль волокон

Fig. 5. Graph of approximation of the bearing capacity of 6 mm polymer composite reinforcement along the fibers

Из представленной в виде формулы (4) аппроксимирующей функции можно вычислить перемещения образца при различной разрушающей нагрузке. Расчетная несущая способность нагельного соединения R_{exp} предполагает обработку результатов по ГОСТ 33082–2014. Таким образом, определена несущая способность одного цилиндрического нагеля, которая составила 2,1 кН. Данное значение несущей способности применим для установления первоначального количества нагелей по формуле (1) в теоретической модели изгибаемой составной балки с полимеркомпозитными нагелями. На основе модели выполним расчеты по второй группе предельных состояний, в частности по прогибам.

Подобные исследования для металлических нагелей проводились А.С. Харламовой, А.А. Улько, они доказали, что предельное срезающее усилие не должно приводить к смятию древесины более 1,5–2 мм [24]. Оказывается, экспериментально полученная авторами несущая способность нагель-

ного соединения теоретически также не превысит деформации смятия древесины, что доказывает достоверность озвученных гипотез.

Зависимость между количеством нагелей и прогибами для составной деревянной балки, соединенной полимеркомпозитными нагелями, получим в результате проведенных исследований на численной модели, построенной в программном комплексе ЛИРА-САПР (рис. 6). Модель балки представляет собой массив из объемных конечных элементов (КЭ), имитирующий два бруса размерами 200 × 100 × 2000 мм, между которыми имеется бесконечно малое пространство. Данное пространство необходимо для моделирования совместной работы брусьев, совместность обеспечивается с помощью объединения перемещений всех пар узлов брусьев по отдельности. В тело брусьев внедрены цилиндрические нагели, которые работают совместно с брусьями с помощью совмещения узлов между объемными КЭ нагелей и брусьев.

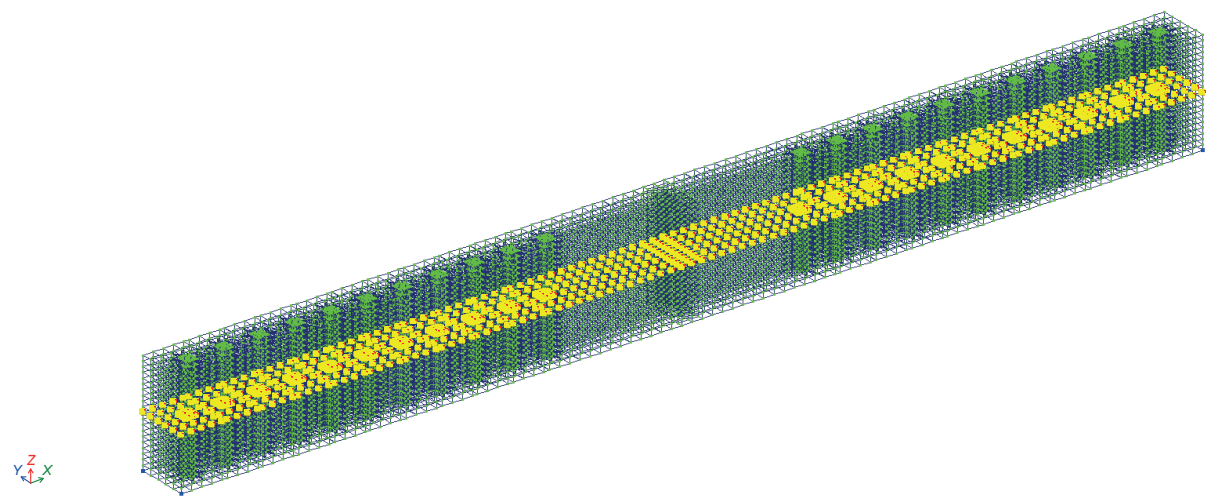


Рис. 6. Объемная расчетная схема составной деревянной балки
Fig. 6. Volumetric calculation scheme of a composite wooden beam

При помощи тестовой задачи проверим адекватность численной модели. Смоделируем условия работы составной деревянной балки при расчетном количестве нагелей. Прогиб балки при численном моделировании составляет 5,4 мм, а по формуле (4) в соответствии с нормативным расчетом прогиб равен 6,1 мм. Разница между численным и теоретиче-

ским расчетами составляет 11,47 %, что достаточно для дальнейших исследований.
Численная модель позволяет поэтапно выключать нагели из работы и проводить расчеты. Полученные результаты приведены в табл. 5. Для сравнения расчеты выполнялись для полимеркомпозитных и стальных нагелей.

Табл. 5. Значения прогибов при разном количестве и типе нагелей
Table 5. Deflection values for different number and type of dowels

Материал Material	Количество нагелей, шт. Number of dowels, pcs.	Прогиб, мм Deflection, mm
Полимер-композит Polymer-composite	16	5,40
	14	5,45
	12	5,56
	10	5,80
	8	6,17
	6	6,71
	4	7,51
	2	8,86
Сталь Steel	16	4,71
	14	4,73
	12	4,84
	10	5,05
	8	5,38
	6	5,85
	4	6,55
	2	7,75

Численная модель демонстрирует зависимость увеличения прогибов при снижении количества нагелей и хорошо согласуется со степенной функцией. Степенная функция (формула (5)) дает возможность добиться высокой точности математической модели, подтверждение этому коэффициент детерминации, который составил 0,9926 (рис. 7):

$$\bar{f} = 10,5n^{-0,25}. \quad (5)$$

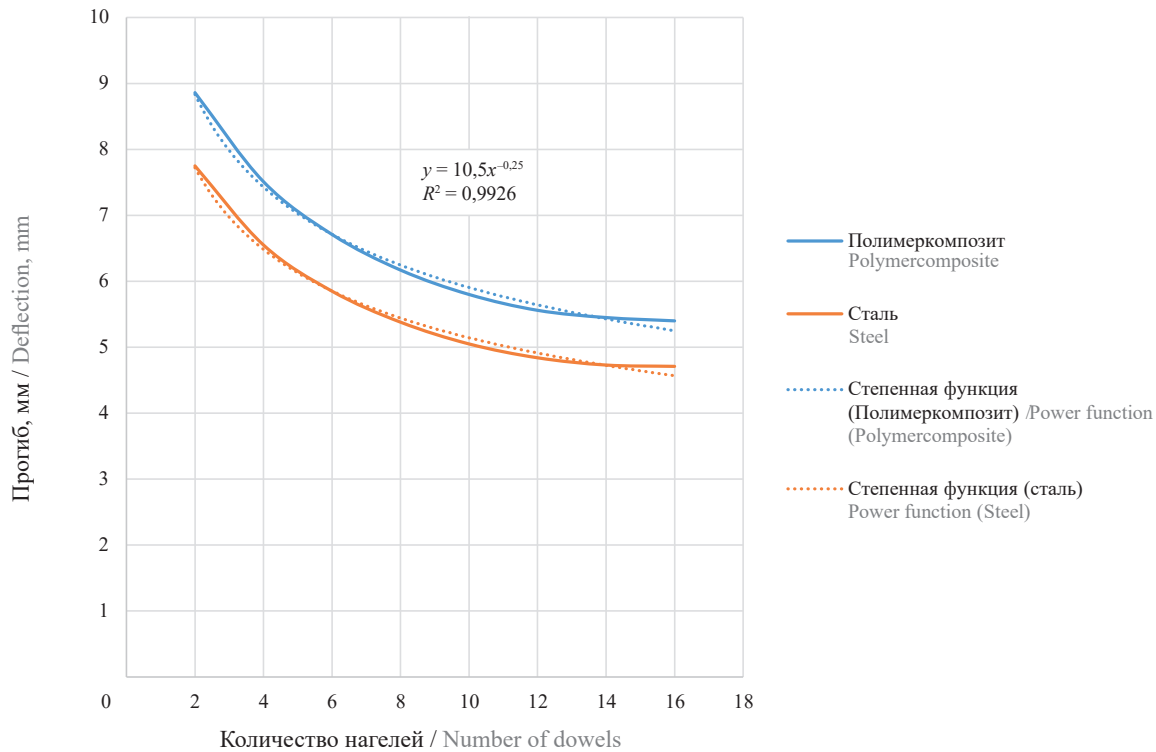


Рис. 7. Отношения значений прогибов к количеству нагелей

Fig. 7. The ratio of deflection values to the numbers of dowels

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные натурные и численные эксперименты помогли определить зависимость прогибов от количества полимеркомпозитных нагелей, которая определяется формулой (5). Гипотеза о степенной зависимости между ними требует экспериментального подтверждения.

Полимеркомпозитные нагели, изготовленные из стеклопластиковой арматуры, можно применять

для конструирования составных деревянных балок, необходимо учитывать не только прочностные и деформативные показатели, но продумать технологическую составляющую вопроса.

Отметим более высокую податливость полимеркомпозитных нагелей по сравнению со стальными, которая может стать положительным фактором при конструировании композиционных конструкций из разных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Серегин В.А. Перспективы применения древесины в мостостроении. М. : СоюзДорНИИ, 1990.
2. Сафронов В.С., Габриелян Г.Е., Киселев Д.А., Антипов А.В. Вероятностный анализ надежности разрезного деревянного автодорожного моста // Строительная механика и конструкции. 2021. № 3 (30). С. 49–60. DOI: 10.36622/VSTU.2021.30.3.004

3. Уткин В.А., Матвеев С.А. Особенности проектирования деревянных мостов автомобильных лесовозных дорог // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 1. С. 126–152. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-126-152
4. Медведев И.Н., Воротников Д.А. Перспективы применения конструкционного материала на основе малоценной древесины мягких листвен-

ных пород для мостов на лесовозных автомобильных дорогах // Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика : мат. Всерос. науч.-практ. конф. Воронеж, 2021. С. 240–244. DOI: 10.34220/MMEITSIC2021_240-244

5. Подъяпольская М.А., Вербицкий И.О., Вербицкая Е.В. Деревянные мосты. Мостостроение с использованием древесины в прошлом и сейчас // Ползуновский альманах. 2022. № 1. С. 168–170.

6. Zhou J., Li C., Ke L., He J., Wang Z. Experimental study on loading capacity of glued-laminated timber arches subjected to vertical concentrated loads // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2020/7987414

7. Зиннуров Т.А., Нурмухаметов К.А. Исследование совместной работы деревянных составных балок // Современное строительство и архитектура. 2017. № 4 (08). С. 20–23. DOI: 10.18454/mca.2017.08.4

8. Rashidi M., Hoshyar A.N., Smith L., Samali B., Siddique R. A comprehensive taxonomy for structure and material deficiencies, preventions and remedies of timber bridges // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 34. P. 101624. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101624

9. Canaev B.C. Совершенствование конструкции деревянных пролетных строений с составными прогонами из бревен (брусьев) // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых : сб. мат. VI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Омск, 2022. С. 221–225.

10. Handbook of international bridge engineering / ed. by Wai-Fah Chen, Lian Duan. USA : CRC Press, Boca Raton, 2014.

11. Aruova L.B., Ospanova Z.N., Aruov B.B., Alibekova N.T., Shashpan Zh.A., Kyrgyzbaev A.T. Cyclic tests of joints of glued wooden structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 829. Issue 1. P. 012017. DOI: 10.1088/1757-899x/829/1/012017

12. Mitterpach J., Fojtik R., Machovčáková E., Kubínková L. Life cycle assessment of a road transverse prestressed wooden–concrete bridge // Forests. 2022. Vol. 14. Issue 1. P. 16. DOI: 10.3390/f14010016

13. Зиннуров Т.А., Новицкий Е.В., Пермяков С.В. Усиление составных деревянных балок стеклопластиковыми изделиями // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 43. С. 929–934.

Поступила в редакцию 2 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 31 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 19 апреля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Тагир Альмирович Зиннуров — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры автомобильных дорог, мостов и тоннелей; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 800952, Scopus: 57208107876, ORCID: 0000-0002-7238-2883; leongar@mail.ru;

14. Ślósarz S. Strengthening of the wooden structures // Budownictwo i Architektura. 2020. Vol. 18. Issue 3. Pp. 017–028. DOI: 10.35784/bud-arch.561

15. Зиннуров Т.А., Майстренко И.Ю., Ерохин Д.И., Замилова А.Х., Умаров Б.Ш. Исследование влияния утолщений в стеклопластиковой арматуре на сцепление с бетоном // Известия КГАСУ. 2021. № 2 (56). С. 84–93. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_84

16. Салахутдинов М.А., Каюмов Р.А., Арипов Д.Н., Ханеков А.Р. Численное исследование несущей способности балки составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей // Известия КГАСУ. 2022. № 2 (60). С. 15–23. DOI: 10.52409/20731523_2022_2_15. EDN: BHRXOY.

17. Kromoser B., Ritt M., Spitzer A., Stangl R., Idam F. Design concept for a greened timber truss bridge in city area // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 8. P. 3218. DOI: 10.3390/su12083218

18. Minarni I., Wardhana H., Asyari M., Mursadin A. Innovation of substitute material to conservation effort of eusideroxylon zwageri on wooden bridge maintenance project // Technium Romanian Journal of Applied Sciences and Technology. 2021. Vol. 3. Issue 8. Pp. 103–109. DOI: 10.47577/technium.v3i8.4934

19. Švajlenka J., Kozlovská M. Constructions of buildings based on solid wooden elements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1203. Issue 2. P. 022073. DOI: 10.1088/1757-899X/1203/2/022073

20. Abrar M., Farooqi M.U. Impacts of floods on bridges — a review // 1st International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences. 2021.

21. Верескун А.В., Файзулин Т.Ш., Олтян И.Ю., Байда С.Е., Зиновьев С.В., Барышев Е.М. и др. Комплексное исследование влияния рисков природных и техногенных чрезвычайных ситуаций на безопасность жизнедеятельности населения Республики Крым и г. Севастополя. М., 2015. 208 с.

22. Gbaa S. Analysis of flood disaster adaptation strategies among people of Guma local government Area, Benue State, Nigeria // Indonesian Journal of Earth Sciences. 2022. Vol. 2. Issue 2. Pp. 226–235. DOI: 10.52562/injoes.v2i2.415

23. Кузнецов Г.Ф. Справочник проектировщика промышленных сооружений. Деревянные конструкции. М. : Стройиздат, 1937. 955 с.

24. Харламова А.С., Улько А.А. Оценка работы соединений деревянных конструкций на стеклопластиковых и стальных нагелях // Синергия наук. 2019. № 31. С. 783–789.

Егор Владиславович Новицкий — лаборант кафедры автомобильных дорог, мостов и тоннелей; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; egorka.no@gmail.com.

Вклад авторов:

Зиннуров Т.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, итоговые выводы.

Новицкий Е.В. — проведение исследований и анализ их результатов, формирование структуры исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Seregin V.A. *Prospects for the Use of Wood in Bridge Building*. Moscow, Soyuzdornii Publ., 1990. (rus.).
2. Safronov V.S., Gabrielyan G.E., Kiselev D.A., Antipov A.V. Probabilistic analysis of reliability sliding wooden road bridge. *Structural Mechanics and Structures*. 2021; 3(30):49-60. DOI: 10.36622/VSTU.2021.30.3.004 (rus.).
3. Utkin V.A., Matveev S.A. Features of designing wooden bridges of the forest complex. *Russian Forestry Journal*. 2023; 1:126-152. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-126-152 (rus.).
4. Medvedev I.N., Vorotnikov D.A. Prospects for the use of structural material based on low-value soft hardwood wood for bridges on harvesting roads. *Modern Machines, Equipment and IT Solutions for the Timber Industry: Theory and Practice : materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Voronezh, 2021; 240-244. DOI: 10.34220/MMEITSIC2021_240-244 (rus.).
5. Podyapolskaya M.A., Verbitsky I.O., Verbitskaya E.V. Wooden bridges. Bridge building using wood in the past and now. *Polzunovskiy almanac*. 2022; 1:168-170. (rus.).
6. Zhou J., Li C., Ke L., He J., Wang Z. Experimental study on loading capacity of glued-laminated timber arches subjected to vertical concentrated loads. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020:1-9. DOI: 10.1155/2020/7987414
7. Zinnurov T.A., Nurmuhametov K.A. Study of joint operation of Clarke beams. *Modern Construction and Architecture*. 2017; 4(08):20-23. DOI: 10.18454/mca.2017.08.4 (rus.).
8. Rashidi M., Hoshyar A.N., Smith L., Samali B., Siddique R. A comprehensive taxonomy for structure and material deficiencies, preventions and remedies of timber bridges. *Journal of Building Engineering*. 2021; 34:101624. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101624
9. Sapaev V.S. Improvement of the design of wooden superstructures with composite girders made of logs (beams). *Fundamental and Applied Research of Young Scientists : collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. Omsk, 2022; 221-225. (rus.).
10. *Handbook of international bridge engineering* / ed. by Wai-Fah Chen, Lian Duan. USA, CRC Press, Boca Raton, 2014.
11. Aruova L.B., Ospanova Z.N., Aruov B.B., Alibekova N.T., Shashpan Zh.A., Kyrgyzbaev A.T. Cyclic tests of joints of glued wooden structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 829(1):012017. DOI: 10.1088/1757-899x/829/1/012017
12. Mitterpach J., Fojtík R., Machovčáková E., Kubínová L. Life cycle assessment of a road transverse prestressed wooden–concrete bridge. *Forests*. 2022; 14(1):16. DOI: 10.3390/f14010016
13. Zinnurov T.A., Novitsky E.V., Permyakov S.V. Strengthening composite wooden beams with fiberglass products. *Innovations. The science. Education*. 2021; 43:929-934. (rus.).
14. Ślósarz S. Strengthening of the wooden structures. *Budownictwo i Architektura*. 2020; 18(3):017-028. DOI: 10.35784/bud-arch.561
15. Zinnurov T.A., Majstrenko I.Yu., Erokhin D.I., Zamilova A.Kh., Umarov B.Sh. Investigation of the effect of thickenings in fiberglass reinforcement on adhesion to concrete. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2021; 2(56):84-93. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_84 (rus.).
16. Salakhutdinov M.A., Kayumov R.A., Aripov D.N., Khanekov A.R. Numerical study of the bearing capacity of a composite i-shaped section beam of pultruded fiberglass profiles. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2022; 2(60):15-23. DOI: 10.52409/20731523_2022_2_15. EDN: BHRXOY. (rus.).
17. Kromoser B., Ritt M., Spitzer A., Stangl R., Idam F. Design concept for a greened timber truss bridge in city area. *Sustainability*. 2020; 12(8):3218. DOI: 10.3390/su12083218
18. Minarni I., Wardhana H., Asyari M., Mursadin A. Innovation of substitute material to conservation effort of Eusideroxylon Zwageri on wooden bridge maintenance project. *Technium Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*. 2021; 3(8):103-109. DOI: 10.47577/technium.v3i8.4934
19. Švajlenka J., Kozlovská M. Constructions of buildings based on solid wooden elements. *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021; 1203(2):022073. DOI: 10.1088/1757-899X/1203/2/022073

20. Abrar M., Farooqi M.U. Impacts of floods on bridges — a review. *1st International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*. 2021.

21. Vereskun A.V., Faizulin T.Sh., Oltyan I.Yu., Baida S.E., Zinoviev S.V., Baryshev E.M. et al. *A Comprehensive Study of the Impact of Risks of Natural and Man-made Emergencies on the Life Safety of the Population of the Republic of Crimea and the City of Sevastopol*. Moscow, 2015; 208. (rus.).

22. Gbaa S. Analysis of flood disaster adaptation strategies among people of Guma local government area, Benue State, Nigeria. *Indonesian Journal of Earth Sciences*. 2022; 2(2):226-235. DOI: 10.52562/injoes.v2i2.415

23. Kuznetsov G.F. *Handbook of the Designer of Industrial Structures. Wooden Structures*. Moscow, Sroizdat Publ., 1937; 955. (rus.).

24. Kharlamova A.S., Ulko A.A. Analysis of wooden structure connection using fiberglass and steel dowel pins. *Synergy of Sciences*. 2019; 31:783-789. (rus.).

Received March 2, 2023.

Adopted in revised form on March 31, 2023.

Approved for publication on April 19, 2023.

B I O N O T E S: **Tagir A. Zinnurov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Automobile Roads, Bridges and Tunnels; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ID RISC: 800952, Scopus: 57208107876, ORCID: 0000-0002-7238-2883; leongar@mail.ru;

Egor V. Novitsky — Laboratory assistant of the Department of Automobile Roads, Bridges and Tunnels; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation; egorka.no@gmail.com.

Contribution of the authors:

Tagir A. Zinnurov — scientific guidance, research concept, development of methodology, final conclusions.

Egor V. Novitsky — conducting and analyzing research results, forming the research structure.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Комплексный модификатор на основе алюминатного цемента и пуццолановой добавки

Нгуен Зоан Тунг Лам, Светлана Васильевна Самченко

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Наиболее популярным вяжущим для производства бетонов являются неорганические вяжущие вещества. Все большее применение находят композиционные вяжущие вещества (КВВ) на основе портландцемента (ПЦ) с целью получения высококачественных бетонов, улучшения эффективности использования цемента в бетоне, а также решения проблем энерго- и ресурсосбережения за счет снижения количества клинкера в составе цемента.

Материалы и методы. Изучены свойства композиционного вяжущего, состоящего из ПЦ, глиноземистого цемента (ГЦ), природного гипса и активной минеральной добавки. Использовали метод планирования экспериментов Бокса – Уилсона. Для определения нормальной густоты цементного теста (НГ ЦТ) выбран стандартный метод испытаний, согласно ГОСТ 310.3–76. Исследование проведено в лаборатории кафедры строительного материаловедения НИУ МГСУ.

Результаты. Установлено, что при введении добавок увеличивается НГ ЦТ. Это объясняется тем, что в состав комплексной добавки входит трепел и ГЦ. Трепел — природная пористая горная порода, обладающая высокоразвитой поверхностью. Глиноземистый цемент оказывает большое влияние на НГ и сроки схватывания, так как очень быстро вступает в реакцию гидратации с образованием новых соединений уже в первую минуту от начала затворения вяжущего водой. Зависимость НГ от количественного содержания добавок представлена в виде уравнения регрессии и изображения поверхности.

Выводы. Проведен анализ влияния составов на исследуемые свойства на базе полученных результатов. При увеличении содержания алюминатного цемента и трепела увеличивается НГ полученного вяжущего, содержание природного гипса не влияет на НГ КВВ. Основываясь на результатах исследования, в будущем авторы продолжат изучение свойств вяжущих материалов на основе комплексной расширяющей и пуццолановой добавки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композиционная добавка, нормальная густота, цементная паста, трепел, планирование экспериментов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Нгуен Зоан Тунг Лам, Самченко С.В. Комплексный модификатор на основе алюминатного цемента и пуццолановой добавки // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С. 709–716. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.709-716

Автор, ответственный за переписку: Нгуен Зоан Тунг Лам, nguyendoantunglam1110@gmail.com.

Complex modifier based on alumina cement and pozzolanic addition

Nguyen Doan Tung Lam, Svetlana V. Samchenko

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

ABSTRACT

Introduction. The most popular binders for the concrete production are inorganic binders. Composite binding agents (CB) based on Portland cement are increasingly being used to produce high-quality concretes, improve the efficiency of cement use in concrete, as well as to solve the problem of energy and resource saving by reducing the amount of clinker in the cement composition.

Materials and methods. The properties of a composite binder consisting of Portland cement, alumina cement, natural gypsum and an active mineral additive, were studied. The Box – Wilson experiment design method was used. To determine the standard consistency of the cement paste, the standard test method was chosen according to GOST 310.3–76. The research was carried out in the laboratory of the Department of Building Materials Science of Moscow State University of Civil Engineering.

Results. It was found that with the introduction of additives normal density of the cement paste increases. This is explained by the fact that the composition of the complex additive includes tripoli and alumina cement. Tripoli is a natural porous rock with a highly developed surface. Alumina cement has a great influence on the normal density and setting time as

it reacts very quickly to form new hydration compounds in the first minute from the start of mixing the binder with water. The dependence of normal density on the quantitative content of additives is presented as a regression equation and surface image.

Conclusions. Based on the results of this study, in the future the authors will continue to study the properties of binders based on a complex expanding and pozzolanic addition.

KEYWORDS: composite additive, standard consistency, cement paste, tripoli, planning of experiments

FOR CITATION: Nguyen Doan Tung Lam, Samchenko S.V. Complex modifier based on alumina cement and pozzolanic addition. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):709-716. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.709-716 (rus.).

Corresponding author: Nguyen Doan Tung Lam, nguyendoantunglam1110@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Для изготовления бетона с целью использования в строительных работах наиболее популярными остаются неорганические вяжущие вещества (НВВ). В зависимости от среды твердения различают гидравлические и воздушные НВВ. Наиболее широкое применение в производстве бетона получил портландцемент (ПЦ) [1–15].

Не только для получения высококачественных бетонов, улучшения эффективности использования цемента в бетоне, но и решения проблемы энергосбережения за счет снижения количества клинкера в составе цемента применяют композиционные вяжущие вещества (КВВ) на основе ПЦ. В этих материалах к основному вяжущему компоненту добавляют специальные добавки и активные минеральные компоненты, в том числе обладающие вяжущими свойствами [4–10, 16–20].

Важным свойством, характеризующим качество вяжущего, является прочность. Кроме прочности для вяжущих устанавливаются и другие характеристики, например удельная поверхность, нормальная плотность (НГ), сроки схватывания и др. Нормальной плотностью называют содержание воды (%), которое следует добавить к цементу, чтобы получить необходимую консистенцию цементного теста (ЦТ), определяемую требованиями стандарта на специальном приборе [1, 21, 22].

В данной статье представлено исследование влияния комплексных добавок, состоящих из глиноземистого цемента (ГЦ), природного гипса (Г) и природной добавки осадочного происхождения трепела (Т) на нормальную плотность ЦТ при замене части ПЦ комплексной добавкой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве сырья использован портландцемент ЦЕМ I 42,5 (Евроцемент М500 Д0), соответствующий требованиям ГОСТ 30515–2013, с удельной поверхностью 3665 см²/г. Комплексная добавка состоит из: глиноземистого цемента ГЦ 40 (SRB 400 Secar) в соответствии с ГОСТ 969–91, гипса в соответствии с ГОСТ 4013–2019 с удельной поверхностью 2230 см²/г и трепела с удельной поверхностью 6350 см²/г.

Для определения нормальной плотности ЦТ выбран стандартный метод испытаний согласно

ГОСТ 310.3–76. Экспериментальная работа выполнена в лаборатории кафедры строительного материаловедения НИУ МГСУ.

Эксперименты по оценке влияния состава добавок, заменяющих ПЦ в составе вяжущего, на нормальную плотность КВВ были запланированы при помощи метода математического планирования эксперимента. Общий вид модели ортогонального композиционного плана Бокса – Уилсона [23–28]:

$$y = c_0 + \sum_{j=1}^h c_j z_j + \sum_{j=1}^h c_{jj} z_j^2 + \sum_{\substack{u,j=1 \\ j \neq u}}^h c_{ju} z_j z_u, \quad (1)$$

где c_0 , c_j , c_{jj} и c_{ju} — коэффициенты регрессии; z_j , z_u — факторы; $z_j z_u$ — взаимодействие между факторами; h — число факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Композиционные вяжущие изготовлены путем смешивания ПЦ, алюминатного цемента (АЦ), природного гипса и трепела (Т). С целью исследования влияния содержания состава добавок в вяжущем использован ортогональный центрально-композиционный план, количество тестов $N = 15$, значение «звездного плеча» $\alpha = 1,215$. Уровни варьирования исследовательских факторов приведены в табл. 1.

После проведения испытаний получены результаты, представленные в табл. 2.

Расчеты выполнены по п. 4.5 работ [23, с. 124–132], п. 4.2 [24] с использованием программы MatLab.

Коэффициент уравнения регрессии рассчитывается по формуле:

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^N z_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^N z_{ji}^2} \quad \forall j = \overline{1...h};$$

$$c_{ju} = \frac{\sum_{i=1}^N z_{ji} z_{ui} y_i}{\sum_{i=1}^N z_{ji}^2 z_{ui}^2} \quad \forall j, u = \overline{1...h}, \quad j \neq u; \quad (2)$$

$$c_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - c_{11} \overline{x_1^2} - \dots - c_{hh} \overline{x_h^2}.$$

Табл. 1. Факторы варьирования

Table 1. Variation factors

Факторы влияния Influencing factors		Уровни варьирования Level variation of factors			Интервал варьирования Variation interval
Наименование факторов Name of factors	Нормализованное значение Variable coding	–1	0	+1	
АЦ, % = $(m_{\text{АЦ}}/m_{\text{КВВ}}) \cdot 100\%$ АС, % = $(m_{\text{АС}}/m_{\text{СВ}}) \cdot 100\%$	z_1	10	12	14	2
Г, % = $(m_{\text{Г}}/m_{\text{КВВ}}) \cdot 100\%$ Г, % = $(m_{\text{Г}}/m_{\text{СВ}}) \cdot 100\%$	z_2	7,5	10	12,5	2,5
Т, % = $(m_{\text{Т}}/m_{\text{КВВ}}) \cdot 100\%$ Тр, % = $(m_{\text{Т}}/m_{\text{СВ}}) \cdot 100\%$	z_3	12	16	20	4

Примечание: $m_{\text{АЦ}}$ — масса алюминатного цемента, заменен ПЦ в КВВ; $m_{\text{Г}}$ — масса природного гипса, заменен ПЦ в КВВ; $m_{\text{Т}}$ — масса природной пуццолановой добавки трепела, заменен ПЦ в КВВ; $m_{\text{КВВ}}$ — масса композиционного вяжущего вещества.

Note: $m_{\text{АС}}$ — mass of alumina cement replaced by PC in CB; $m_{\text{Г}}$ — mass of natural gypsum replaced by PC in CB; $m_{\text{Т}}$ — weight of natural pozzolanic trepel additive replaced by PC in CB; $m_{\text{СВ}}$ — mass of composite binder.

Табл. 2. Результаты испытаний

Table 2. Test results

	Номер опыта Ser. Number	АЦ, % AC, %	Г, % G, %	Т, % Tr, %	Кодированное значение фактора Coded value of the factor			y, %
					z_1	z_2	z_3	
Матрица планирования по методу Бокса – Уилсона Box – Wilson experiment planning method	1	10	7,5	12	–1	–1	–1	36,75
	2	14	7,5	12	+1	–1	–1	37,00
	3	10	12,5	12	–1	+1	–1	35,75
	4	14	12,5	12	+1	+1	–1	37,00
	5	10	7,5	20	–1	–1	+1	41,50
	6	14	7,5	20	+1	–1	+1	43,00
	7	10	12,5	20	–1	+1	+1	41,75
	8	14	12,5	20	+1	+1	+1	42,25
	9	9,57	10	16	–1,215	0	0	38,75
	10	14,43	10	16	1,215	0	0	39,50
	11	12	6,96	16	0	–1,215	0	38,50
	12	12	13,04	16	0	1,215	0	39,25
	13	12	10	11,14	0	0	–1,215	36,50
	14	12	10	20,86	0	0	1,215	42,25
	15	12	10	16	0	0	0	38,75
Повтор опытов в центре плана Repetition of ex- periments in the center of the plan	16	12	10	16	0	0	0	39,00
	17	12	10	16	0	0	0	38,50
	18	12	10	16	0	0	0	38,50

Значимость коэффициентов уравнения регрессии (1) выбрана критерием Стьюдента. Коэффициент t_{cj} считается значимым, если $t_{cj} \geq t_p(d_2)$. Согласно труду [29] в табл. 3.2 $\Rightarrow t_p(d_2) = 3,1824$ ($p = 0,05$; $d_2 = m - 1 = 4 - 1 = 3$ число степеней свободы). Значение t_{cj} определено по формуле:

$$t_{cj} = \frac{|c_j|}{S_{cj}}. \tag{3}$$

Значение дисперсии коэффициентов регрессии S_{cj} рассчитано по формуле:

$$S_{cj} = \sqrt{\frac{S_{ll}^2}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}}, \tag{4}$$

где S_{ll}^2 — остаточная дисперсия на одну степень свободы.

$$S_{ll}^2 = \frac{\sum_{v=1}^m (y_{0v} - \bar{y}_0)^2}{m - 1}; \tag{5}$$

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{m} \sum_{v=1}^m y_{0v}, \tag{6}$$

где m — количество повторных экспериментов в центре; \bar{y}_0 — среднее значение m экспериментов

в центре; y_{0v} — полученное значение v -го эксперимента в центре.

Проверка адекватности модели выполнена при помощи критерия Фишера по формулам (7) и (8):

$$F_p = \frac{S_d^2}{S_{ll}^2}; \tag{7}$$

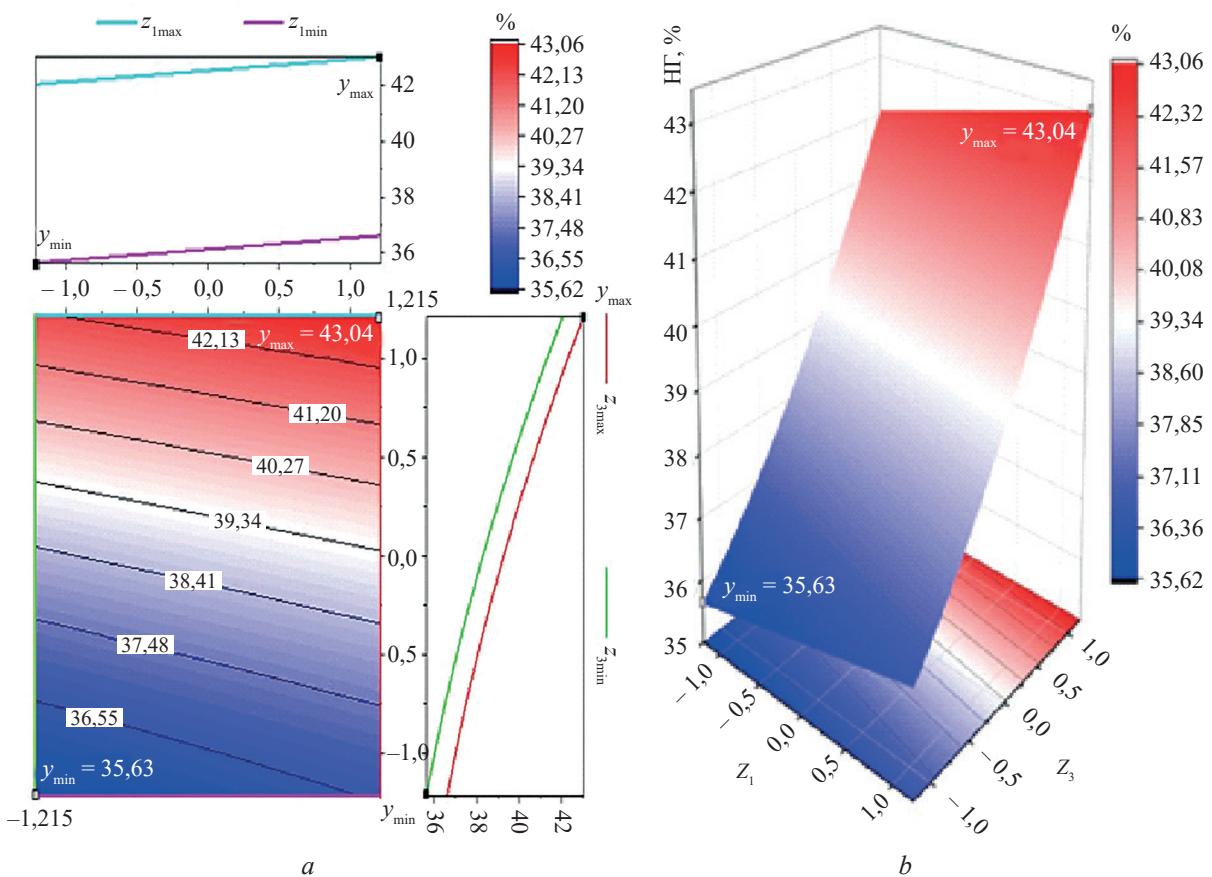
$$S_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - g}, \tag{8}$$

где S_d^2 — значение дисперсии; y_i — значение i -го эксперимента; \hat{y}_i — значение функции, полученное в соответствии с экспериментом i ; g — количество коэффициентов регрессии.

Соответствующее табличное значение критерия Фишера F_p , (d_1, d_2) (d_1 — число степеней свободы дисперсии адекватности: $d_1 = N - g$) определено по табл. 3.5 [29] (процентные точки F -распределения) при уровне значимости $p = 0,05$. Полученное соотношение $F_p < F_{\tau}$ позволяет принять гипотезу об адекватности регрессионной модели.

Получили уравнение регрессии, представленное ниже:

$$y = 38,785 + 0,403z_1 + 2,647z_3 + 0,374z_3^2. \tag{9}$$



Поверхность уравнения регрессии (9)

Regression equation surface (9)

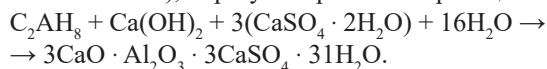
Табл. 3. Экстремальные значения НГ

Table 3. Extreme values of standard consistency

у, %	Кодированное значение Values coding of factor			АЦ, % AC, %	Г, % G, %	Т, % Tr, %
	z_1	z_2	z_3			
$y_{\max} = 43,04$	+1,215	–	+1,215	14,43	–	20,86
$y_{\min} = 35,63$	–1,215	–	–1,215	9,57	–	11,14

Получено изображение поверхностей выражения целевой функции для уравнений регрессии (9) (рис.) с помощью компьютерной программы MatLab.

Проанализировав уравнение (9) и рисунок, можно сделать вывод, что фактор z_2 (Г) практически не оказывает влияния на нормальную густоту КВВ, факторы z_1 (АЦ) и z_3 (Т) влияют на нормальную густоту композиционного вяжущего вещества, однако коэффициенты взаимодействий отсутствуют. Зависимость у от фактора z_1 (АЦ) является линейной с отсутствием квадратичного члена. С увеличением количества глиноземистого цемента в составе вяжущего, соответствующего нормализованному значению фактора z_1 , отклик увеличивается при любых значениях остальных факторов. Глиноземистый цемент преимущественно состоит из алюминатов кальция различного состава: C_3A , CA , $C_{12}A_7$, CA_2 . В состав ПЦ также входит трехкальциевый алюминат. По мнению Т.В. Кузнецовой, С.В. Самченко, при взаимодействии алюминатов с водой в начале этапа быстро образуются гексагональные гидроалюминаты кальция: $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$ (CAH_{10}), $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$ (C_2AH_8) и $Al(OH)_3$. Но при добавлении к портландцементу ГЦ выделяющийся при гидратации ПЦ $Ca(OH)_2$ быстро соединяется с появляющимся при твердении ГЦ гидроалюминатом кальция и гипсом (сначала в реакцию вступает гипс, присутствующий в составе ПЦ, так как он обладает большей удельной поверхностью, нежели добавленный гипс), образуя этtringит по реакции:



В результате $Ca(OH)_2$ из сферы действия реакции исчезает, что значительно ускоряет ход гидролиза $CaO \cdot Al_2O_3$ и $3CaO \cdot SiO_2$. Процесс конденсационных структур при этом сильно ускоряется. Как следствие, нормальная густота увеличивается, поскольку пестик

прибора Вика оказывается неспособен погрузиться в ЦТ при стандартном количестве воды для цементов (25–32 % от массы цемента). Для фактора z_3 (Т) зависимость отклика от z_3 описывается уравнением параболы (коэффициент $c_{33} = 0,374$ отличен от нуля). Но вершина параболы находится вне диапазона варьирования, так как $|c_3| > 2 \cdot |c_{33}|$ ($2,647 > 2 \cdot 0,374$) (линейный член имеет большее влияние на отклик). Анализируя рисунок, можно отметить тенденцию увеличения НГ с увеличением z_3 (Т). Это связано с тем, что трепел имеет высокую удельную поверхность ($6355 \text{ см}^2/\text{г}$) и значительно повышает водопотребность КВВ. Полученные значения НГ изменяются в интервале от 35,63 до 43,04 %. Экстремальные значения НГ представлены в табл. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировав данные, полученные в ходе эксперимента, можно сделать следующие выводы:

- используя алгоритм экспериментального планирования, найдено уравнение регрессии, описывающее взаимосвязь между целевыми функциями в зависимости от количества содержания добавок $y = 38,785 + 0,403z_1 + 2,647z_3 + 0,374z_3^2$, и с помощью компьютерных программ получены изображения поверхностей уравнения (9);
- проведен анализ влияния составов на исследуемые свойства на базе полученных результатов. При увеличении содержания АЦ и трепела увеличивается НГ полученного вяжущего, содержание природного гипса не влияет на НГ КВВ;
- НГ достигла максимального значения, равного 43,04 %, при следующем содержании добавок: АЦ = 14,43 %; Т = 20,86 %. НГ имела минимальное значение, равное 35,63 %, при содержании добавок: АЦ = 9,57 %; Т = 11,14 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2011. 528 с.
2. Кузнецова Т.В., Сычев М.М., Осокин А.П., Судакас Л.Г. Специальные цементы. СПб.: Стройиздат, 1997. 314 с.

3. Vũ Đình Đầu, Bùi Danh Đại. Chất kết dính vô cơ. Hà Nội: Nhà xuất bản Xây dựng. 2012. 275 trang. (Бу Динь Дау, Буи Зань Дай. Неорганические вяжущие вещества. Ханой: Изд-во «Строительство», 2012. 275 с.).

4. *Phùng Văn Lự, Phạm Duy Hữu, Phan Khắc Trí.* Vật liệu xây dựng. Hà Nội. Nhà xuất bản giáo dục. 2007. 347 trang. (Фунг Ван Лы, Фам Зуи Хыу, Фан Кхак Чи. Строительные материалы. Ханой : Издательство образование, 2007. 347 с.).

5. Патент РФ № 2776542С1. Наполнитель для композиционных материалов, его применение, вяжущая композиция и композиционный материал / Н.П. Горленко, Н.Н. Дебелова, Ю.С. Саркисов, А.Ф. Хусаинов, В.В. Орлышев, И.Г. Климов, Т.Р. Залимов, С.А. Назаров; заявл. 28.05.2021, опубл. 22.07.2022. Бюл. № 21.

6. Местников А.Е., Кудяков А.И., Рожин В.Н. Портландцемент с природными активными минеральными добавками // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 2. С. 192–201. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-192-201

7. Жукова Н.С., Жуков А.Н., Гордина А.Ф., Яковлев Г.И., Кузьмина Н.В., Стивенс А.Э. Гипсовые вяжущие с комплексными добавками на основе алюмосиликатов и портландцемента // Вестник ВСГУТУ. 2022. № 1 (84). С. 49–56. DOI: 10.53980/24131997_2022_1_49

8. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Бикбаев Р.Р., Пиксайкина А.А. Исследование свойств портландцементов с активной минеральной добавкой на основе трепела // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». 2019. № 3 (11). С. 7–17. DOI: 10.25686/2542-114X.2019.3.7

9. Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Марушко М.В. Применение композиционных вяжущих в технологии ячеистого бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 2. С. 10–16. DOI: 10.12737/article_5a816bda646a22.41029804

10. Устюгов А.С., Шепеленко Т.С. Минеральная добавка для цемента // Избранные доклады 66-й университетской науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. 2020. С. 464–465.

11. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 144. Pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015

12. Lippiatt N., Ling T.-C., Pan S.-Y. Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective // Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 28. P. 101062. DOI: 10.1016/j.job.2019.101062

13. De Souza Azevedo A.G., Strecker K. Brazilian fly ash based inorganic polymers production using different alkali activator solutions // Ceramics International. 2017. Vol. 43. Issue 12. Pp. 9012–9018. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.04.044

14. Tene Fongang R.T., Pemndje J., Lemougna P.N., Chinje Melo U., Nanseu C.P., Nait-Ali B. et al. Cleaner production of the lightweight insulating compo-

sites: Microstructure, pore network and thermal conductivity // Energy and Buildings. 2015. Vol. 107. Pp. 113–122. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.08.009

15. Celik K., Meral C., Petek Gursel A., Kumar Mehta P., Horvath A., Paulo Monteiro J.M. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder // Cement and Concrete Composites. 2015. Vol. 56. Pp. 59–72. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003

16. Torres A., Bartlett L., Pilgrim C. Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 135. Pp. 674–681. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.028

17. Paris J.M., Roessler J.G., Ferraro C.C., De-Ford H.D., Townsend T.G. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 121. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.013

18. Azevedo A.G.S., Strecker K. Kaolin, fly-ash and ceramic waste based alkali-activated materials production by the “one-part” method // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 269. P. 121306. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121306

19. Athira V.S., Charitha V., Athira G., Bahurudeen A. Agro-waste ash based alkali-activated binder: Cleaner production of zero cement concrete for construction // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 286. P. 125429. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125429

20. Matalkah F., Xu L., Wu W., Soroushian P. Mechanochemical synthesis of one-part alkali aluminosilicate hydraulic cement // Materials and Structures. 2017. Vol. 50. Issue 1. DOI: 10.1617/s11527-016-0968-4

21. Althaf Sk., Janardhan Dr.M., Hithender Reddy Ch. Partial replacement of cement with metakoline and sand with foundry sand in self compacting concrete // Journal of Engineering Sciences. 2022. Vol. 13. Issue 06. Pp. 1624–1632. URL: <https://jespublication.com/upload/2022-V13I6213.pdf>

22. Li F., Liu J.S. An experimental investigation of hydration mechanism of cement with silicane // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 166. Pp. 684–693. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.164

23. Александрова О.В., Мацеевич Т.А., Кирьянова Л.В., Соловьев В.Г. Статистические методы решения технологических задач : учебное пособие. М. : Изд-во МГСУ, 2017. 153 с.

24. Nguyễn Minh Tuyển. Quy hoạch thực nghiệm. Hanoi : NXB Khoa học và Kỹ thuật. 2007. 264 p. (Нгуен Минь Туен. Планирование эксперимента. Ханой : Изд-во «Наука и Технологии», 2007. 264 с.).

25. Ву К.З., Баженова С.И., До М.Ч., Хоанг М.Т., Нгуен В.З., Нгуен З.Т.Л. Оптимизация пропорций смеси пенобетона с использованием плана экспериментов Бокса – Уилсона // Инженерный вестник Дона. 2021. № 5. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n5y2021/6988>

26. Абомелик Т.П. Методология планирования эксперимента : методические указания к лабораторным работам для студентов специальности 21020165. Ульяновск : УлГТУ, 2006. 37 с.

27. Астахова Л.Г. Математическая теория планирования эксперимента : методические указания. Владикавказ : Изд-во «Терек», 2013. 96 с.

Поступила в редакцию 23 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 23 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 19 апреля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Нгуен Зоан Тунг Лам — аспирант кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5706-4917, ResearcherID: HGU-5702-2022, ORCID: 0000-0001-9061-8426; nguyendoantunglam1110@gmail.com;

Светлана Васильевна Самченко — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 653449, Scopus: 56575166100, ResearcherID: E-9534-2017, ORCID: 0000-0002-3523-593X; samchenko@list.ru.

Вклад авторов:

Нгуен Зоан Тунг Лам — анализ источников и литературы, построение экспериментальной модели, проведение экспериментальной работы, анализ полученных результатов, построение математической модели, формулирование выводов.

Самченко С.В. — идея статьи, научное руководство, формулирование концепции исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M. *Concrete technology*. Moscow, Publishing House ASV, 2011; 524. (rus.).

2. Kuznetsova T.V., Sychev M.M., Osokin A.P., Sudakas L.G. *Special cements*. St. Petersburg, Stroyizdat Publ., 1997; 314. (rus.).

3. Vũ Đình Dấu, Bùi Danh Đại. Chất kết dính vô cơ. Hà Nội, Nhà xuất bản Xây dựng, 2012; 275. (Vu Dinh Dau, Bui Danh Dai. *Inorganic binders*. Hanoi, Construction Publishing house, 2012; 275.). (viet.).

4. Phùng Văn Lự, Phạm Duy Hữu, Phan Khắc Trí. *Vật liệu xây dựng*. Hà Nội, Nhà xuất bản giáo dục, 2007; 347. (Phung Van Lu, Pham Duy Huu, Phan Khac Tri. *Building materials*. Hanoi, Education Publishing house, 2007; 347.). (viet.).

5. Patent RU No. 2776542C1. *Filler for composite materials, its application, binder composition and composite material* / N.P. Gorlenko, N.N. Debelova, Yu.S. Sarkisov, A.F. Khusainov, V.V. Orlyshev, I.G. Klimov, T.R. Zalimov, S.A. Nazarov; decl. May 28, 2021, publ. July 22, 2022. Bul. No. 21. (rus.).

6. Mestnikov A.E., Kudryakov A.I., Rozhin V.N. Portland cement with natural mineral additives. *Journal of Construction and Architecture*. 2019; 2:192-201. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-192-201 (rus.).

7. Zhukova N.S., Zhukov A.N., Gordina A.F., Yakovlev G.I., Kuzmina N.V., Stivens A.E. Gypsum binders with complex additives based on aluminosilicates

28. Конопленько Е.И., Хореева Н.К., Ланусь А.П. Планирование эксперимента : методические указания. М. : Московский государственный университет пищевых производств, 2011. 44 с.

29. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М. : Наука, 1983. 416 с.

and portland cement. *ESSUTM Bulletin*. 2022; 1(84): 49-56. DOI: 10.53980/24131997_2022_1_49 (rus.).

8. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bikbaev R.R., Piksaikina A.A. Research of properties of portland cement with active mineral additive on the basis of tripoli. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2019; 3(11): 7-17. DOI: 10.25686/2542-114X.2019.3.7 (rus.).

9. Suleimanova L.A., Pogorelova I.A., Marushko M.V. Application of composite binders in cellular concrete technology. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 2:10-16. DOI: 10.25686/2542-114X.2019.3.7 (rus.).

10. Ustyugov A.S., Shepelenko T.S. Mineral additive for cement. *Selected papers of the 66th University Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists*. 2020; 464-465. DOI: 10.12737/article_5a816bda646a22.41029804 (rus.).

11. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 144:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015

12. Lippiatt N., Ling T.-C., Pan S.-Y. Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective.

Journal of Building Engineering. 2020; 28:101062. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101062

13. De Souza Azevedo A.G., Strecker K. Brazilian fly ash based inorganic polymers production using different alkali activator solutions. *Ceramics International*. 2017; 43(12):9012-9018. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.04.044

14. Tene Fongang R.T., Pemndje J., Lemougna P.N., Chinje Melo U., Nanseu C.P., Nait-Ali B. et al. Cleaner production of the lightweight insulating composites: Microstructure, pore network and thermal conductivity. *Energy and Buildings*. 2015; 107:113-122. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.08.009

15. Celik K., Meral C., Petek Gursel A., Kumar Mehta P., Horvath A., Paulo Monteiro J.M. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*. 2015; 56:59-72. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003

16. Torres A., Bartlett L., Pilgrim C. Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete. *Construction and Building Materials*. 2017; 135:674-681. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.028

17. Paris J.M., Roessler J.G., Ferraro C.C., DeFord H.D., Townsend T.G. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 121:1-18. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.013

18. Azevedo A.G.S., Strecker K. Kaolin, fly-ash and ceramic waste based alkali-activated materials production by the “one-part” method. *Construction and Building Materials*. 2021; 269:121306. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121306

19. Athira V.S., Charitha V., Athira G., Bahurudeen A. Agro-waste ash based alkali-activated binder: Cleaner production of zero cement concrete for construction. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 286:125429. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125429

20. Matalkah F., Xu L., Wu W., Soroushian P. Mechanochemical synthesis of one-part alkali alumi-

nosilicate hydraulic cement. *Materials and Structures*. 2017; 50(1). DOI: 10.1617/s11527-016-0968-4

21. Althaf Sk., Janardhan Dr. M., Hithender Reddy Ch. Partial replacement of cement with meta-koline and sand with foundry sand in self compacting concrete. *Journal of Engineering Sciences*. 2022; 13(06):1624-1632. URL: <https://jespublication.com/upload/2022-V13I6213.pdf>

22. Li F., Liu J.S. An experimental investigation of hydration mechanism of cement with silicane. *Construction and Building Materials*. 2018; 166:684-693. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.164

23. Aleksandrova O.V., Matseevich T.A., Kir'yanova L.V., Solov'ev V.G. *Statistical Methods for Solving Technological Problems : tutorial*. Moscow, MGSU Publishing House, 2017; 153. (rus.).

24. Nguyễn Minh Tuyền. *Quy hoạch thực nghiệm*. Hanoi, NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2007; 264. (Nguyen Minh Tuyen. *Experiment planning*. Hanoi, Science and Technology Publishing House, 2007; 264). (viet.).

25. Vu K.D., Bazhenova S.I., Do M.C., Hoang M.T., Nguyen V.D., Nguyen D.T.L. Optimization of foam concrete mixture ratio using the Box – Wilson experimental plan. *Engineering Journal of Don*. 2021; 5. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6988> (rus.).

26. Abomelik T.P. *Methodology for planning of experiment : collection of laboratory works for students of the specialty 21020165*. Ulyanovsk, UIGTU, 2006; 37. (rus.).

27. Astakhova L.G. *Mathematical theory of experiment planning : tutorial*. Vladikavkaz, Terek Publishing House, 2013; 96. (rus.).

28. Konoplenko E.I., Khoreeva N.K., Lapus A.P. *Guidelines for the course “Experiment Planning” for students of correspondence courses*. Moscow, Moscow State University of Food Production, 2011; 44. (rus.).

29. Bolshev L.N., Smirnov N.V. *Mathematical statistics tables*. Moscow, Nauka Publ., 1983; 416. (rus.).

Received January 23, 2023.

Adopted in revised form on March 23, 2023.

Approved for publication on April 19, 2023.

BIONOTES: **Nguyen Doan Tung Lam** — postgraduate of the Department of Building Material Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5706-4917, ResearcherID: HGU-5702-2022, ORCID: 0000-0001-9061-8426; nguyendoantunglam1110@gmail.com;

Svetlana V. Samchenko — Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Building Material Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 653449, Scopus: 56575166100, ResearcherID: E-9534-2017, ORCID: 0000-0002-3523-593X; samchenko@list.ru

Contribution of the authors:

Nguyen Doan Tung Lam — literature analysis, experimental model building, experimental work, analysis experimental data, mathematical model building, conclusion for a research paper.

Svetlana V. Samchenko — main idea of article, scientific leadership, creating a plan of research.

The authors declare no conflict of interest.

Трехмерное моделирование эрозии трубопровода с двойным коленом в многофазной среде метан – вода – песок

Алиреза Тахерифард, Виктор Васильевич Елистратов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В газовой индустрии прогнозирование эрозионного повреждения трубопроводов частицами песка является сложной задачей, так как на этот процесс оказывает сильное влияние множество факторов. Твердые частицы, уносимые многофазным продуктом во время добычи, могут серьезно нарушить целостность конструкций для транспортировки жидкости, таких как трубопроводы и колена.

Материалы и методы. Использован подход трехмерного численного моделирования в трехфазных потоках «газ – жидкость – твердое тело», проанализированы процессы эрозии в коленах труб. Ключевым преимуществом использования методов CFD (Computational Fluid Dynamics — методы вычислительной гидродинамики) служит то, что они могут предоставить большой объем информации, такой как влияние различных параметров на эрозию, максимальную скорость эрозии и районы, подверженные эрозии. Для моделирования трехмерных нестационарных газожидкостных кольцевых течений с наличием частиц песка применялись вариации метода Эйлера для многофазных жидкостей.

Результаты. Установили, что вертикальная труба с двумя коленами более подвержена эрозии на втором колене, чем на первом колене. Однако в горизонтальной трубе с двумя коленами можно сделать вывод, что первое колено более подвержено эрозии. Эрозия при $L/D = 0$ показала максимальное значение скорости эрозии среди всех изученных геометрий.

Выводы. В вертикальной трубе второе колено трубопровода более подвержено эрозии. Скорость эрозии на втором колене вертикальных и горизонтальных труб одинакова для всех исследованных геометрий. Трубопровод с $L/D = 10$ продемонстрировал оптимальный вариант выбора компоновки для вертикальной и горизонтальной трубы со средним значением скорости эрозии 57,9 мм/год, что представляет самую низкую скорость эрозии среди изученных вариантов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кольцевое течение, эрозия, многофазное течение, труба с двойным коленом, метод Эйлера, вертикальный трубопровод, горизонтальный трубопровод

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тахерифард А., Елистратов В.В. Трехмерное моделирование эрозии трубопровода с двойным коленом в многофазной среде метан – вода – песок // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С. 717–725. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.717-725

Автор, ответственный за переписку: Алиреза Тахерифард, taherifard.a@edu.spbstu.ru.

3D Modelling of double elbow pipeline erosion in methane – water – sand multiphase medium

Alireza Taherifard, Victor V. Elistratov

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

ABSTRACT

Introduction. In gas industry, predicting sand erosion damage of pipelines by sand particles is a difficult task because this process is strongly influenced by many factors. Particulate matter carried away by the multiphase product during production can seriously compromise the integrity of fluid handling structures such as pipelines and elbows.

Materials and methods. A three-dimensional numerical modelling approach in three-phase gas – liquid – solid flows was used to analyze erosion processes in pipe elbows. A key advantage of using CFD is that it can provide a wealth of information such as the effect of various parameters on erosion, maximum erosion rate, and erosion-prone areas. A variation of the Euler method for multiphase fluids was used to simulate three-dimensional unsteady gas-water annular flows with the presence of sand particles.

Results. The results showed that a vertical pipe with two elbows is more prone to erosion at the second elbow than at the first elbow. However, in a horizontal pipe with two elbows, it can be concluded that the first elbow is more prone to erosion. On the other hand, erosion at $L/D = 0$ showed the maximum erosion rate among all the geometries studied.

Conclusions. In a vertical pipe, the second elbow of the pipeline is more susceptible to erosion. In addition, the erosion rate at the second elbow of vertical and horizontal pipes is the same for all studied geometries. The pipeline with $L/D = 10$ showed the optimal layout choice for vertical and horizontal pipe with an average erosion rate of 57.9 mm/year, which represents the lowest erosion rate among the options studied.

KEYWORDS: annular flow, erosion, multiphase flow, double elbow pipe, Euler's method, vertical pipeline, horizontal pipeline

FOR CITATION: Taherifard A., Elistratov V.V. 3D Modelling of double elbow pipeline erosion in methane – water – sand multiphase medium. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):717-725. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.717-725 (rus.).

Corresponding author: Alireza Taherifard, taherifard.a@edu.spbstu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Эрозия представляет собой удаление частиц материала с поверхности трубы, вызванное столкновением твердых частиц с внутренней поверхностью труб, и является одной из основных проблем во многих промышленных системах транспортировки.

Эрозия песчаных частиц в трубопроводах приводит к серьезным отказам оборудования при добыче газа и может ограничить максимальные показатели добычи [1]. В работе [2] указано, что ущерб от износа в трубопроводах при промышленной добыче газа может составлять 8 %. О случаях, связанных с выходом из строя труб, по которым проходит легковоспламеняющееся топливо, такое как природный газ, сообщается редко. Примерами аварий трубопровода из-за эрозии являются газопровод высокого давления в северной части Пакистана [3] и сеть газопроводов на заводе по добыче газа в северной Мексике [4]. В обоих случаях разрушение материала из-за эрозии стало ключевым фактором, способствующим выходу труб из строя. Примерами выхода из строя трубопроводов по причине эрозии при прокачке газа с содержанием жидкого топлива могут служить системы транспортировки в Кувейте [5] и Бразилии [6]. На рис. 1 показаны трассы трубопроводов на восточном участке Оренбургского газоконденсатного месторождения ООО «Газпром добыча Оренбург».



Рис. 1. Газовая скважина на восточном участке ООО «Газпром добыча Оренбург»

Fig. 1. Gas well in the eastern part of Orenburg

Способность прогнозировать скорость эрозии в производственных трубопроводах газа — главный фактор снижения частоты отказов. Проведены многочисленные исследования по прогнозированию скорости эрозии в однофазных и двухфазных системах. Однако остается еще много вопросов

в отношении эрозии в газожидкостно-песчаных потоках. На эрозию в них влияют такие факторы, как характер течения, свойства жидкости, форма, размер частиц, концентрация песка, а также материал и конфигурация трассы трубопровода. Один из подходов к прогнозированию скорости эрозии — использование методов вычислительной гидродинамики (CFD).

Многие аспекты моделирования процесса эрозии и ущерба, причиняемого ей, изучаются более 50 лет, начиная с работы I. Finnie [7]. Позже J.G.A. Bitter [8] улучшил модель эрозии I. Finnie. Авторы труда [9] представили описание эрозийного поведения хрупких и пластичных материалов в трубах. Впоследствии G.C. Pereira [10] обнаружил, что модель эрозии Y.I. Oka [11] в сочетании с моделью восстановления G. Grant, W. Tabakoff [12] приводит к более реалистичным результатам по сравнению с другими моделями. J. Chen [13] применил метод CFD для изучения эрозии потоком песка для различных форм трубопровода. Основным открытием было то, что скорость эрозии увеличивается с увеличением угла колена. С.А.Р. Duarte [14] обсуждал эрозию через 90-градусное колено с вихревой камерой. Он показал, что вихревая камера повышает эффективность противозерозионного воздействия, а по сравнению со стандартным коленом заметно снижается максимальная скорость эрозии. Автор работы [15] сообщил о влиянии размеров сетки CFD и моделей турбулентности на прогнозирование скорости эрозии мелких частиц в стандартном колене. Он использовал модель турбулентности с числом Рейнольдса $k-\varepsilon$ для учета эффектов турбулентности. M.R. Banakermani [16] изучал скорость эрозии для широкого диапазона углов колена от 15 до 90° при коленах от вертикального до горизонтального и от горизонтального до горизонтального. Скорость эрозии в нескольких обратных коленах, включая стандартные и удлиненные колена, численно исследовалась в публикациях [17, 18].

B.S. McLaury [19] представил механистический подход к прогнозированию скоростей эрозии частиц песка в коленах для пробкового и кольцевого течения [20]. D. Peng [21] отметил, что методы CFD способны предсказывать скорость эрозии в многофазных потоках. Он изучил влияние траекторий движения песка на скорость эрозии и сравнил результаты CFD с эмпирическими моделями. Автор работы [22] предложил простую процедуру, основанную на CFD, для прогнозирования ско-

рости эрозии в кольцевых потоках. Он наблюдал заметное уменьшение эрозии в колене при кольцевом потоке. М. Parsi [23] использовал модель CFD для моделирования газожидкостных потоков в стандартном колене со скоростями в начальном сечении для газа 10,3, 18,1 и 27,3 м/с, для жидкости во всех случаях моделирования была принята скорость 0,3 м/с. Он исследовал зависимость скорости эрозии и сделал вывод, что CFD-анализ может предсказать не только характер и место эрозии, но и ее величину в приемлемом временном диапазоне (рис. 2).

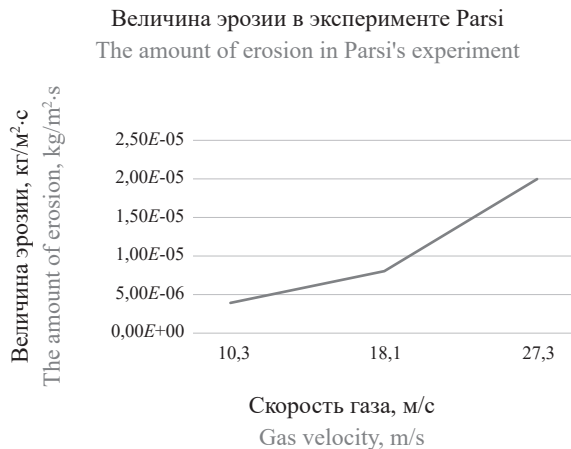


Рис. 2. Изменение величины эрозии многофазного потока для трубопровода с одним коленом в зависимости от скорости газа [23]

Fig. 2. Change in the amount of erosion of a multiphase flow for a pipeline with one elbow depending on the gas velocity [23]

С целью моделирования потоков «воздух – вода» с низким расходом жидкости и высокой скоростью газа в стандартной трубе [24] применялся метод Эйлера для многофазных жидкостей и Multi-Fluid VOF; полученные результаты сравнивались с экспериментальными данными. Показано, что модель Эйлера для многофазных жидкостей более стабильна и требует меньшего компьютерного времени.

В работе [25] авторы использовали методы моделирования CFD для изучения скорости эрозии в многофазных потоках. Они соединили модель Эйлера для многофазных жидкостей с лагранжевым подходом и нашли хорошее согласие с экспериментальными данными. Их результаты показали, что максимальная скорость эрозии происходит на угле 45° в стандартном колене.

Рассмотрение выполненных ранее исследований показывает, что методы CFD-анализа использовались в основном в двухфазных потоках. Некоторые исследователи численно изучили проблему эрозии в трехфазных потоках, однако анализировались характер движения и процесс эрозии в трубопроводах с одним коленом.

Цель данной работы — создание модели движения турбулентного трехфазного потока (газ – жидкость – твердая частица) в жестком трубопроводе и исследование характера эрозии в трубопроводах с двойным коленом с разным отношением длины к диаметру.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящем исследовании при CFD-моделировании эрозии использованы три фазы потока: жидкости (вода); газа (метан), и твердая фаза (кварцевый песок).

Для достижения цели поток «газ – вода – песок» был смоделирован с помощью метода Эйлера для многофазных жидкостей. Для решения основных уравнений и отслеживания границы раздела для несжимаемых многофазных потоков применялся гибридный подход Эйлера [26, 27]. Расчеты выполнены в программном комплексе ANSYS.

С целью создания модели движения использованы следующие основные уравнения.

Уравнение импульса для несжимаемого потока для каждой фазы:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k) + \nabla(\rho_k \alpha_k V_k) = -\alpha_k \nabla p + \nabla[\alpha_k (\tau_k + \tau_{tk})] + \rho_k \alpha_k g + M_{S,k}, \quad (1)$$

где индекс k обозначает фазу (газ, вода и твердая фаза); ρ , α , V , τ и τ_t — плотность, объемная доля газа, скорость движения фаз, молекулярное напряжение и турбулентное напряжение; $M_{S,k}$ — средний межфазный момент передачи импульса.

В настоящем исследовании для анализа скорости эрозии в многофазном кольцевом потоке использованы уравнения из модели Y.I. Ока [11]:

$$ER(\theta) = 10^{-9} \rho_w K(Hv)^{k_1} \left(\frac{V_p}{V^*} \right)^{k_2} \left(\frac{d_p}{d^*} \right)^{k_3} F(\theta); \quad (2)$$

$$F(\theta) = (\sin\theta)^{n_1} (1 + Hv(1 - \sin\theta))^{n_2}; \quad (3)$$

$$n_1 = s_1 (Hv)^{q_1}; \quad (4)$$

$$n_2 = s_2 (Hv)^{q_2}; \quad (5)$$

$$k_3 = 2,3(1/Hv)^{0,038}, \quad (6)$$

где ER — величина эрозии; ρ_w и Hv — плотность, кг/м³ и твердость материала трубопровода по Виккерсу, ГПа; V_p — скорость удара частицы о трубу, м/с; d_p — диаметр частиц мкм; $V^* = 104$ м/с, контрольная скорость соударения с материалом трубопровода; $d^* = 326$ мкм, контрольный диаметр частицы. Значения постоянных коэффициентов K , k_1 , k_3 , s_1 , s_2 , q_1 и q_2 приведены в табл. 1 [11] для принятого материала трубопровода и типа частиц (кубической формы).

Табл. 1. Значения эмпирических параметров в модели Y.I. Oka

Table 1. Values of empirical parameters in the Y.I. Oka model

Эмпирические параметры Empirical parameters	Значение Value
K	60
k_1	-0,12
k_3	0,19
s_1	0,71
s_2	2,4
q_1	0,14
q_2	-0,94

Величина эрозии, кг/м²·с, преобразуется в скорость эрозии, мм/год, с использованием уравнения (7):

$$WR = ER \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1000 \text{ мм}}{1 \text{ м}} \cdot \frac{3,1557e07}{1 \text{ год}}, \quad (7)$$

где WR — скорость эрозии; ER — величина эрозии, кг/м²·с; ρ — плотность стенки трубы, м³/кг. В расчетах используется материал трубы из нержавеющей стали 316 [28].

Начальные условия: в настоящем исследовании принято, что газ и вода поступают на вход трубы в кольцевой форме потока, при этом газ течет по середине, а вода течет по окружности входа трубы. Твердые частицы поступают равномерно по всей площади входа. Начальные значения скорости газа V_g , жидкости V_l и расхода песка, а также свойства материалов приведены в табл. 2.

Табл. 2. Исходные данные по материалам и условиям течения потока

Table 2. Initial data on materials and flow conditions

Материал трубы Pipe material	Сталь 316 Steel 316
Твердость материала трубопровода Hardness of pipeline material	180 ГПа 180 GP
Плотность Density	7900 кг/м ³ 7,900 kg/m ³
Диаметр трубы (D) Pipe diameter (D)	76,2 мм 76.2 mm
Плотность частиц Particle Density	2650 кг/м ³ 2,650 kg/m ³
Размер частицы Particle size	300 мкм 300 μm
Форма частиц Particle shape	Сферическая Spherical
Скорость газа Gas velocity	37,5 м/с 37.5 m/s
Скорость воды Water velocity	0,3 м/с 0.3 m/s
Расход песка Sand flow rate	0,0256 кг/с 0.0256 kg/s

В этой работе для всех вариантов моделирования дискретизация процессов адвекции и диффузии выполняется методом First Order Upwind, а для отслеживания границы раздела между газовой и жидкой фазами применяется метод Compressive. Для моделирования процессов в трубе использованы k - ϵ модели турбулентности с RANS и RNG уравнениями [29, 30]. Дополнительные настройки, использованные при моделировании, приведены в табл. 3.

Табл. 3. Методы для дополнительных настроек модели

Table 3. Methods for model settings

Связь давления и скорости Pressure Velocity Coupling	Простой алгоритм с фазовой связью Phase Coupled SIMPLE
Импульс Momentum	Схема дискретизации первого порядка First Order Upwind
Объемная доля Volume Fraction	Сжимающий Compressive
Движение твердых частиц Particle Treatment	Дискретная фазовая модель (DPM) Discrete Phase Model
Скорость турбулентного рассеяния Turbulent Dissipation Rate	Схема дискретизации первого порядка First Order Upwind
Концентрация межфазной площади Interfacial Area Concentration	Схема дискретизации первого порядка First Order Upwind

Расчетная схема участка трубы представлена на рис. 3, где показаны размеры и вид трубы, вид расчетной сетки, состоящей из изогональных элементов. Значение отношения длины участка к диаметру L/D в расчетах составило 0; 5; 10 и 15 как для горизонтальных, так и для вертикальных труб. Диаметр трубы, для возможности сравнения с результатами [23], принят равным 0,0762 м, и радиус колена принят $4D$. Объемные концентрации смеси приняты следующими: газ — 52,6 %, вода — 45,7 %, песок — 1,7 %.

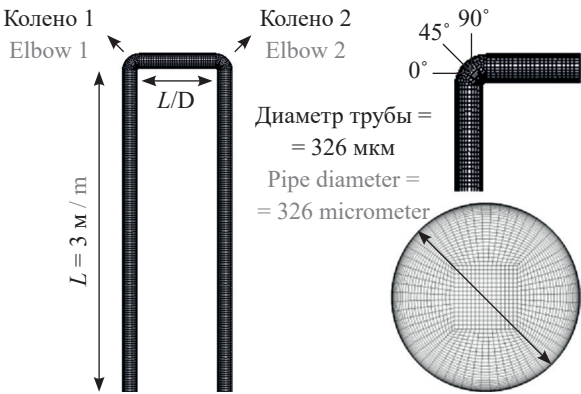


Рис. 3. Расчетная схема участка трубы, поперечное сечение и расчетная область

Fig. 3. Calculation diagram of the pipe section, cross section and calculation area

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Валидационное исследование
Для настоящего исследования были проведе-
ны расчеты эрозии для многофазного потока в тру-
бе с одним коленом, аналогичные с результатами

CFD-анализа такого же варианта, полученными
М. Parsi [23], которые показали хорошую сходимость
с результатами его же экспериментальных исследова-
ний. В табл. 4 приведено сравнение скорости эрозии
в исследовании авторов с результатами М. Parsi.

Табл. 4. Сравнение скорости эрозии в колене: М. Parsi (2015) и авторов
Table 4. Comparison of the erosion rate in the pipe on elbows: Parsi (2015) and the authors

Наименование	Величина эрозии, кг/м²·с Erosion amount, kg/m²·s	Скорость эрозии, мм/год Erosion rate, mm/year	Погрешность, % Error, %
Исследования Parsi Parsi's research	2,0E-05	79,9	—
Исследования авторов Author's research	2,17E-05	86,7	8,5

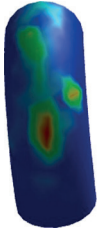
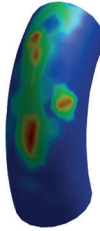
Погрешность 8,5 % показывает хорошую сходи-
мость с данными М. Parsi и свидетельствует о досто-
верности разработанной модели.
Дальнейшие исследования проводились для ва-
риантов трубопроводов с двумя коленами, распола-
гаемыми вертикально и горизонтально.

В табл. 5 показаны контуры эрозии кольцево-
го потока для всех изученных вариантов геометрий
колен для вертикальной трубы. Красные точки
на контурной диаграмме — это места максимальной
эрозии. Течение для исследования использовалось
как кольцевое со скоростью газа 37,5 м/с, жидкости
0,3 м/с и твердой фазы 0,0022 м/с.

Табл. 5. Эрозии в кольцевом потоке для вертикальной трубы
Table 5. Erosion in the annular flow for a vertical pipe

L/D	Вертикальная труба Vertical pipe	
	Колено 1 Elbow 1	Колено 2 Elbow 2
0		
5		
10		

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 5, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 5, 2023

L/D	Вертикальная труба Vertical pipe	
	Колено 1 Elbow 1	Колено 2 Elbow 2
15		

В большинстве изученных моделей в колене 1 эрозия возникла примерно на 45° на выходе колена и распространяется к выходу колена, за исключением $L/D = 0$, в котором на входе в колено и примерно до 45° в колене наблюдается наибольшая эрозия. На геометрии с $L/D = 15$ наблюдается место эрозии в колене 1, примерно на 40° по направлению к выходу из колена. Это указывает на то, что независимо от изменения L/D колено 1 будет подвергаться наибольшей эрозии между углами 40 и 50°. Это согласуется с результатами, представленными М. Parsi [31], где максимальное расположение эрозии наблюдалось под углом 45° в колене на выходе.

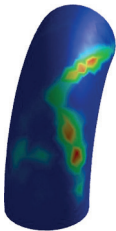
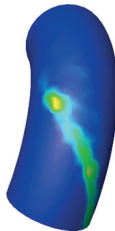
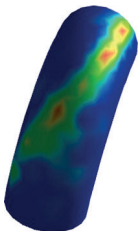
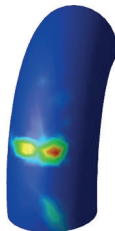
Во всех исследованных примерах максимальная эрозия для вертикальных труб концентрировалась в области колена 2 за исключением $L/D = 0$. Характер эрозии и поведение в колене 2 на вертикальной трубе отличаются при варьировании отношением L/D . При $L/D = 5$ максимальная эрозия

отмечается на входе в колено, при этом эрозия распространяется по всей длине колена 2 в сторону трубы. Когда L/D увеличивается до 10, картина эрозии становится более концентрированной и максимальное местоположение эрозии наблюдается примерно на 30° в колене. При $L/D = 15$ максимальное место эрозии установлено на угле 35° и распространяется к выходу колена.

Для всех исследованных вариантов горизонтальной трубы с различным соотношением L/D в табл. 6 показаны контуры эрозии кольцевого потока. Видно, что эрозия происходит в основном на колене 1, которое подвергается скоплению частиц песка из-за силы тяжести вдоль горизонтальной трубы. Место эрозии на колене 1 возникает на нижней стороне трубы, где действует сила тяжести. На колене 2 в геометрии с $L/D = 0$ и 5 эрозия происходит в основном на 35°. На $L/D = 20$ максимальная эрозия возникает на угле 60°.

Табл. 6. Образец эрозии в кольцевом потоке для горизонтальной трубы

Table 6. Pattern of erosion in annular flow for a horizontal pipe

L/D	Горизонтальная труба Horizontal pipe	
	Колено 1 Elbow 1	Колено 2 Elbow 2
0		
5		

L/D	Горизонтальная труба Horizontal pipe	
	Колено 1 Elbow 1	Колено 2 Elbow 2
10		
15		

На рис. 4 показаны максимальные скорости эрозии в мм/год для вертикальных и горизонтальных труб. Из рисунка видно, что максимальная эрозия в колене 1 для варианта с горизонтальной трубой выше, чем в вертикальной.

Максимальная скорость эрозии для вертикальной трубы наблюдается при $L/D = 0$ и составляет 373 мм/год в колене 1, а в колене 2 — 226 мм/год. Для горизонтальной трубы при $L/D = 0$ скорость эрозии составляет 325 и 227 мм/год для первого и второго колена соответственно.

Кроме того, минимальная эрозия возникает при $L/D = 10$ в горизонтальной трубе в первом колене и составляет 96,3 мм/год, а во втором колене — 57,9 мм/год. В вертикальной трубе минимальная эрозия отмечается при $L/D = 10$ и составляет 77,5 мм/год в первом колене и 109 мм/год во втором колене.

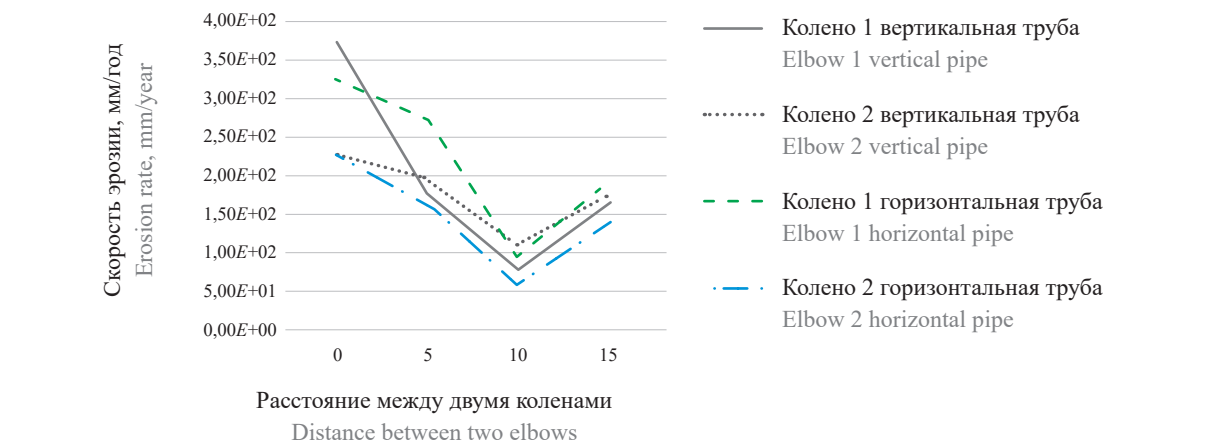


Рис. 4. Максимальная скорость эрозии в вертикальной и горизонтальной трубе

Fig. 4. Maximum erosion rate in a vertical pipe and in a horizontal pipe

Скорость эрозии на втором колене для горизонтальных и вертикальных труб близка при увеличении расстояния между двумя коленами. Основываясь на результате, можно указать, что для $L/D = 10$ и 15 скорость эрозии для этих моделей примерно одинакова. Для вертикальной трубы в колене 1 скорость эрозии составляет 77,5 мм/год для $L/D = 10$ и 165 мм/год для $L/D = 15$, а скорость эрозии для горизонтальной трубы в колене 2 составляет 57,9 мм/год для $L/D = 10$ и 138 мм/год при $L/D = 15$.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18, Выпуск 5, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18, Issue 5, 2023

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Суммарная скорость эрозии в горизонтальной трубе выше, чем в вертикальной для исследуемых геометрических соотношений L/D 5, 10 и 15.

В вертикальной трубе эрозия происходит в основном на втором колене по мере увеличения L/D ,

однако при $L/D = 0$ наблюдается высокая скорость эрозии на первом колене.

Труба с $L/D = 10$ показала наименьшую скорость эрозии среди всех исследованных геометрий.

При увеличении L/D картина скорости эрозии на втором колене для горизонтальных и вертикальных труб имеет сходный характер.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Li Y., Yang J., Pan Z., Meng S., Wang K., Niu X. Unconventional natural gas accumulations in stacked deposits: a discussion of upper Paleozoic coal-bearing strata in the east margin of the Ordos basin, China. *Acta Geologica Sinica — English Edition*. 2019; 93(1):111-129. DOI: 10.1111/1755-6724.13767
2. Waterman N.A. Treatise on materials science and technology volume 13 wear. *Tribology International*. 1979; 12(6):281. DOI: 10.1016/0301-679x(79)90149-x
3. Hasan F., Iqbal J., Ahmed F. Stress corrosion failure of high-pressure gas pipeline. *Engineering Failure Analysis*. 2007; 14(5):801-809. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.002
4. Hernandez-Rodriguez M.A.L., Martinez-Delgado D., Gonzalez R., Unzueta A.P., Mercado-Solis R.D., Rodriguez J. Corrosive wear failure analysis in a natural gas pipeline. *Wear*. 2007; 263(1-6):567-571. DOI: 10.1016/j.wear.2007.01.123
5. Shalaby H.M., Riad W.T., Alhazza A.A., Behbehani M.H. Failure analysis of fuel supply pipeline. *Engineering Failure Analysis*. 2006; 13(5):789-796. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2005.02.004
6. Azevedo C.R.F. Failure analysis of a crude oil pipeline. *Engineering Failure Analysis*. 2007; 14(6):978-994. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.12.001
7. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*. 1960; 3(2):87-103. DOI: 10.1520/stp35794s
8. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena Part I. *Wear*. 1963; 6(1):5-21. DOI: 10.1016/0043-1648(63)90003-6
9. Sheldon G.L., Finnie I. On the ductile behavior of nominally brittle materials during erosive cutting. *Journal of Engineering for Industry*. 1966; 88(4):387-392. DOI: 10.1115/1.3672666
10. Pereira G.C., de Souza F.J., de Moro Martins D.A. Numerical prediction of the erosion due to particles in elbows. *Powder Technology*. 2014; 261:105-117. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.04.033
11. Oka Y.I., Ohnogi H., Hosokawa T., Matsu-mura M. The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*. 1997; 203-204:573-579. DOI: 10.1016/s0043-1648(96)07430-3
12. Grant G., Tabakoff W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles. *Journal of Aircraft*. 1975; 12(5):471-478. DOI: 10.2514/3.59826
13. Chen J., Wang Y., Li X., He R., Han S., Chen Y. Reprint of "Erosion prediction of liquid-particle two-phase flow in pipeline elbows via CFD-DEM coupling method". *Powder Technology*. 2015; 282:25-31. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.05.037
14. Duarte C.A.R., de Souza F.J., dos Santos V.F. Mitigating elbow erosion with a vortex chamber. *Powder Technology*. 2016; 288:6-25. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.10.032
15. Karimi S., Shirazi S.A., McLaury B.S. Predicting fine particle erosion utilizing computational fluid dynamics. *Wear*. 2017; 376-377:1130-1137. DOI: 10.1016/j.wear.2016.11.022
16. Banakermani M.R., Naderan H., Saffar-Avval M. An investigation of erosion prediction for 15° to 90° elbows by numerical simulation of gas-solid flow. *Powder Technology*. 2018; 334:9-26. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.04.033
17. Farokhipour A., Mansoori Z., Saffar-Avval M., Ahmadi G. Numerical modeling of sand particle erosion in return bends in gas-particle two-phase flow. *Scientia Iranica*. 2018; 25(6):3231-3242. DOI: 10.24200/SCI.2018.50801.1871
18. Farokhipour A., Mansoori Z., Rasteh A., Rasoulzadeh M.A., Saffar-Avval M., Ahmadi G. Study of erosion prediction of turbulent gas-solid flow in plugged tees via CFD-DEM. *Powder Technology*. 2019; 352:136-150. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.04.058
19. McLaury B.S., Shirazi S.A., Rybicki E.F. Sand erosion in multiphase flow for slug and annular flow regimes. *CORROSION 2010*. 2010.
20. Kolev N.I. *Multiphase flow dynamics*. Springer, 2005.
21. Peng D., Pak A., Chinello L., Wood T., Low A. Advances in multiphase flow CFD erosion analysis. *All Days*. 2013. DOI: 10.4043/24114-ms
22. Liu M., Liu H., Zhang R. Numerical analyses of the solid particle erosion in elbows for annular flow. *Ocean Engineering*. 2015; 105:186-195. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.06.024
23. Parsi M., Agrawal M., Srinivasan V., Vieira R.E., Torres C.F., McLaury B.S. et al. CFD simulation of sand particle erosion in gas-dominant multiphase flow. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015; 27:706-718. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.09.003

24. Zahedi P., Zhang J., Arabnejad H., McLaury B.S., Shirazi S.A. CFD simulation of multiphase flows and erosion predictions under annular flow and low liquid loading conditions. *Wear*. 2017; 376-377:1260-1270. DOI: 10.1016/j.wear.2017.01.111

25. Ogunesan O.A., Hossain M., Iyi D., Dhroubi M.G. CFD modelling of pipe erosion due to sand transport. *Proceedings of the 1st International Conference on Numerical Modelling in Engineering*. 2019; 274-289. DOI: 10.1007/978-981-13-2273-0_22

26. Hirche D., Birkholz F., Hinrichsen O. A hybrid Eulerian-Eulerian-Lagrangian model for gas-solid simulations. *Chemical Engineering Journal*. 2019; 377:119743. DOI: 10.1016/j.cej.2018.08.129

27. Adaze E., Badr H.M., Al-Sarkhi A. CFD modeling of two-phase annular flow toward the onset of liquid film reversal in a vertical pipe. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019; 175:755-774. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.026

28. Parsi M., Vieira R.E., Torres C.F., Kesana N.R., McLaury B.S., Shirazi S.A. et al. Experimental investigation of interfacial structures within churn flow using a dual wire-mesh sensor. *International Journal of Multiphase Flow*. 2015; 73:155-170. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.03.019

29. Markatos N.C. The mathematical modelling of turbulent flows. *Applied Mathematical Modelling*. 1986; 10(3):190-220. DOI: 10.1016/0307-904x(86)90045-4

30. Yakhot V., Orszag S.A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing*. 1986; 1(1):3-51. DOI: 10.1007/bf01061452

31. Vieira R.E., Parsi M., Kesana N.R., Shirazi S.A., McLaury B.S. Effects of flow pattern and flow orientation on sand erosion in elbows for multiphase flow conditions. *CORROSION 2015*. 2015.

Поступила в редакцию 6 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 19 апреля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Алиреза Тахерифард — аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 1103454, Scopus: 57191530010, ORCID: 0000-0001-5973-7419; taherifard.a@edu.spbstu.ru;

Виктор Васильевич Елистратов — доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 36278, Scopus: 57189578726, ORCID: 0000-0001-7051-6027; elistratov@spbstu.ru.

Вклад авторов:

Тахерифард А. — проведение аналитических расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Елистратов В.В. — идея, концепция исследования, развитие методологии, научное руководство, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Received February 6, 2023.

Adopted in revised form on March 20, 2023.

Approved for publication on April 19, 2023.

BIONOTES: Alireza Taherifard — postgraduate student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); 29 Politekhnicheskaya st., 195251, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RSCI: 1103454, Scopus: 57191530010, ORCID: 0000-0001-5973-7419; taherifard.a@edu.spbstu.ru;

Viktor V. Elistratov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Higher School of Hydrotechnical and Power Engineering; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); 29 Politekhnicheskaya st., 195251, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RSCI: 36278, Scopus: 57189578726, ORCID: 0000-0001-7051-6027; elistratov@spbstu.ru.

Contribution of the authors:

Alireza Taherifard — the product of analytical calculations, writing the source text, final conclusions.

Viktor V. Elistratov — idea, concept of research, development of methodology, scientific guidance, scientific text editing.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.81

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.726-736

Энергетическая эффективность циркуляционных насосов при использовании незамерзающих теплоносителей

Алексей Леонидович Торопов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены вопросы работы циркуляционных насосов (ЦН) автономных систем теплоснабжения при заполнении контура отопления незамерзающими теплоносителями, возможность удаленного запуска охлажденной до -15°C системы отопления. В качестве незамерзающих теплоносителей изучались этиленгликолевые и пропиленгликолевые антифризы. Напорно-расходные характеристики, коэффициенты энергетической эффективности исследованы для ЦН с «мокрым ротором» в вариантах электрических моторов асинхронного типа с постоянной скоростью вращения ротора и энергосберегающих насосов на постоянных магнитах.

Материалы и методы. Исследования проводились на испытательных стендах. В качестве генераторов тепловой мощности применялись настенные газовые котлы и электрические котлы с номинальной мощностью до 24 кВт. Циркуляционные моторы, регулировочные гидравлические клапаны, часть трубопроводов длиной 6 м располагались в отдельной морозильной камере. Перед запуском системы насосы и части контура отопления выдерживались при отрицательной температуре два часа.

Результаты. Получены напорно-расходные характеристики двух типов насосов, коэффициенты энергетической эффективности, представлено сравнение с теплоносителем вода, определено влияние напряжения электрической сети на изучаемые параметры.

Выводы. Результаты исследования показали возможность запуска ЦН при охлажденном состоянии с температурой -15°C . Удаленный запуск охлажденной системы отопления с заполнением контура циркуляции антифризами при использовании котлов на углеводородном топливе невозможен. Работа систем отопления с незамерзающими теплоносителями в рабочем диапазоне температур $20\text{--}80^{\circ}\text{C}$ требует изменения настроек процесса горения и значительного увеличения напора ЦН по сравнению с теплоносителем вода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: антифриз, теплоноситель, вязкость, теплоснабжение, автономное отопление, тепловой генератор, газовый котел, электрический котел, энергоэффективность, этиленгликоль, пропиленгликоль

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Торопов А.Л. Энергетическая эффективность циркуляционных насосов при использовании незамерзающих теплоносителей // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С. 726–736. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.726-736

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

Energy efficiency of circulating pumps when using non-freezing heat transfer fluids

Alexey L. Toropov

Engineering Center “April”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article considers the issues of operation of circulating pumps of autonomous heat supply systems when the heating circuit is filled with antifreezing coolants. It is possible to remotely start up a heating system cooled down to -15°C . Ethylene glycol and propylene glycol antifreeze have been studied as antifreeze carriers. Flow-rate characteristics, power efficiency coefficients are studied for “wet rotor” circulation pumps in versions of electric motors of asynchronous type with constant rotor speed and energy-saving pumps on permanent magnets.

Materials and methods. The research was carried out on test stands. Wall-mounted gas boilers and electric boilers with a rated capacity up to 24 kW were used as heat generators. Circulation motors, control hydraulic valves, part of the pipes with a length of 6 meters were located in a separate freezer. The pumps and parts of the heating circuit were kept at subzero temperatures for 2 hours before the system was started up

Results. Pressure and flow characteristics of two types of pumps, energy efficiency coefficients were obtained, comparisons with water coolant are provided, the influence of electric network voltage on the investigated parameters was determined.

Conclusions. The research has shown the possibility of starting circulating pumps in a refrigerated condition with a temperature of -15°C . Remote start of the cooled heating system with circulation circuit filling with antifreeze when using hydrocarbon fuel boilers is not possible. Operation of heating systems with non-freezing coolants in the operation

temperature ranges of 20–80 °C requires changing in settings of the combustion process and a significant increase in the circulation pump head in comparison with the coolant water.

KEYWORDS: antifreeze, coolant, viscosity, heating, autonomous heating, heat generator, gas boiler, electric boiler, energy efficiency, ethylene glycol, propylene glycol

Acknowledgements. The author thanks the reviewers for their comments, both in terms of the style of presentation and the scientific and technical aspects, which contributed to better disclosure of the research work.

FOR CITATION: Toropov A.L. Energy efficiency of circulating pumps when using non-freezing heat transfer fluids. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):726–736. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.726-736 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Применение незамерзающих теплоносителей (антифризов) в автономных системах водяного теплоснабжения индивидуальных домов, промышленных и коммерческих объектов обусловлено естественными климатическими факторами территории стран с длительными периодами отрицательной температуры атмосферы в отапливаемый период времени года. При эксплуатации оборудования могут возникать случаи с перебоями в снабжении электроэнергией, без которой работа систем теплоснабжения нереальна. Интерес к антифризам также связан с возможностью удаленного запуска систем теплоснабжения индивидуальных домов с целью экономии затрат на отопление при периодическом использовании помещений или длительном отсутствии жильцов. В качестве тепловых генераторов для систем теплоснабжения используются котлы на жидком, твердом топливе, газе, электрические котлы. Циркуляция теплоносителя в системах водяного теплоснабжения обеспечивается циркуляционными насосами (ЦН) с постоянной скоростью вращения ротора электромотора асинхронного типа или энергосберегающими ЦН на постоянных магнитах. В автономных системах теплоснабжения малой мощности в большинстве случаев применяются конструкции ЦН с «мокрым ротором». Вопрос применения антифризов по-разному освещен в руководствах эксплуатации производителей котельного оборудования. От категорического запрета использования любых теплоносителей, кроме воды, для любых котлов, как, например, компания Vaillant [1], до рекомендаций по использованию антифризов, как компании Baxi¹, Viessmann², Buderus³.

Такая противоположность в рекомендациях вызывает непонимание у проектировщиков систем отопления и конечных потребителей. Необходимо также отметить, что все технические характеристики, указанные в документах и инструкциях заводов-изготовителей котлов, представлены для использования исключительно воды в качестве теплоносителя.

Особенности применения антифризов как теплоносителя в автономных системах отопления с использованием тепловых генераторов на базе котлов горения углеводородного топлива и электрических котлов концентрируются вокруг следующих групп вопросов:

- сохранение свойств антифризов при работе горелочных устройств;
- сохранение свойств антифризов в процессе эксплуатации;
- экологические вопросы при использовании антифризов;
- воздействие антифризов на элементы конструкции котлов и деталей и узлов контура циркуляции теплоносителя;
- теплофизические свойства антифризов и процесс теплообмена при передаче тепловой энергии от теплообменника котла теплоносителю и от теплоносителя приборам отопления;
- гидравлические сопротивления циркуляционного контура при заполнении его антифризами и способность ЦН обеспечить передачу тепловой энергии приборам отопления;
- энергетическая эффективность системы теплоснабжения и ее элементов при использовании антифризов.

Работа ЦН контура отопления, заполненного антифризом, является важнейшим вопросом, влияющим на практически все перечисленные выше факторы. При низкой скорости движения антифриза по контуру циркуляции и каналам теплообменника, обусловленной высокими значениями кинематической вязкости, происходит перегрев теплоносителя и закипание. Компании, которые положительно относятся к применению антифризов в системах автономного теплоснабжения, рекомендуют в качестве незамерзающих теплоносителей в основном этиленгликолевые (EG–W) и пропиленгликолевые (PG–W) водные растворы⁴ [2, 3].

¹ Рекомендации по применению антифризов от BAXI. URL: <https://baxi.ru/advertisement/articles/antifreeze/>

² Антифриген (Antifrogen) — рекомендованный антифриз для оборудования Viessmann (Виссманн). URL: <https://himrus.ru/stati/teplonositel-dlya-kotlov-viessmann>

³ Какой теплоноситель залить в систему отопления частного дома? URL: <https://buderus-shop.ru/kakoy-teplonositel-vibrat>

⁴ Antifreeze — Ethylene Glycol vs. Propylene Glycol Comparing ethylene glycol and propylene glycol antifreeze properties // Engineering ToolBox. 2005. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-propylene-glycol-d_904.html

При атмосферном давлении большинство указанных антифризов начинает закипать при температуре 105–130 °С [4–6]. Температура в камере сгорания котлов, работающих при сжигании углеводородного топлива, составляет более 1000 °С, поверхность электрических нагревательных элементов — 350 °С. Следовательно, в месте контакта теплоносителя с внутренней поверхностью каналов теплообменника котлов или поверхности нагревательных элементов электрических котлов наблюдается закипание контактного слоя, интенсивность и глубина которого зависят от скорости движения теплоносителя и его теплопроводности. В отличие от воды в антифризах при достижении температуры кипения происходит необратимое термическое разложение гликоля и антикоррозионных присадок с образованием кислот и выпадением твердых осадков. I. Sarbu, C. Sebarchievici при исследовании применения антифризов в солнечных коллекторах заявляют, что после разложения гликоли не только не обеспечивают защиту от замерзания, но также начинают разъедать компоненты солнечного контура — коллекторы, трубы, насос и т.д. Из-за кислот и чрезмерного нагрева срок службы деталей солнечного контура значительно сокращается [7, 8]. Эти исследования можно распространить на автономные системы теплоснабжения.

В процессе эксплуатации систем теплоснабжения необходимо поддерживать количество теплоносителя в контуре циркуляции. Причиной периодической подпитки объема теплоносителя служат утечки, связанные с герметичностью контура теплоснабжения, и автоматическое удаление газов, возникающее при кипении контактного слоя теплоносителя с теплообменниками котлов или электрическими нагревательными элементами. Подпитка утраченного объема теплоносителя производится водой, что приводит к постепенному снижению концентрации антифризов и потере их свойств, поскольку именно концентрация гликолей в воде служит важнейшей характеристикой, влияющей на замерзание теплоносителей. Исследования влияния концентрации гликолей на пороги замерзания приведены в работах [9, 10].

Следует отметить, что в автономных системах теплоснабжения малой мощности часто применяются комбинированные бойлеры, предназначенные для отопления и подготовки горячей воды. Если относительно системы отопления вопрос применения антифризов актуален, то в системах обеспечения горячего водоснабжения (ГВС) необходимо гарантировать отсутствие воды в любых элементах контура

теплоснабжения, иначе при минусовых температурах произойдет разрушение части контура ГВС [11].

Экологические аспекты применения EG–W и PG–W в системах теплоснабжения с точки зрения воздействия на организм человека и окружающую среду представлены в трудах^{5, 6, 7} [12, 13].

Этиленгликоль токсичен для человека, вызывает ряд физиологических проблем при проглатывании. Его не следует применять в системах теплоснабжения, если есть риск загрязнения питьевой воды или санитарной воды, используемой при контактах с кожей. Пропиленгликолевые антифризы в этом смысле безопасны и даже применяются в косметической промышленности. Однако, если обеспечивается технологическое отсутствие возможности проникновения этиленгликолевых антифризов в системы холодного и горячего водоснабжения, то именно EG–W имеют технические характеристики, близкие к воде, и предпочтительны для антифризов систем отопления.

Температура кипения антифризов — один из важнейших показателей возможности их применения для котлов отопления, работающих на углеводородном топливе. Повышение порогов кипения осуществляется за счет добавления различных органических и неорганических веществ, например наночастиц серебра [14], углерода [15], окислов алюминия, меди [16] и других компонентов, добавляемых в антифризы в виде присадок. Конструкции теплообменников конденсационных, конвекционных, электрических котлов не позволяют исключить закипание теплоносителя в зоне контакта теплообменника котла или поверхности нагревательного электрического элемента с теплоносителем (антифризом) во всех режимах работы тепловой мощности теплового генератора. Как было отмечено выше в работах [7, 8], при кипении антифризов происходит разложение длинных молекул гликолей на короткие при возникновении кислот и твердых осадков, которые воздействуют на материалы конструкции труб, насосов, распределительной арматуры, уплотнений контура циркуляции системы теплоснабжения, забивают каналы агрегатов и узлов.

Способность реализовать тепловую энергию, выработанную тепловыми генераторами через приборы отопления, — основная задача систем теплоснабжения. В технической документации по тепловым генераторам параметры энергетической эффективности, тепловой мощности, режимов работы представлены исключительно для использования воды в качестве теплоносителя. Соответственно, чем больше теплофизические ха-

⁵ US National Library of Medicine. US Department of Health and Human Services. Home Products Database: Ethylene Glycol. URL: <https://hpd.nlm.nih.gov/cgi-bin/household/search?tbl=TblChemicals&queryx=107-21-1>

⁶ The National Institute of Occupational Safety and Health. Ethylene Glycol: systemic agent. URL: https://www.cdc.gov/niosh/erashdb/emergencyresponsecard_29750031.html

⁷ Technical Library. Ethylene Glycol. URL: <https://www.hydratechfluids.com/us/technical-blog/Ethylene-Glycol/34>

характеристики других теплоносителей совпадают с характеристиками для воды, тем ближе параметры тепловых агрегатов совпадают с данными заводоизготовителей.

Важнейшими характеристиками, влияющими на способность теплообмена и передачу энергии в контуре циркуляции системы теплоснабжения, являются теплопроводность, теплоемкость, плотность теплоносителей [17–22]. Причем эти показатели влияют на передачу тепловой энергии как от теплообменника котла теплоносителю, так и от теплоносителя приборам отопления. Все указанные параметры зависят от температуры теплоносителя. Скорость движения теплоносителя по контуру циркуляции автономной системы отопления определяется гидравлическим сопротивлением контура отопления и котельного агрегата, как части контура циркуляции [23]. Вязкость теплоносителя непосредственно связана со скоростью движения. Если вязкость жидкости выше, то и сопротивление движению по контуру отопления при заполнении его антифризом в разы превышает сопротивление при его заполнении водой. В рабочем диапазоне температур 20–80 °С вязкость EG–W в три раза, а PG–W в пять раз выше вязкости воды. Но при рассмотрении вопросов запуска охлажденной системы отопления ниже минус 10–15 °С отличие характеристик составляет 10–25 раз по сравнению с вязкостью воды при плюсовых температурах около 0 °С.

С учетом выводов, представленных в указанных работах, при замене в системе теплоснабжения воды на водногликолевый теплоноситель для сохранения условий теплообмена в источнике теплоты расход теплоносителя должен быть увеличен в 2,5 раза, что потребует насос с напором, в 8,7 раз превышающий напор с аналогичным насосом при использовании воды. Способность теплопередачи у жидкостей, как правило, ниже, чем у металлов, поэтому повышение теплопроводности антифризов можно увеличить за счет суспензий с различными металлами.

Наибольшую эффективность имеют суспензии с наночастицами металлов, размер которых хотя бы в одном направлении составляет менее 100 нм. Наножидкости — вид разбавленных суспензий, содержащих наночастицы. Наножидкости могут обладать более высокими показателями теплопроводности и одновременно быть более стабильными (не расслаиваются, не прилипают к поверхности каналов путей движения теплоносителя), чем суспензии с миллиметровыми и микрометровыми частицами [24]. Теплоемкость и теплопроводность антифризов зависят от многих факторов и отличаются от параметров воды на 20–30 % [25, 26], но исследования в области применения антифризов для систем теплоснабжения в основном охватывают диапазон рабочих температур 20–80 °С.

Вопрос запуска системы теплоснабжения, заполненной антифризом и охлажденной до температуры минус 10–15 °С, изучен мало.

При рассмотрении применения незамерзающих теплоносителей в автономных системах отопления важны также термогидравлические параметры энергоэффективности приборов отопления. В работе [27] выполнен сравнительный теоретический и расчетный анализ для воды и альтернативных теплоносителей — 50%-го водного раствора этиленгликоля и пропиленгликоля. Отмечается, что незамерзающие теплоносители вызывают снижение теплоотдачи радиаторов, способствуют увеличению гидравлического сопротивления контуров отопления, увеличению энергопотребления всей системы и снижению ее энергоэффективности. В публикации [28] указано, что применительно к радиаторам автомобилей смеси 50/50 EG–W дают снижение теплоотдачи алюминиевых радиаторов на 7,79 %, а 50/50 PG–W на 11,46 % по сравнению с водой.

Цель исследования — определить показатели энергетической эффективности работы ЦН с «мокрым ротором» с асинхронным мотором и ротором с постоянной скоростью вращения и энергосберегающих на постоянных магнитах, применяемых в системах теплоснабжения малой мощности при заполнении контура отопления водно-гликолевыми растворами. Установить возможность старта функционирования ЦН при заполнении контура циркуляции антифризами при температуре начала работы –15 °С.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Испытания проводились на исследовательском стенде завода «АРДЕРИЯ», дополненном морозильным агрегатом, обеспечивающим температуру охлаждения до –35 °С. Блок электрического котла с косвенным нагревом антифриза тепловыми нагревательными элементами (максимальная температура нагрева 80 °С), с ЦН и гидравлической группой распределения потоков помещался в морозильный агрегат и выдерживался в течение двух часов при заданной отрицательной температуре. Участок гофрированного трубопровода, выполненного из нержавеющей стали, диаметром 16 мм и длиной 6000 мм, запорный вентиль для регулирования гидравлического сопротивления трубопроводов, расположенные на напорной магистрали электрического котла, также расположены в морозильном агрегате. В контур теплоснабжения входили газовый котел с закрытой камерой сгорания с номинальной тепловой мощностью 24 кВт, электрический котел с номинальной мощностью 9 кВт. Испытания проводились для оснащения электрического котла стандартным ЦН с «мокрым ротором», оснащенным электрическим мотором асинхронного типа с постоянной скоростью вращения

ротора, на третьей и второй скоростях вращения, и для циркуляционного энергосберегающего насоса на постоянных магнитах в варианте настройки работы на постоянных скоростях вращения ротора. Электропитание однофазное 50 Гц, напряжение 200, 220, 240 В. Испытание выполнялось в варианте теплоносителя: вода, этиленгликолевый антифриз, пропиленгликолевый антифриз. Температура кристаллизации антифризов –30 °С.

Испытания осуществлялись по три раза. Запуск электрического нагревательного блока и ЦН, а также проверка работы электронных блоков управления проводились при температуре –15 °С. Результаты испытаний отражают средние значения исследуемых параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлены напорно-расходные характеристики циркуляционного насоса «с мокрым ротором» и мотором асинхронного типа на третьей скорости в полном диапазоне изменения расхода и второй скорости вращения ротора в диапазоне 0,6–1,2 м³/ч. Варианты при испытаниях с заполнением контура циркуляции водой, этиленгликолем и пропиленгликолем антифризами, напряжение 50 Гц, 220 В, температура теплоносителя во всех случаях 20 °С. Анализ систем автономного

теплоснабжения индивидуальных домов показал, что диапазон изменения расходов контура отопления составляет 0,6–1,2 м³/ч при среднем значении 0,8 м³/ч [29, 30].

На рис. 2 приведены графики напорно-расходных характеристик для ЦН с асинхронным мотором для третьей скорости вращения ротора для трех вариантов теплоносителя при значениях напряжения 200, 220, 240 В.

Графики изменения коэффициента энергетической эффективности для трех рассматриваемых вариантов теплоносителя на третьей и второй скоростях вращения ротора показаны на рис. 3. Напряжение 220 В.

Напорно-расходные характеристики энергосберегающих ЦН на постоянных магнитах для трех вариантов теплоносителя при напряжении сети 220 В, температуре 20 °С в варианте работы с постоянной скоростью вращения ротора (третья и вторая) представлены на рис. 4.

На рис. 5 приведены графики изменения коэффициента энергетической эффективности для энергосберегающего ЦН для трех вариантов теплоносителя в полном диапазоне изменения расхода в варианте работы с постоянной третьей и второй скоростью вращения. Напряжение питания электрической сети 220 В.

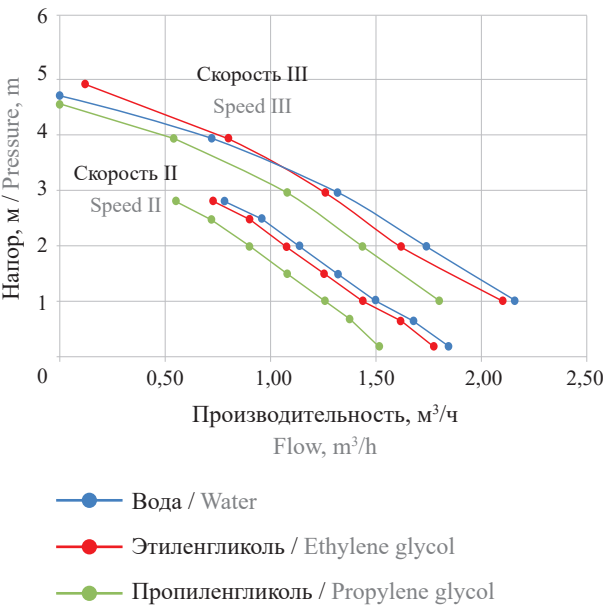


Рис. 1. Напорно-расходные характеристики циркуляционного насоса с электрическим мотором асинхронного типа. Теплоноситель: вода, EG–W, PG–W

Fig. 1. Pressure-flow characteristics of a circulation pump with an asynchronous electric motor. Heat carrier: water, EG–W, PG–W

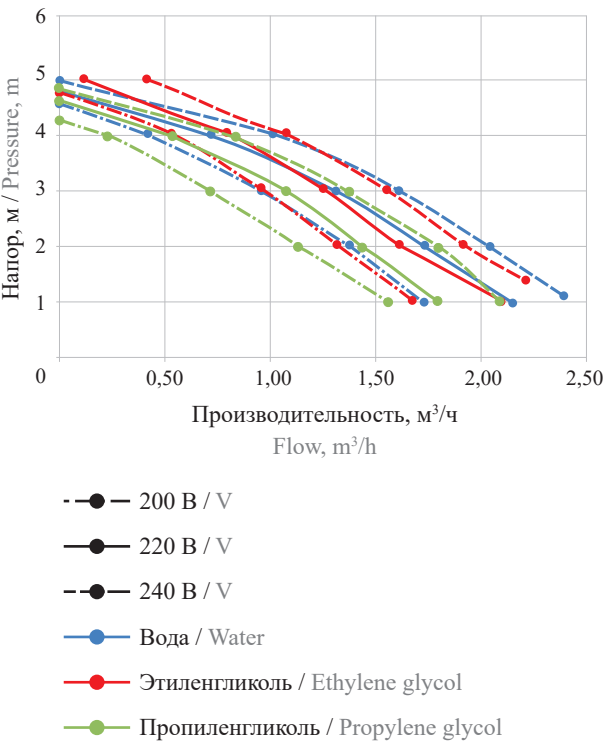


Рис. 2. Напорно-расходные характеристики циркуляционного насоса с электрическим мотором асинхронного типа при напряжениях 200–240 В. Теплоноситель: вода, EG–W, PG–W

Fig. 2. Pressure-flow characteristics of a circulation pump with an asynchronous electric motor at voltages of 200–240 volts. Heat carrier: water, EG–W, PG–W

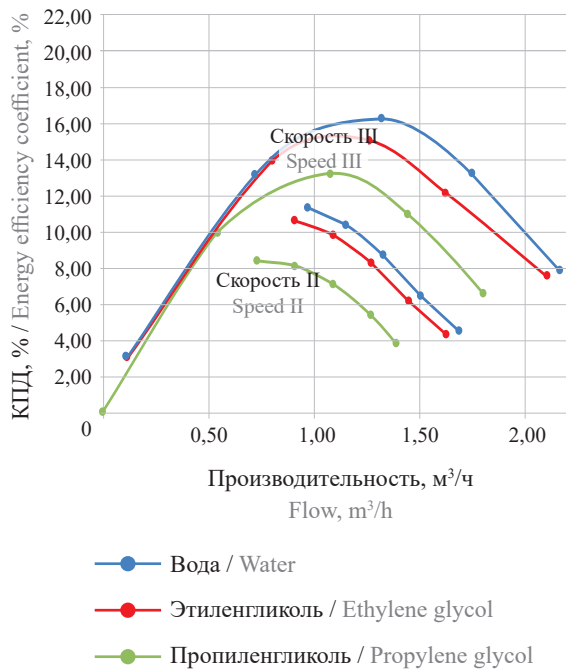


Рис. 3. Коэффициент энергетической эффективности циркуляционного насоса с электрическим мотором асинхронного типа. Теплоноситель: вода, EG–W, PG–W. Напряжение 220 В

Fig. 3. The coefficient of energy efficiency of the circulation pump with an electric motor of asynchronous type. Heat carrier: water, EG–W, PG–W. Voltage 220 volts

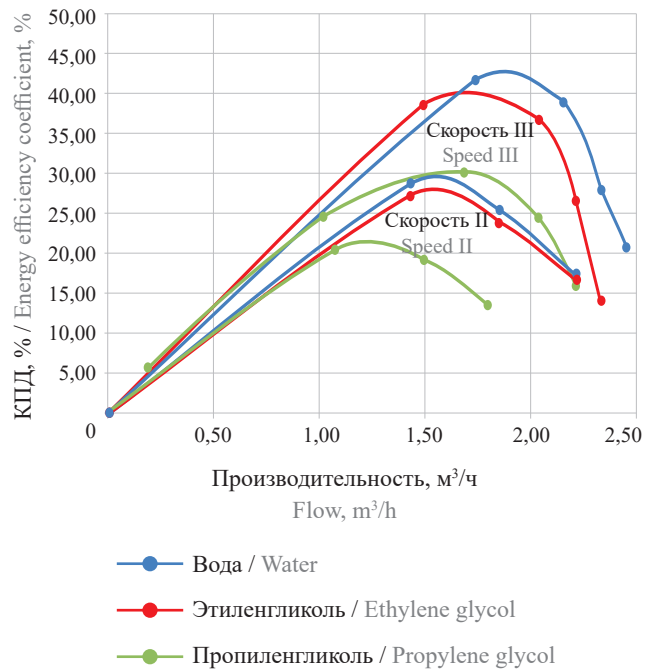


Рис. 5. Коэффициент энергетической эффективности энергосберегающего циркуляционного насоса. Теплоноситель: вода, EG–W, PG–W. Напряжение 220 В

Fig. 5. The coefficient of energy efficiency of an energy-saving circulation pump. Heat carrier: water, EG–W, PG–W. Voltage 220 volts

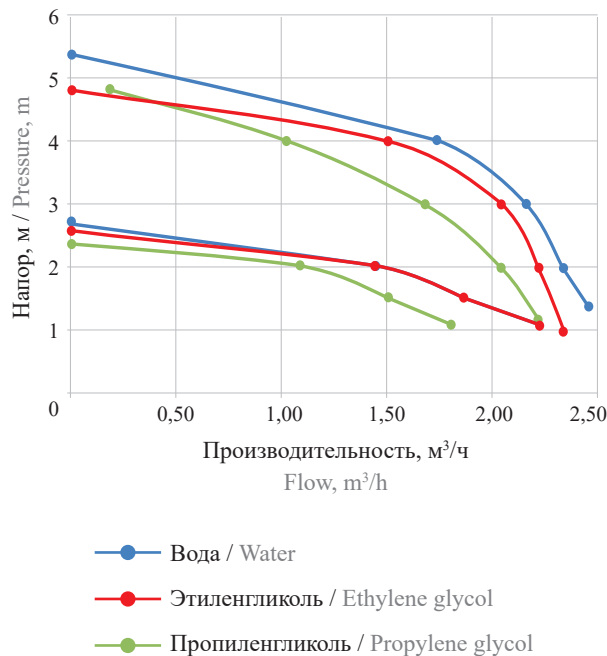


Рис. 4. Напорно-расходные характеристики энергосберегающих циркуляционных насосов на постоянных магнитах. Теплоноситель: вода, EG–W, PG–W. Напряжение 220 В

Fig. 4. Pressure-flow characteristics of energy-saving circulation pumps with permanent magnets. Heat carrier: water, EG–W, PG–W. Voltage 220 volts

Результаты испытаний показали:

1. Напорно-расходные характеристики ЦН с мотором асинхронного типа для этиленгликолей и воды незначительно отличаются в рабочем диапазоне расходов 0,6–1,2 м³/ч при напряжении питания 220 В, третьей скорости вращения ротора. Пропиленгликолей на 10–12 % в меньшую сторону по сравнению с водой. На второй скорости вращения отличия напорно-расходных характеристик пропиленгликолевых антифризов отличаются от других теплоносителей на 25–30 %.

Выявлена существенная зависимость значений напорно-расходных характеристик для всех трех испытываемых теплоносителей от напряжения питающей электросети. Для воды диапазон изменения напора при изменении расходов 0,6–1,2 м³/ч и изменении напряжения 200–240 В составил на третьей скорости вращения 30 %, для этиленгликолей — 35 %, пропиленгликолей — 60 %.

2. Коэффициент энергетической эффективности на третьей скорости вращения ротора в диапазоне изменения расходов 0,6–1,2 м³/ч у воды и EG–W отличается незначительно и составляет 0,15 %, у PG–W — 0,13 %, отличие составляет 12–15 %.

3. Напорно-расходные характеристики энергосберегающих ЦН показали отличие напора в рассматриваемом диапазоне расхода 0,6–1,2 м³/ч для EG–W на 10 % и для PG–W на 20 % в меньшую сторону по сравнению с водой. Испытания проде-

монстрировали практически полное отсутствие зависимости напорно-расходных характеристик от напряжения питающей сети в диапазоне 200–240 В. Показатели стабильны во всем диапазоне.

На второй постоянной скорости вращения ротора энергосберегающего ЦН в рассматриваемом диапазоне расходов напоры для воды и EG–W практически равны, PG–W меньше на 10 %. Отсутствует зависимость напора от напряжения питающей сети.

4. Коэффициент энергетической эффективности энергосберегающих насосов в максимальном значении выше, чем у насосов с асинхронным мотором. И достигает 42 % для воды и 40 % для EG–W при расходе 1,7–1,8 м³/ч. Для PG–W максимум коэффициента энергетической эффективности составляет 30 %. В диапазоне наиболее частых значений расхода для автономных систем малой мощности 0,6–1,2 м³/ч показатели коэффициента энергетической эффективности значительно меньше, составляют 25 % и практически одинаковы для всех исследуемых теплоносителей. На второй постоянной скорости вращения ротора энергосберегающих насосов максимумы коэффициентов энергетической эффективности снижаются до 30 % для воды, 27 % для EG–W, 22 % для PG–W, однако в зоне расходов 1 м³/ч показатели выравниваются у всех теплоносителей и составляют 20 %.

С помощью отдельных испытаний выполнялся запуск охлажденных до температуры –15 °С ЦН обоих типов. Напорная магистраль после насосов длиной 6 м и вентилем с регулируемым проходным сечением 10–90 % были также расположены в морозильной камере. Испытания проводились при заполнении контура циркуляции исследуемыми антифризами. Все испытания показали возможность запуска охлажденных до указанной температуры ЦН и постепенного выхода их напорно-расходных характеристик на значения, указанные в проведенных ранее испытаниях.

При заполнении контура отопления системы теплоснабжения антифризами для выхода теплового генератора на заявленные энергетические характеристики, декларируемые производителями оборудования с теплоносителем вода, требуются более высокие напоры и расходы. Теплоемкость антифризов ниже воды на 20–30 %, следовательно, необходимо увеличить скорость движения антифриза по каналам контура циркуляции. Но при увеличении скорости движения возрастает гидравлическое сопротивление контура циркуляции, преодоление которого требует увеличения напорных характеристик ЦН. Теплопроводность также влияет на способность передать тепло от поверхности контакта антифриза и теплообменника котла к центру канала труб теплообменника. Низкая теплопроводность антифризов для их нагрева требует более длительного контакта, что приводит к возможности закипания контактного слоя. В связи с представленными дан-

ными обеспечить указанные в технических паспортах производителей котлов характеристики котельного оборудования при использовании антифризов практически не представляется возможным. Если принимается решение о заполнении контура отопления системы теплоснабжения антифризами, то котел не будет работать на номинальной мощности. При применении штатных ЦН происходит снижение скорости движения теплоносителя, которое приводит к закипанию поверхностного слоя антифриза, быстрому разложению антифриза с потерей способности не замерзания при отрицательных температурах, выпадению твердых осадков и засорению контура циркуляции. Для обеспечения возможности эксплуатации систем отопления с заполнением контура отопления антифризом необходимо установить дополнительный ЦН и снизить настройки мощности работы горелочных и нагревательных устройств генераторов тепла относительно заводских рекомендаций и настроек для варианта теплоносителя вода. Однако данные рекомендации не могут носить количественные значения, поскольку зависят от большого числа факторов. Этиленгликолевые водные растворы более предпочтительны в качестве теплоносителя для использования в системах отопления в случае конструктивного исключения возможности попадания антифриза в контур снабжения питьевой и контактирующей с кожей водой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение антифризов в качестве теплоносителей в автономных системах теплоснабжения индивидуальных домов, коммерческих объектов является вынужденной мерой для стран с длительным отопительным периодом времени года. Существующие в настоящий момент антифризы не позволяют использовать котлы как конвекционного, так и конденсационного типа, работающие на углеводородном топливе без дополнительных ЦН, установленных в контуре циркуляции системы отопления и без изменения режимов настройки работы горелочных устройств. EG–W антифризы рекомендуются к применению в системах отопления и обладают преимуществами по сравнению с PG–W антифризами, однако данные рекомендации распространяются исключительно в случае конструктивного исключения возможности попадания EG–W антифризов в контур водоснабжения питьевой и санитарной холодной и горячей воды.

Запуск охлажденной системы теплоснабжения при температуре ниже 0 °С даже при заполнении контура циркуляции антифризами приводит к аварии системы. Заполнение контура циркуляции антифризами влияет на работу ЦН. В ЦН с асинхронным мотором и постоянной скоростью вращения ротора напорно-расходные характеристики при номинальном напряжении электрической сети в вариантах теплоносителя вода и EG–W в диапазоне расхода

0,6–1,2 м³/ч отличаются незначительно, для PG–W — 12 %. Выявлена значительная зависимость напряжения сети электрического питания на напорно-расходные характеристики ЦН «с мокрым ротором» и асинхронным мотором. Изменения составляют при диапазоне изменения 200–240 В для теплоносителя вода 30 %, EG–W — 35 %, PG–W — 60 %. Коэффициент энергетической эффективности указанных ЦН при напряжении 220 В при заполнении водой и EG–W — 0,15 %, при заполнении PG–W — 0,13 % на максимальной скорости вращения. В энергосберегающих ЦН «с мокрым ротором» на постоянных магнитах напорно-расходные характеристики при напряжении 220 В у EG–W на 10 %, у PG–W на 20 % ниже варианта теплоносителя вода. Зависимость напорно-расходных характеристик данного типа мотора от напряжения питания в диапазоне

200–240 В отсутствует. Максимальный коэффициент энергетической эффективности энергосберегающих ЦН высокий и составляет 42 % для воды, 40 % для EG–W, 30 % для PG–W, однако эти показатели находятся в диапазоне расходов, близких к максимальным напорам. Для рабочего диапазона наиболее распространенных систем автономного теплоснабжения 0,6–1,2 м³/ч значение коэффициента полезного действия значительно ниже и составляет около 20 % у всех типов рассматриваемых антифризов.

Испытания показали возможность запуска всех рассматриваемых типов ЦН из переохлажденного состояния системы отопления при заполнении ее антифризом. Удаленный запуск ЦН, заполненного антифризом, при отрицательной температуре возможен.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Семушев В.В. Почему производители котельного оборудования запрещают антифризы? // СОК. 2004. № 9.

2. Houghton A. Which to use: Ethylene or propylene glycol? // Process Cooling. 2017. URL: <https://www.process-cooling.com/articles/88966-which-to-use-ethylene-or-propylene-glycol>

3. Беликов С.Е. Незамерзающие теплоносители. М. : Аква-Терм, 2013. 55 с.

4. Zamzamian A., Oskouie S.N., Doosthoseini A., Joneidi A., Pazouki M. Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al₂O₃/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow // Experimental Thermal and Fluid Science. 2011. Vol. 35. Issue 3. Pp. 495–502. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2010.11.013

5. Yu W., Xie H. A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications // Journal of Nanomaterials. 2012. Pp. 1–17. DOI: 10.1155/2012/435873

6. Huminic G., Huminic A. Application of nanofluids in heat exchangers : a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16. Issue 8. Pp. 5625–5638. DOI: 10.1016/j.rser.2012.05.023

7. Sarbu I., Sebarchievici C. Solar heating and cooling systems: fundamentals, experiments and applications. Academic Press, 2016. 432 p.

8. Sarbu I., Sebarchievici C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings // Energy and Buildings. 2014. Vol. 70. Pp. 441–454. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.11.068

9. Bartolini N., Casasso A., Bianco C., Sethi R. Environmental and economic impact of the antifreeze agents in geothermal heat exchangers // Energies. 2020. Vol. 13. Issue 21. P. 5653. DOI: 10.3390/en13215653

10. Sekrani G., Poncet S. Ethylene- and propylene-glycol based nanofluids: A literature review on

their thermophysical properties and thermal performances // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Issue 11. P. 2311. DOI: 10.3390/app8112311

11. Торонов А.И. Особенности применения антифризов в автономных системах теплоснабжения с настенными газовыми котлами // СОК. 2022. № 1. С. 48–50.

12. Pérez-Tavernier J., Vallejo J.P., Cabaleiro D., Fernandez-Seara J., Lugo L. Heat transfer performance of a nano-enhanced propylene glycol: water mixture // International Journal of Thermal Sciences. 2019. Vol. 139. Pp. 413–423. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.02.012

13. Okolie J.A. Insights on production mechanism and industrial applications of renewable propylene glycol // iScience. 2022. Vol. 25. Issue 9. P. 104903. DOI: 10.1016/j.isci.2022.104903

14. Cordeiro Junior L.C., Nogueira E. Influence of the coolant flow containing silver nanoparticles (Ag) from an aqueous solution based on ethylene glycol (EG50%) on the thermal-hydraulic performance of an automotive radiator // World Journal of Nano Science and Engineering. 2020. Vol. 10. Issue 01. Pp. 14–26. DOI: 10.4236/wjnse.2020.101002

15. Izadi F., Ranjbarzadeh R., Kalbasi R., Afrand M. A new experimental correlation for non-Newtonian behavior of COOH-DWCNTs/antifreeze nanofluid // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2018. Vol. 98. Pp. 83–89. DOI: 10.1016/j.physe.2017.12.031

16. Ferrão Teixeira Alves L.O., Henriques J.R., da Costa J.A.P., Abramchuk V. Comparative performance analysis of internal combustion engine water jacket coolant using a mix of Al₂O₃ and CuO-based nanofluid and ethylene glycol // Energy. 2022. Vol. 250. P. 123832. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123832

17. Li X., Zou C., Qi A. Experimental study on the thermo-physical properties of car engine coolant (water/ethylene glycol mixture type) based SiC nanofluids // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 77. Pp. 159–164. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.08.009

18. Soltanimehr M., Afrand M. Thermal conductivity enhancement of COOH-functionalized MWCNTs/ethylene glycol–water nanofluid for application in heating and cooling systems // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 105. Pp. 716–723. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.089

19. Goodarzi M., Kherbeet A.Sh., Afrand M., Sadeghinezhad E., Mehrali M., Zahedi P. et al. Investigation of heat transfer performance and friction factor of a counter-flow double-pipe heat exchanger using nitrogen-doped, graphene-based nanofluids // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 76. Pp. 16–23. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.018

20. Хаванов П.А., Барынин К.П. Особенности применения водногликолевых теплоносителей в автономных системах теплоснабжения // АВОК. 2003. № 7.

21. Хаванов П.А. Теплотехнические условия использования водногликолевых теплоносителей в автономных системах теплоснабжения // СОК. 2003. № 8.

22. Гольяев О.М. Применение антифризов в системах отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха // АВОК. 2012. № 6.

23. Торопов А.Л. Гидравлическая и тепловая устойчивость работы автономных систем многоквартирного теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 7. С. 944–953. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.944-953

Поступила в редакцию 30 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 19 апреля 2023 г.

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

24. Yang L., Hu Y. Toward TiO₂ Nanofluids — Part 1: Preparation and properties // Nanoscale Research Letters. 2017. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1186/s11671-017-2184-8

25. Ramadhan A.I., Azmi W.H., Mamat R. Experimental investigation of thermo-physical properties of tri-hybrid nanoparticles in water-ethylene glycol mixture // Walailak Journal of Science and Technology. 2021. Vol. 18. Issue 8. DOI: 10.48048/wjst.2021.9335

26. Gundem A., Hosoz M., Keklik E. Performance comparison of propylene glycol-water and ethylene glycol-water mixtures as engine coolants in a flat-tube automobile radiator // International Journal of Automotive Science and Technology. 2021. Pp. 147–156. DOI: 10.30939/ijastech.914901

27. Muniak D.P. The impact of the use of anti-freeze substances on the heating installation thermohydraulic parameters and energy consumption // Heat Transfer Engineering. 2021. Vol. 42. Issue 3–4. Pp. 347–353. DOI: 10.1080/01457632.2019.1699305

28. Serkani G., Poncet S. Ethylene- and propylene-glycol based nanofluids: A Literature review on their thermophysical properties and thermal performances // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Issue 11. P. 2311. DOI: 10.3390/app8112311

29. Bidstrup N., van Elburg M., Lane K. 2001. Promotion of energy efficiency in circulation pumps, especially in domestic heating systems. Washington, DC. Personal communication CLASP & Danish Low Carbon Transition Unit 2013, Energy Policy Toolkit for Energy Efficiency in Appliances, Lighting, and Equipment. 2023.

30. Торопов А.Л. К вопросу об энергоэффективности циркуляционных насосов для настенных конвекционных газовых котлов // СОК. 2020. № 11. С. 32–34.

REFERENCES

1. Semushev V.V. Why do boiler manufacturers ban antifreeze? *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2004; 9. (rus.).

2. Houghton A. Which to use: Ethylene or propylene glycol? *Process Cooling*. 2017. URL: <https://www.process-cooling.com/articles/88966-which-to-use-ethylene-or-propylene-glycol>

3. Belikov S.E. *Non-freezing heat carriers*. Moscow, Aqua-Therm, 2013; 55. (rus.).

4. Zamzamian A., Oskouie S.N., Doosthoseini A., Joneidi A., Pazouki M. Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al₂O₃/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2011; 35(3):495–502. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2010.11.013

5. Yu W., Xie H. A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applica-

- tions. *Journal of Nanomaterials*. 2012; 1-17. DOI: 10.1155/2012/435873
6. Huminic G., Huminic A. Application of nano-fluids in heat exchangers : a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012; 16(8):5625-5638. DOI: 10.1016/j.rser.2012.05.023
7. Sarbu I., Sebarchievici C. *Solar Heating and Cooling Systems: Fundamentals, Experiments and Applications*. Academic Press, 2016; 432.
8. Sarbu I., Sebarchievici C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*. 2014; 70:441-454. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.11.068
9. Bartolini N., Casasso A., Bianco C., Sethi R. Environmental and economic impact of the antifreeze agents in geothermal heat exchangers. *Energies*. 2020; 13(21):5653. DOI: 10.3390/en13215653
10. Sekrani G., Poncet S. Ethylene- and propylene-glycol based nanofluids: A litterature review on their thermophysical properties and thermal performances. *Applied Sciences*. 2018; 8(11):2311. DOI: 10.3390/app8112311
11. Toropov A.L. Features of the use of antifreezes in autonomous heating systems with wall-mounted gas boilers. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2022; 1:48-50. (rus.).
12. Pérez-Tavernier J., Vallejo J.P., Caba-leiro D., Fernandez-Seara J., Lugo L. Heat transfer performance of a nano-enhanced propylene glycol:water mixture. *International Journal of Thermal Sciences*. 2019; 139:413-423. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.02.012
13. Okolie J.A. Insights on production mechanism and industrial applications of renewable propylene glycol. *iScience*. 2022; 25(9):104903. DOI: 10.1016/j.isci.2022.104903
14. Cordeiro Junior L.C., Nogueira E. Influence of the coolant flow containing silver nanoparticles (Ag) from an aqueous solution based on ethylene glycol (EG50%) on the thermal-hydraulic performance of an automotive radiator. *World Journal of Nano Science and Engineering*. 2020; 10(01):14-26. DOI: 10.4236/wjnse.2020.101002
15. Izadi F., Ranjbarzadeh R., Kalbasi R., Afrand M. A new experimental correlation for non-Newtonian behavior of COOH-DWCNTs/antifreeze nanofluid. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2018; 98:83-89. DOI: 10.1016/j.physe.2017.12.031
16. Ferrão Teixeira Alves L.O., Henríquez J.R., da Costa J.A.P., Abramchuk V. Comparative performance analysis of internal combustion engine water jacket coolant using a mix of Al₂O₃ and CuO-based nanofluid and ethylene glycol. *Energy*. 2022; 250:123832. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123832
17. Li X., Zou C., Qi A. Experimental study on the thermo-physical properties of car engine coolant (water/ethylene glycol mixture type) based SiC nano-fluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016; 77:159-164. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.08.009
18. Soltanimehr M., Afrand M. Thermal conductivity enhancement of COOH-functionalized MWCNTs/ethylene glycol–water nanofluid for application in heating and cooling systems. *Applied Thermal Engineering*. 2016; 105:716-723. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.089
19. Goodarzi M., Kherbeet A.Sh., Afrand M., Sadeghinezhad E., Mehrali M., Zahedi P. et al. Investigation of heat transfer performance and friction factor of a counter-flow double-pipe heat exchanger using nitrogen-doped, graphene-based nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016; 76:16-23. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.018
20. Havanov P.A., Barynin K.P. Features of the use of water glycol coolants in autonomous heat supply systems. *AVOK*. 2003; 7. (rus.).
21. Havanov P.A. Thermotechnical conditions for the use of water glycol coolants in autonomous heat supply systems. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2003; 8. (rus.).
22. Goltayev O.M. The use of antifreeze in heating, ventilation, air conditioning systems. *AVOK*. 2012; 6. (rus.).
23. Toropov A.L. Hydraulic and thermal stability of independent systems of apartment heating. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(7):944-953. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.944-953 (rus.).
24. Yang L., Hu Y. Toward TiO₂ nanofluids — Part 1: Preparation and properties. *Nanoscale Research Letters*. 2017; 12(1). DOI: 10.1186/s11671-017-2184-8
25. Ramadhan A.I., Azmi W.H., Mamat R. Experimental investigation of thermo-physical properties of tri-hybrid nanoparticles in water-ethylene glycol mixture. *Walailak Journal of Science and Technology*. 2021; 18(8). DOI: 10.48048/wjst.2021.9335
26. Gundem A., Hosoz M., Keklik E. Performance comparison of propylene glycol-water and ethylene glycol-water mixtures as engine coolants in a flat-tube automobile radiator. *International Journal of Automotive Science and Technology*. 2021; 147-156. DOI: 10.30939/ijastech.914901
27. Muniak D.P. The impact of the use of anti-freeze substances on the heating installation thermo-hydraulic parameters and energy consumption. *Heat Transfer Engineering*. 2021; 42(3-4):347-353. DOI: 10.1080/01457632.2019.1699305
28. Serkani G., Poncet S. Ethylene- and propylene-glycol based nanofluids: a litterature review on their thermophysical properties and thermal performances. *Applied Sciences*. 2018; 8(11):2311. DOI: 10.3390/app8112311

29. Bidstrup N., van Elburg M., Lane K. 2001. *Promotion of energy efficiency in circulation pumps, especially in domestic heating systems*. Washington, DC. Personal communication CLASP & Danish Low Carbon Transition Unit 2013, Energy Policy Toolkit for Energy Efficiency in Appliances, Lighting, and Equipment. 2023.
30. Toropov A.L. On the issue of energy efficiency of circulation pumps for wall-mounted convection gas boilers. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2020; 11. (rus.).

Received January 30, 2023.

Adopted in revised form on March 20, 2023.

Approved for publication on April 19, 2023.

B i o n o t e s : Alexey L. Toropov — Candidate of Technical Sciences, General Director — Chief Designer; **Engineering Center “April”**; 13 Schelkovskoe shosse, Moscow, 105122, Russian Federation; ID RISC: 1030472, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 697.328

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.737-746

Влияние накипных отложений на температурный режим в каналах теплообменников пластинчатого типа

Юлия Васильевна Елистратова, Артём Сергеевич Семиненко,
Валерий Анатольевич Уваров, Всеволод Афанасьевич Минко

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На современном этапе развития системы теплоснабжения наблюдается переход от кожухотрубных конструкций к пластинчатому исполнению теплообменных аппаратов (ТА). Их достоинства — компактность и эффективность. Основной эксплуатационной проблемой является загрязнение межпластинных каналов, из-за чего снижается тепловая эффективность и увеличиваются эксплуатационные затраты. Цель исследования — доказать влияния накипных отложений и индивидуальных гидравлических условий в каждом канале на температурный режим ТА пластинчатого типа. Поскольку этот вопрос в теории ТА недостаточно изучен и имеет значительные допущения, то диагностика засорения каналов некорректна.

Материалы и методы. Для установления гидродинамического режима ТА пластинчатого типа применяется теория характеристик сопротивления гидравлических систем. Температуры греющего и нагреваемого теплоносителей на выходе из каждого канала теплообмена устанавливаются на основании закона сохранения масс. Данный метод позволил использовать результаты гидродинамического расчета по характеристикам сопротивления для расчета температурного режима пластинчатого ТА по длине пакета пластин, в том числе с учетом влияния накипных отложений. Достоверность предложенных методик определялась методом сравнения по критерию Пирсона и Стьюдента с результатами компьютерного моделирования.

Результаты. Выявлена зависимость между конечными температурами теплоносителя на выходе из каналов от неравномерного потокораспределения теплоносителя с учетом загрязненности каналов. Применение теории характеристик сопротивления для расчета теплогидродинамического режима пластинчатого ТА и предлагаемого расчета теплового режима, в том числе с учетом фактора накипеобразования, даст возможность повысить точность диагностики загрязнения и снизить эксплуатационные потери.

Выводы. Проведенные исследования подтверждают влияние накипных отложений ТА и индивидуальных гидравлических условий межпластинных каналов на температурный режим. Результаты исследования представляют научный и практический интерес при изучении и разработке интенсифицированных поверхностей теплообмена с целью повышения энергетических показателей ТА, а также в области диагностики режимных параметров водогрейного оборудования в период его эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидравлические условия, численные исследования, накипеобразование, энергоэффективность, пластинчатые теплообменные аппараты, тепловой режим

Благодарности. Исследования проводились в рамках гранта Президента РФ для ведущей научной школы № НШ-25.2022.4 с использованием оборудования Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Елистратова Ю.В., Семиненко А.С., Уваров В.А., Минко В.А. Влияние накипных отложений на температурный режим в каналах теплообменников пластинчатого типа // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С. 737–746. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.737-746

Автор, ответственный за переписку: Юлия Васильевна Елистратова, tg.v.info@mail.ru.

Influence of scale deposits on the temperature conditions in the channels of plate-type heat exchangers

Yulia V. Elistratova, Artem S. Seminenko, Valeriy A. Uvarov, Vsevolod A. Minko
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. At the present stage of development of the heat supply system, the transfer from shell-and-tube constructions to the plate version of heat exchange apparatus is observed. Their main advantages are compactness and efficiency. The main operational problem is the fouling of the inter-plate channels as a result of which the thermal efficiency decreases and operational costs increase. The aim of the work is to establish the dependence of fouling and individual hydraulic conditions in each channel on the temperature regime of a plate-type heat exchanger. Since this issue in the theory of heat exchange apparatuses is not well studied in and has significant assumptions, the diagnosis of fouling of channels is incorrect.

Materials and methods. The theory of resistance characteristics of hydraulic systems is used to determine the hydrodynamic

mode of plate-type heat exchange apparatus. The temperatures of heating and heated heat carriers at the outlet of each heat exchange channel are determined on the basis of the mass conservation law. This method made it possible to use the results of hydrodynamic calculation of resistance characteristics to calculate the temperature conditions of a plate heat exchange apparatus along the length of the plate pack, including the effect of scale deposits. The validity of the proposed methods was determined by comparing the Pearson's and Student's criteria with the results of computer modelling.

Results. The dependence between final temperatures of the coolant at outlet of channels depending on the flow distribution of the coolant, taking into account channel impurity was found. The application of the theory of resistance characteristics to calculate the thermal-hydrodynamic mode of the plate heat exchanger and the proposed calculation of the thermal regime, including taking into account the factor of fouling, will improve the accuracy of pollution diagnosis and reduce operating losses.

Conclusions. The conducted research confirms the influence of fouling of heat-exchange apparatuses and individual hydraulic conditions of inter-plate channels on the temperature regime. Results of research represent scientific and practical interest at studying and development of the intensified surfaces of heat exchange with the purpose of increase of power indicators of heat-exchange apparatuses, and also in the field of diagnostics of mode parameters of water-heating equipment in the period of its operation.

KEYWORDS: hydraulic conditions, numerical studies, scaling, energy efficiency, plate heat exchange apparatuses, thermal regime

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of the Grant of the President of the Russian Federation for the leading scientific school No. SC-25.2022.4 using the equipment of High Technology Centre of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION: Elistratova Yu.V., Seminenko A.S., Uvarov V.A., Minko V.A. Influence of scale deposits on the temperature conditions in the channels of plate-type heat exchangers. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):737-746. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.737-746 (rus.).

Corresponding author: Yulia V. Elistratova, tg.v.info@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 № 1715-р, определяет основные перспективы и программы теплоэнергетического комплекса, направленные на развитие энергетики РФ. Одна из целей программы — организация надежного теплоснабжения населения, а также обеспечение рациональной и эффективной работы системы горячего водоснабжения [1, 2].

Теплообменные аппараты (ТА) пластинчатого типа в рамках концепции теплоэнергетической сети третьего поколения являются неотъемлемым структурным элементом [3, 4], обеспечивающим показатели эффективности тепловой сети: энергосбережение, повышение качества предоставляемых услуг, надежность и требуемые параметры теплоносителя [5–7].

Широкий модельный ряд, модернизированная геометрия пластин, высокая технологичность конструктивных параметров и коэффициент теплопередачи, относительно малые размеры формируют высокоэнергетические показатели работы теплообменного оборудования пластинчатого типа [8–10]. Таким образом, следует полагать, что эксплуатация пластинчатых теплообменников в сфере теплоснабжения — залог снижения энергоемкости и роста эффективности функционирования распределительных пунктов тепла.

Качество исходной воды (содержание накипеобразующих солей) во многих городах России [9, 10] и конструктивные особенности пластинчатых теплообменных аппаратов (относительно малые проходные сечения межпластинных каналов) спо-

собствуют образованию и накоплению различного рода загрязнений [11–13]. В результате чего теплогидродинамические характеристики аппаратов снижаются [11, 14–16], что приводит к экономическим потерям предприятия. В работах [6, 13, 17, 18] определено влияние загрязнения теплообменников на экономические потери технологических предприятий. Данная проблема также наблюдается и в высокоразвитых странах (Великобритания, США): оценка потерь составляет 0,25 % валового национального продукта (ВНП) [17], а для промышленных предприятий Новой Зеландии — около 0,15 % от ВНП [18].

Поэтому своевременная очистка, диагностика состояния и предупреждение загрязнения теплообменных каналов — актуальный вопрос, игнорирование которого приводит к экономическим потерям, которые возможно минимизировать, учитывая режимные параметры и условия функционирования гидравлической сети [19].

Контроль параметров работы теплообменных аппаратов как гидравлическим режимом — потери давления, так и тепловым режимом — начальные и конечные температуры теплоносителей, является важным условием в поддержании эффективности и безаварийной работы системы [10, 14, 19]. Важны применяемые методы и устройства сбора и анализа информации. Корректность результата диагностики зависит от используемого математического описания гидродинамических процессов. Данный вопрос в теории теплообменных аппаратов недостаточно изучен и имеет значительные допущения, что служит причиной некорректной диагностики загрязнения каналов [20, 21]. Кроме того, существующие теории режимов теплообменных аппаратов основаны

на применении постоянных безразмерных параметров без учета режимов работы [22], т.е. без учета отклонения расчетного режима работы аппарата по отношению к фактическому.

Известны условия формирования накипи в пластинчатых теплообменниках, обобщающие имеющиеся подходы описания процесса солеотложения [23]. Достоинство данной теории заключается в учете времени эксплуатации оборудования, специфики геометрии теплообменных пластин и скорости движения теплоносителей. Недостаток — условие постоянного и равномерного потокораспределения и температурного режима теплоносителя между каналами.

В исследовании [24] исключается допущение о равномерности потокораспределения и предлагается использовать теорию характеристик сопротивления гидравлических систем для определения потокораспределения теплоносителя по каналам ТА пластинчатого типа. Методика позволяет учитывать взаимное расположение каналов и установить зависимость распределения потоков жидкости между каналами в аппарате, учитывая их взаимное расположение.

Так как одним из ключевых факторов образования солеотложения на поверхности пластин (внутри каналов) является температура рабочей среды, то и интенсивность процесса накипобразования в каждом канале будет зависеть от температурного режима в нем.

Цель исследования — доказать влияние наличия накипных отложений и индивидуальных гидравлических условий в каждом канале на температурный режим ТА пластинчатого типа.

Задачи:

- предложить аналитическое решение задачи теплового режима в каналах теплообменника с учетом неравномерности расходов и наличия накипных отложений;
- изучить влияние степени загрязнения каналов теплообмена на температурный режим в каналах по длине пакета пластин;
- провести численные исследования температурного режима пластинчатого ТА.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве рассматриваемого устройства принимаем ТА, который состоит из 12 пластин площадью 0,15 м² каждая, с начальными температурами 95 и 5 °С при одностороннем подключении и прямоточной схеме движения теплоносителя. Общий расход греющего теплоносителя $G_r = 5$ кг/с, нагреваемого $G_x = 3$ кг/с. Нумерация каналов производится от неподвижной плиты. Допущения: тепловые потери в окружающую среду и фазовые переходы отсутствуют.

Отложение накипи на теплообменных пластинах приводит к уменьшению поперечного сечения канала f_k : уменьшение межпластинного зазора равно

толщине дополнительного слоя (в дальнейших расчетах принято допущение о равномерном образовании накипи по длине пластин):

$$f_k = a(b - \delta_n), \quad (1)$$

где a — ширина рабочей пластины, м; b — рабочая ширина канала (расстояние между пластинами), м; δ_n — толщина накипи, м.

Гидравлическая характеристика канала зависит от величины слоя накипи. Ее изменение определяется по полученной ранее зависимости характеристики сопротивления канала с учетом образования накипи на поверхности пластины для пластинчатого ТА, Па/(кг/ч)², [24]:

$$S_k = \xi_k \left(\frac{\rho w_k^2}{2 \cdot (\rho \cdot w_k \cdot a(b - \delta_n)_k)^2} \right), \quad (2)$$

где ξ_k — условный коэффициент гидравлического сопротивления межпластинного канала [23]; ρ — плотность теплоносителя, кг/м³; w — скорость теплоносителя в канале, м/с; нижний индекс «к» указывает маркировку отдельного канала.

Принято уравнение для расчета теплового баланса отдельно взятого канала в виде:

$$W_n \cdot \Delta t_{kn} = K_n \cdot F_n \cdot \Delta t_{\Pi n} + K_{n+1} \cdot F_{n+1} \cdot \Delta t_{\Pi n+1}, \quad (3)$$

где W — водяной эквивалент, нижний индекс соответствует номеру пластины n и принимает значения от 1 до $(N-1)$, где N — число пластин в ТА; Δt_k — разность температур канала на входе и выходе из канала; K — коэффициент теплопередачи; F — площадь поверхности пластины; Δt_{Π} — разность температур между теплоносителями, разделенными соответствующим номером пластины.

Конечные температуры греющего t_r'' и нагреваемого t_x'' теплоносителей определяем с учетом закона сохранения масс:

$$t_r'' = \frac{\sum(G_i) \cdot (t_i'')}{G_r'} = \frac{W_i \cdot t_i''}{W_r}, \quad (4)$$

$$t_x'' = \frac{\sum(G_j) \cdot (t_j'')}{G_x'} = \frac{W_j \cdot t_j''}{W_x}, \quad (5)$$

где $\Sigma(G_i)$ и $\Sigma(G_j)$ — суммарные расходы теплоносителей по каналам, кг/ч; t_i'' и t_j'' — температуры на выходе из i -го греющего и j -го нагреваемого каналов соответственно, °С; G_r' и G_x' — общие массовые расходы теплоносителей, кг/ч; W_r и W_x — водяные эквиваленты сред, Дж/с·°С.

Для расчета принимаем толщины накипи δ_n , соответствующие определенным периодам эксплуатации [23]: 0,15 мм (14 дней эксплуатации); 0,31 мм (31 день эксплуатации); 0,53 мм (62 дня эксплуатации); 0,9 (180 дней эксплуатации).

Для решения поставленной задачи использован вычислительный комплекс Maple, листинг программы приведен на рис. 1.

```
restart;
k := 6954 : F := 0.15 : pl := 12 : kan := pl - 1 :
W1 :=  $\frac{4197}{kan} \cdot 5$  : t1 := 95 : #характеристика среды в нечетных каналах
W2 :=  $\frac{4197}{kan} \cdot 3$  : t2 := 5 : #характеристика среды в четных каналах

if t1 > t2 then #задание разности температур в канале
  for i from 1 to (kan) do
    if frac( $\frac{i}{2}$ ) = 0 then  $\Delta k[i] := a[i] - t2 : W[i] := W2$ 
      else  $\Delta k[i] := t1 - a[i] : W[i] := W1$  fi; od;
  else
    for i from 1 to (kan) do
      if frac( $\frac{i}{2}$ ) = 0 then  $\Delta k[i] := a[i] - t1 : W[i] := W1$ 
        else  $\Delta k[i] := t2 - a[i] : W[i] := W2$  fi; od; fi;

if t1 > t2 then #прямоток: температурный напор через пластину
  for i from 2 to (pl - 1) do
    if frac( $\frac{i}{2}$ ) = 0 then  $\Delta p[i] := \frac{(t1 - t2) - (a[i - 1] - a[i])}{\ln(\frac{t1 - t2}{a[i - 1] - a[i]})}$ 
      else  $\Delta p[i] := \frac{(t1 - t2) - (a[i] - a[i - 1])}{\ln(\frac{t1 - t2}{a[i] - a[i - 1]})}$  fi; od;
  else
    for i from 2 to (pl - 1) do
      if frac( $\frac{i}{2}$ ) = 0 then  $\Delta p[i] := \frac{(t2 - t1) - (a[i] - a[i - 1])}{\ln(\frac{t2 - t1}{a[i] - a[i - 1]})}$ 
        else  $\Delta p[i] := \frac{(t2 - t1) - (a[i - 1] - a[i])}{\ln(\frac{t2 - t1}{a[i - 1] - a[i]})}$  fi; od; fi;
```

Рис. 1. Листинг программы расчета температурного режима в каналах пластинчатого теплообменного аппарата в вычислительном комплексе Maple

Fig. 1. Listing of the program for calculating the temperature conditions in the channels of a plate heat exchange apparatus in the universal mathematical environment Maple

Расчет теплового режима с учетом общепринятых допущений о равенстве тепловых и гидравлических условий между каналами по длине пакета пластин осуществляется по методике В.В. Нащокина [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2, 3 представлены результаты расчета конечных температур греющего t_r'' и нагреваемого t_x'' теплоносителей по длине пакета пластин при различной толщине отложений. Для сравнения приведены значения конечных температур, определенных в равномерном потокораспределении между каналами (значения конечных температур рабочей жидкости принимают равные значения между всеми каналами в рамках греющего или нагреваемого контура соответственно) при отсутствии отложений.

Расчет при условии толщины накипи 0 мм учитывает неравномерность потокораспределения из-за геометрического расположения каналов [25]. Экстремум температур греющего теплоносителя крайних каналов объясняется адиабатностью с окружающей средой, т.е. их теплообменная поверхность снижена относительно промежуточных каналов. Различие температур остальных каналов объясняется неравномерностью потокораспределения вследствие гидродинамических процессов. Следует отметить, что при увеличении разброса отношений расходов первого и последнего каналов (при увеличении количества теплообменных пластин) увеличится и разброс в значениях конечных температур.

С увеличением толщины накипных отложений наблюдается снижение температуры от первого канала к последнему (наиболее удаленного от входа теплоносителя в распределительный коллектор) по холодному контуру циркуляции теплоносителя. Отклонение температуры на выходе из 5-го канала по отношению к среднему значению t_x'' в 1–4 каналах составляет от 2,0 до 1,6 °С в соответствии с толщиной накипи от 0,15 до 0,53 мм.

Поэтапное уравнивание температур в каналах объясняется односторонним подключением аппарата и существенным снижением расхода теплоноси-

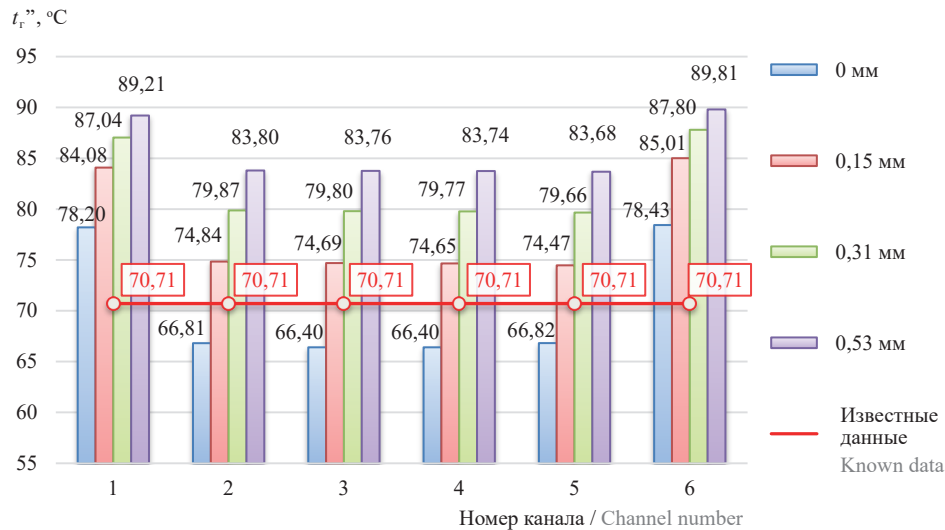


Рис. 2. Значение конечных температур греющего теплоносителя

Fig. 2. The temperature value of the heating coolant at the outlet of the heat exchange channels

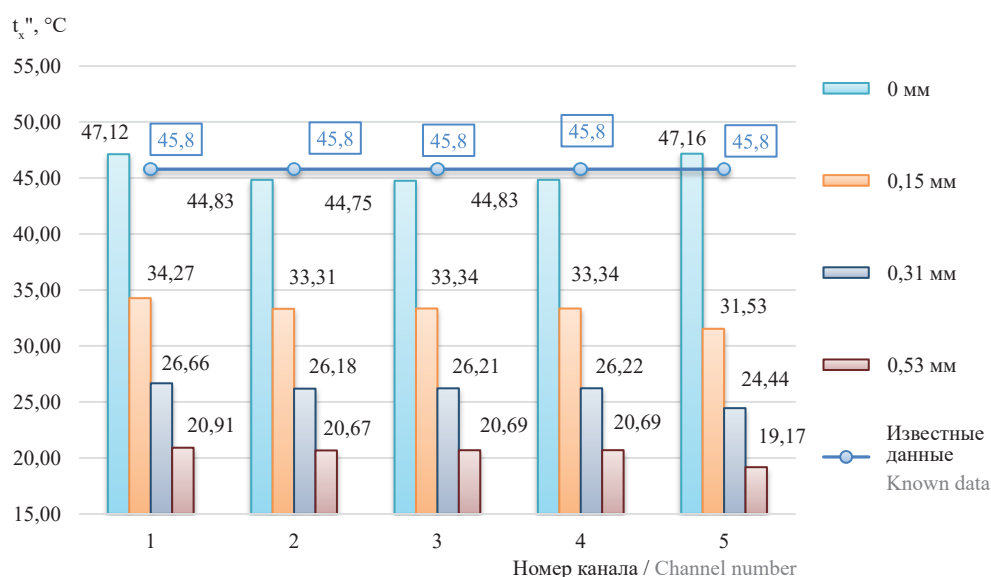


Рис. 3. Значение конечных температур нагреваемого теплоносителя
Fig. 3. The temperature value of the heated coolant at the outlet of the channels

теля для наиболее удаленных каналов по греющему и нагреваемому контурам при снижении проходного сечения каналов из-за образования накипи. При этом максимальное расхождение температур теплоносителя по греющему контуру составляет 12 °С в условиях «чистой» поверхности и 6,1 °С при наличии накипных отложений толщиной 0,53 мм, что определяется снижением теплового потока через теплообменную стенку из-за снижения общего коэффициента теплопередачи с учетом слоя накипи.

Таким образом, установлена зависимость между конечными температурами теплоносителя на выходе из каналов в зависимости от потокораспределения теплоносителя с учетом загрязненности каналов, которая подтверждается численным исследованием теплового режима в каналах теплообмен-

ника с учетом неравномерного распределения потоков по длине пакета пластин (рис. 4). Компьютерное моделирование проводилось в среде SolidWorks. Для описания турбулентного течения принята стандартная математическая k – ε модель

Результаты аналитического и численного исследования доказывают влияние наличия накипных отложений и индивидуальных гидравлических условий в каждом канале на температурный режим ТА пластинчатого типа.

С целью анализа функциональной зависимости между полученными значениями конечных температур используем коэффициент корреляции Пирсона, как характеристику степени сходимости результатов расчета по предложенным аналитическим зависимостям и численному методу расчета.

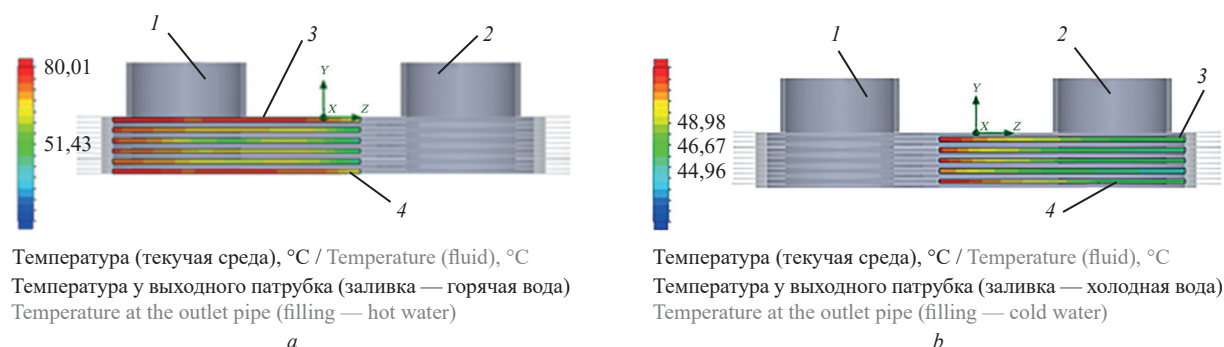


Рис. 4. Визуализация полей температур жидкости на выходе из каналов: 1 — входной патрубок греющего теплоносителя; 2 — выходной патрубок нагреваемого теплоносителя; а — по греющему контуру: 3 — первый канал теплообмена по греющей стороне; 4 — последний канал теплообмена по греющей стороне; б — по нагреваемому контуру: 3 — первый канал теплообмена по нагреваемой стороне; 4 — последний канал теплообмена по нагреваемой стороне
Fig. 4. Visualization of the temperature fields of the liquid at the outlet of the channels: 1 — the inlet pipe of the heating coolant; 2 — the outlet pipe of the heated coolant; а — along the heating circuit: 3 — the first heat exchange channel on the heating side; 4 — the last heat exchange channel on the heating side; б — along the heated circuit: 3 — the first channel heat exchange on the heated side; 4 — the last heat exchange channel on the heated side

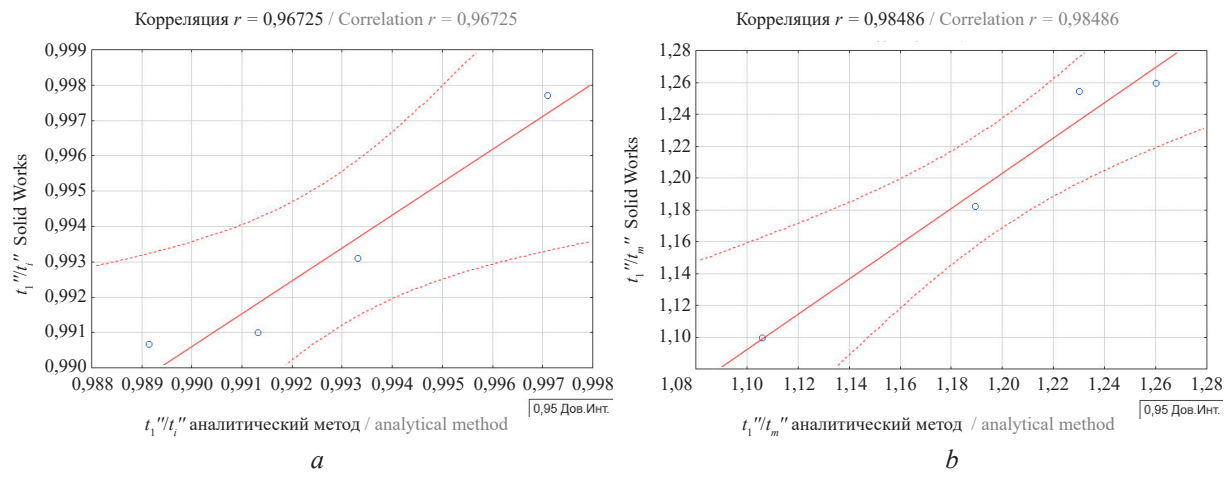


Рис. 5. Рассеяние температур греющего теплоносителя между крайними каналами: *a* — для отношения конечных температур теплоносителя из первого канала к температуре из последнего канала по греющей стороне t_1''/t_i'' ; *b* — для отношения конечной температуры из первого канала к температуре из канала по греющей стороне без учета накипи и неравномерного потокораспределения t_1''/t_m''

Fig. 5. Diagrams of the scattering function of the temperature ratios of the heating coolant between the extreme channels obtained by numerical and analytical calculation methods: *a* — for the ratio of the temperature of the coolant at the outlet of the first channel to the temperature at the outlet of the last channel on the heating side t_1''/t_i'' ; *b* — for the ratio of the temperature of the coolant at the outlet of the first channel to the temperature at the outlet of the channel on the heating side according to the known data t_1''/t_m''

Для обезразмеривания переменных примем следующие отношения:

- конечные температуры из первого канала к конечной температуре из последнего канала по греющей стороне t_1''/t_i'' ;
- конечные температуры из первого канала к конечной температуре по греющей стороне без учета накипи и неравномерного потокораспределения t_1''/t_m'' ;
- конечные температуры из последнего канала к конечной температуре по греющей стороне без учета накипи и неравномерного потокораспределения t_i''/t_m'' .

Условия формирования накипи $\delta_n = 0; 0,15; 0,31$ и $0,51$ мм.

Построение квадратной корреляционной матрицы и графика рассеяния выбранных переменных производилось в программном комплексе Statistica.

На рис. 5, 6 представлены диаграммы рассеяния и полученные коэффициенты корреляции Пирсона для выбранных отношений температур теплоносителя.

Следует отметить, что во всех случаях положительные и приближаются к единице: минимальное значение r достигает значения 0,96725 при сравнении величин t_1''/t_i'' , полученных численным и аналитическим методами расчета, а максимальное составляет $r = 0,99928$ при сравнении величин

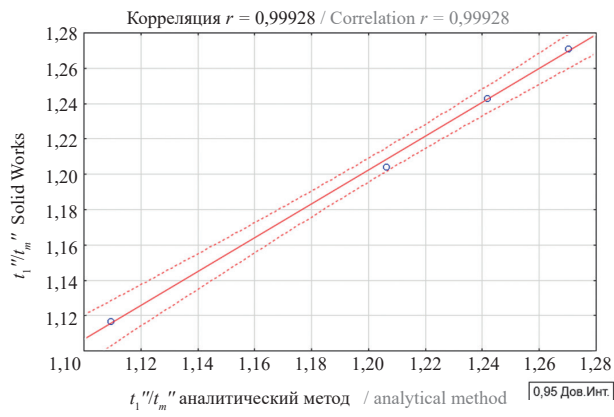


Рис. 6. Рассеяние конечных температур из последнего канала к температуре из канала по греющей стороне без учета накипи и неравномерного потокораспределения t_i''/t_m''

Fig. 6. Diagram of the scattering function for the ratio of the temperature of the coolant at the outlet of the last channel to the temperature at the outlet of the channel on the heating side according to the known data t_i''/t_m''

t_1''/t_m'' . Полученные коэффициенты корреляции Пирсона для значений рассматриваемых отношений температур греющего теплоносителя на выходе из каналов, рассчитанных аналитическим методом с учетом расположения каналов и численным методом, подтверждают:

1) прямую корреляцию с отсутствием точек выброса между анализируемыми значениями;

2) функциональная связь между значениями сравниваемых параметров, полученных методом характеристик сопротивления и численным методом расчета, близким к линейному;

3) сходимость функций изменения значений сравниваемой температуры греющего теплоносителя на выходе из каналов по методу характеристик и по численному методу расчета в зависимости от толщины накипи предполагает достоверность результатов расчета рассматриваемыми способами.

Значения t_i'' и t_j'' в каналах, полученные аналитическим и численным методами расчета, также оценивались по критерию Стьюдента. Расхождения между сравниваемыми величинами оказались статистически незначимы, что подтверждает удовлетворительную степень сходимости результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования подтверждают влияние накипных отложений и индивидуальных гидравлических условий каналов на температурный режим ТА пластинчатого типа. Выполненные аналитические и численные исследования подтверждают снижение тепловой эффективности теплообменных аппаратов из-за падения конечных температур теплоносителя при нарушении потокораспределения вследствие загрязнения теплообменных каналов. Применение теории характеристик сопротивления для расчета теплогидродинамического режима пластинчатого ТА и предлагаемого расчета теплового режима, в том числе с учетом фактора накипеобразования, позволит повысить точность диагностики загрязнения и снизить эксплуатационные потери. Валидация предложенной методики расчета пластинчатого теплообменника обеспечивается удовлетворительной степенью сходимости полученных результатов различными методами расчета. Результаты исследования представляют научный и практический интерес при изучении и разработке интенсифицированных поверхностей теплообмена с целью повышения энергетических показателей теплообменных аппаратов, а также в области диагностики режимных параметров водогрейного оборудования в период его эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рыбкина Г.В., Яблокова А.А. Современное состояние теплоснабжения и его развитие // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 2. С. 89–99. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2(4)-89-99
2. Буланин В.А. Алгоритм анализа энергоэффективности источника теплоснабжения // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 54–62. DOI: 10.34031/article_5da452a45dbf30.07663447
3. Соловьев В.И. Цифровая трансформация систем теплоснабжения муниципального образования // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 52–61. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-05
4. Mol C. GeoWatt research of fourth-generation thermal grids // EnergyVille. 2018. URL: <https://www.energyville.be/en/research/geowatt-research-fourth-generation-thermal-grids>
5. Lund H., Østergaard P.A., Chang M., Werner S., Svendsen S., Sorknaes P. et al. The status of 4th generation district heating: Research and results // Energy. 2018. Vol. 164. Pp. 147–159. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.206
6. Sundar S., Rajagopal M.C., Zhao H., Kuntumalla G., Meng Y., Chang H.C. et al. Fouling modeling and prediction approach for heat exchangers using deep learning // International Journal of Heat

- and Mass Transfer. 2020. Vol. 159. P. 120112. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120112
7. Khavin G. Simulation and design of welded plate heat exchangers with channels of different corrugation height // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. Pp. 453–462. DOI: 10.1007/978-3-319-93587-4_47
8. Shah R.K. Heat exchangers. Encyclopedia of energy technology and the environment. New York : Wiley, 1994. Pp. 1651–1670.
9. Рыдальина Н.В., Аксенов Б.Г., Степанов О.А., Антонова Е.О. Применение пористых материалов в теплообменных аппаратах системы теплоснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 3. С. 3–13. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13
10. Елистратова Ю.В., Семиненко А.С., Минко В.А. Актуальность моделей загрязнения для диагностики состояния пластинчатых теплообменников // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40
11. Xu Z., Han Z., Wang J., Li Y. Numerical simulation of CaSO_4 crystallization fouling in a rectangular channel with vortex generators // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 101. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.12.014
12. Томилин А.К., Беспалов В.И., Беспалов В.В. Технология магнитной обработки воды против солеотложения: теория и практика // Известия Том-

ского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 1. С. 54–63. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/2999

13. Berce J., Zupančič M., Može M., Golobič I. A review of crystallization fouling in heat exchangers // *Processes*. 2021. Vol. 9. Issue 8. P. 1356. DOI: 10.3390/pr9081356

14. Mukhametzyanov Z.R., Kulakov P.A., Rubtsov A.V. Methods for monitoring the technical condition of plate heat exchangers // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1582. Issue 1. P. 012054. DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012054

15. Татауринцев В.А. Особенности накипеобразования в трубах теплообменных аппаратов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2022. Т. 22. № 1. С. 97–105. DOI: 10.14529/power220111

16. Kumar A., Yadav S., Mondloe D., Barewar V., Kumar Y., Pandit V. CFD analysis of Gypsum crystallization fouling in 2D plate heat exchangers // *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2022. Vol. 9. Issue 86. DOI: 10.19101/IJATEE.2021.874616

17. Kananeh A.B., Peschel J. Fouling in Plate Heat Exchangers: Some Practical Experience // *Heat Exchangers — Basics Design Applications*. 2012. DOI: 10.5772/34026

18. Müller-Steinhagen H., Malayeri M.R., Watkinson P. Fouling of heat exchangers-new approaches to solve an old problem // *Heat Transfer Engineering*. 2005. Vol. 26. Issue 1. Pp. 1–4. DOI: 10.1080/01457630590889906

19. Faes W., Lecompte S., Ahmed Z., Bael J., Salenbien R., Verbeken K. et al. Corrosion and corrosion pre-

vention in heat exchangers // *Corrosion Reviews*. 2019. Vol. 37. Issue 2. Pp. 131–155. DOI: 10.1515/corrrev-2018-0054

20. Юркина М.Ю. Совершенствование теплообменных аппаратов водяных систем теплоснабжения повышением энергетической эффективности: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 180 с.

21. Кулаков П.А., Рубцов А.В., Афанасенко В.Г., Зубкова О.Е., Иванова К.К., Шарипова Р.Р. Выбор определяющих параметров технического состояния, оказывающих влияние на остаточный срок службы теплообменного оборудования // *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. № 1. С. 97–105. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2451

22. Рафальская Т.А., Рудяк В.Я. Влияние расходов теплоносителей на параметр теплообменника при переменных режимах его работы // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 5. С. 621–633. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.621-633

23. Чернышев Д.В. Прогнозирование накипеобразования в пластинчатых водонагревателях для повышения надежности их работы : дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2002. 182 с.

24. Елистратова Ю.В., Семиненко А.С., Минко В.А., Рамазанов Р.С. Особенности распределения потоков жидкости в пластинчатых теплообменниках // *Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова*. 2020. № 12. С. 47–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-47-55

25. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача : учебное пособие. М. : Высшая школа, 1969. 560 с.

Поступила в редакцию 31 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 19 апреля 2023 г.

Об авторах: **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; tgiv.info@mail.ru;

Артём Сергеевич Семиненко — 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: 637658, Scopus: 57193724941, ResearcherID: L-7237-2015, ORCID: 0000-0002-0581-4391; seminenko.as@gmail.com;

Валерий Анатольевич Уваров — доктор технических наук, профессор, 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: 456690, Scopus: 7006666298, ORCID: 0000-0003-3614-8536; tgiv@bstu.ru;

Всеволод Афанасьевич Минко — доктор технических наук, профессор, 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: 124780; tgiv@bstu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Rybkina G.V., Yablokova A.A. The current state of heat supply and its development. *Industrial Processes and Technologies*. 2022; 2(2):89-99. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-89-99 (rus.).

2. Bulanin V. The algorithm of analysis of energy efficiency of heat supply source. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019; 9:54-62. DOI: 10.34031/article_5da452a45dbf30.07663447 (rus.).
3. Solov'ev V.I. Digital transformation of heat supply systems of a municipality. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*. 2019; 2(14):52-61. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-05 (rus.).
4. Mol C. GeoWatt research of fourth-generation thermal grids. *EnergyVille*. 2018. URL: <https://www.energyville.be/en/research/geowatt-research-fourth-generation-thermal-grids>
5. Lund H., Østergaard P.A., Chang M., Werner S., Svendsen S., Sorknæs P. et al. The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy*. 2018; 164:147-159. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.206
6. Sundar S., Rajagopal M.C., Zhao H., Kuntumalla G., Meng Y., Chang H.C. et al. Fouling modeling and prediction approach for heat exchangers using deep learning. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020; 159:120112. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120112
7. Khavin G. Simulation and design of welded plate heat exchangers with channels of different corrugation height. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019; 453-462. DOI: 10.1007/978-3-319-93587-4_47
8. Shah R.K. *Heat exchangers. Encyclopedia of Energy Technology and the Environment*. New York, Wiley, 1994; 1651-1670.
9. Rydalina N.V., Aksenov B.G., Stepanov O.A., Antonova E.O. Application of porous materials in heat exchangers of heat supply system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(3):3-13. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13 (rus.).
10. Elistratova Y., Seminenko A., Minko V. Relevance of contamination models for diagnostics of plate heat exchangers. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020; 10:33-40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40 (rus.).
11. Xu Z., Han Z., Wang J., Li Y. Numerical simulation of CaSO₄ crystallization fouling in a rectangular channel with vortex generators. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2019; 101:42-50. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.12.014
12. Tomilin A.K., Bespalov V.I., Bespalov V.V. Technology of magnetic water treatment against scaling: theory and practice. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*. 2021; 332(1):54-63. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/2999 (rus.).
13. Berce J., Zupančič M., Može M., Golobič I. A review of crystallization fouling in heat exchangers. *Processes*. 2021; 9(8):1356. DOI: 10.3390/pr9081356
14. Mukhametzyanov Z.R., Kulakov P.A., Rubtsov A.V. Methods for monitoring the technical condition of plate heat exchangers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1582(1):012054. DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012054
15. Tatarintsev V.A. Features of scale formation in heat exchanger tubes. *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"*. 2022; 22(1):97-105. DOI: 10.14529/power220111 (rus.).
16. Kumar A., Yadav S., Mondloe D., Barewar V., Kumar Y., Pandit V. CFD analysis of Gypsum crystallization fouling in 2D plate heat exchangers. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2022; 9(86). DOI: 10.19101/IJATEE.2021.874616
17. Kananeh A.B., Peschel J. Fouling in plate heat exchangers: Some practical experience. *Heat Exchangers — Basics Design Applications*. 2012. DOI: 10.5772/34026
18. Müller-Steinhagen H., Malayeri M.R., Watkinson P. Fouling of heat exchangers-new approaches to solve an old problem. *Heat Transfer Engineering*. 2005; 26(1):1-4. DOI: 10.1080/01457630590889906
19. Faes W., Lecompte S., Ahmed Z., Bael J., Salenbien R., Verbeken K. et al. Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers. *Corrosion Reviews*. 2019; 37(2):131-155. DOI: 10.1515/corrrev-2018-0054
20. Yurkina M.Yu. *Improvement of heat exchangers of water heating systems with an increase in energy efficiency : thesis of candidate of technical sciences*. Moscow, 2009; 180. (rus.).
21. Kulakov P.A., Rubtsov A.V., Afanasenko V.G., Zubkova O.E., Ivanova K.K., Shari-pova R.R. Choice of determining parameters of the technical condition influencing the residual service life of heat exchange equipment. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta Inzhiniring Georesursov*. 2020; 331(1):97-105. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2451 (rus.).
22. Rafalskaya T.A., Rudyak V.Ya. Influence of coolant flow rates on the heat exchanger parameter at variable operation modes. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2019; 14(5):621-633. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.621-633 (rus.).
23. Chernyshev D.V. *Prediction of scale formation in plate water heaters to improve the reliability of their operation : thesis of candidate of technical sciences*. Tula, 2002; 182. (rus.).
24. Elistratova Y., Seminenko A., Minko V., Ramazanov R. Features of liquid flow distribution in plate heat exchangers references. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020; 12:47-55. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-47-55 (rus.).
25. Nashchokin V.V. *Technical thermodynamics and heat transfer : textbook*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1969; 560. (rus.).

Received January 31, 2023.

Adopted in revised form on March 20, 2023.

Approved for publication on April 19, 2023.

B I O N O T E S: **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;

Artem S. Seminenko — 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: 637658, Scopus: 57193724941, ResearcherID: L-7237-2015, ORCID: 0000-0002-0581-4391; seminenko.as@gmail.com;

Valeriy A. Uvarov — Doctor of Technical Sciences, Professor, 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: 456690, Scopus: 7006666298, ORCID: 0000-0003-3614-8536; tgv@bstu.ru;

Vsevolod A. Minko — Doctor of Technical Sciences, Professor, 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: 124780; tgv@bstu.ru.

Author contributions: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.31

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.747-756

Использование растительных отходов в очистке сточных вод, загрязненных тяжелыми металлами

Олеся Александровна Самодолова, Александр Павлович Самодолов,
Дмитрий Владимирович Ульрих, Татьяна Мопровна Лонзингер
*Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
(ЮУрГУ (НИУ)); г. Челябинск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Загрязнение окружающей среды — одна из глобальных экологических проблем современного мира. Основное направление возможного решения — переход к природоподобной экономике замкнутого цикла, где отходы одного производства используются в качестве сырья для другого производства.

Материалы и методы. В качестве сорбентов использовали отходы агропромышленного комплекса (АПК): лузгу конопли (чешуйки технической конопли, оставшиеся после обработки семян); солому — сухие стебли пшеницы, с полей Челябинской области, измельченные и прошедшие карбонизацию; лузгу гречихи гранулированную. Сорбентами являлись поверхностные сточные воды (СВ) урбанизированной территории г. Челябинска и кислый сток с одного из горнодобывающих предприятий Урала. Исследования взаимодействия в системе «сорбент – сорбат» выполняли в лабораторных условиях методом ограниченного объема при статической сорбции, когда поллютанты находились в жидкой фазе и приводились в контакт с неподвижным сорбентом в динамическом режиме на специальной установке, где загрязнители в подвижной жидкой фазе фильтровались через слой сорбента.

Результаты. В статических условиях лузга гречихи лучше сорбирует поллютанты из городского поверхностного стока. Эффективность очистки стока от ионов меди, железа, свинца и цинка составила 100 %. С увеличением температуры от 0 до 10–20 °С эффективность очистки увеличивается. Исключением является процесс сорбции ионов меди, где максимальная эффективность достигается при низкой температуре 0 °С и минимальном времени контакта с сорбентом. В динамических условиях более эффективно применение лузги конопли, которая так же показала свою эффективность при сорбции поллютантов из кислого стока с территории горнометаллургического предприятия. Достигнутый эффект очистки стока от ионов алюминия, меди, свинца равен 100 %.

Выводы. Исследованные отходы АПК являются экологически безопасным и эффективным сорбционным материалом, позволяющим извлекать тяжелые металлы (алюминий, медь, железо, свинец, цинк) из поверхностного стока городских поселений и стока горнодобывающих предприятий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сточные воды, сток горнодобывающих предприятий, лузга конопли, лузга гречихи, пшеничная солома, тяжелые металлы, водные объекты, сорбция, фильтрующая загрузка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самодолова О.А., Самодолов А.П., Ульрих Д.В., Лонзингер Т.М. Использование растительных отходов в очистке сточных вод, загрязненных тяжелыми металлами // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С.747–756. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.747-756

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Владимирович Ульрих, ulrikhdv@susu.ru.

Use of plant waste in the treatment of heavy metal polluted wastewater

Olesya A. Samodolova, Aleksandr P. Samodolov, Dmitrii V. Ulrikh,
Tatiana M. Lonzinger

South Ural State University (National Research University) (SUSU) (NRU)); Chelyabinsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Anthropogenic pollution is one of the global environmental issues of the modern world. The main approach to solving this issue is the transition to a nature-like economy of a closed cycle where the waste of one production is not accumulated but used as raw material for the other production. The article considers the possibility of using three renewable large tonnage byproducts of agro-industrial complex: technical hemp hulls, wheat straw (carbonized), and buckwheat hulls (granulated) for the manufacture of heavy metal sorbents (biosorbents). Biosorbents made of ecologically pure natural raw materials can be used for treatment of surface wastewater of urban settlements and wastewater from the territory of mining enterprises from heavy metals. The purpose of this article is to estimate the efficiency of wastewater treatment of heavy metals (in particular, Al, Cu, Fe, Pb, and Zn).

Materials and methods. The sorbents in this study were made from agro-industrial byproducts: hemp hulls (by-product of technical hemp processing); straw (dry wheat stalks from fields in Chelyabinsk Region, crushed and carbonized); granulated buckwheat hull. The sorbate was surface wastewater urbanized area from Chelyabinsk city and acid mine drainage from the

Ural region mining enterprise. Laboratory studies of the interactions occurring in the sorbent-sorbate system were carried out using the limited volume method with static sorption, wherein the pollutants were in the liquid phase and brought into contact with a static sorbent and a dynamic test, wherein the pollutants in a mobile liquid phase were filtered through a layer of sorbent.

Results. The structure and surface composition of agro-industrial wastes such as hemp hulls, carbonized straw, and granulated buckwheat hulls (biosorbents) were studied. The obtained data confirmed the ecological safety of the studied materials. The main chemical elements in their composition are carbon, oxygen, potassium. The efficiency of sorption by the biosorbents in removing heavy metals from urban surface wastewater and mining-influenced water was determined.

The research data showed that under static conditions, buckwheat hulls best absorb pollutants from urban surface wastewater, removing copper, iron, lead, and zinc ions from surface wastewater with 100 % efficiency. With the increase of temperature from 0 °C to 10–20 °C, the efficiency of purification also increases. An exception is the process of copper ions sorption, where the maximum efficiency is achieved at 0 °C with minimum sorbent contact time.

Under dynamic conditions, it is more effective to use hemp hulls, also showing its efficiency in removing pollutants from acid mine drainage — 100 % of aluminum, copper, and lead ions were removed.

Conclusions. The obtained results show that the examined agro-industrial byproducts are ecologically safe and effective sorption materials and allow extracting heavy metals (aluminum, copper, iron, lead, zinc) from urban surface and mining enterprises runoff.

KEYWORDS: wastewater, mining-influenced water, hemp hulls, buckwheat hulls, wheat straw, heavy metals, water bodies, sorption, filter media

FOR CITATION: Samodolova O.A., Samodolov A.P., Ulrikh D.V., Lonzing T.M. Use of plant waste in the treatment of heavy metal polluted wastewater. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):747-756. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.747-756 (rus.).

Corresponding author: Dmitriy V. Ulrikh, ulrikhdv@susu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап существования человечества называют цивилизацией отходов. Развитие промышленности в крупных городах, рост объемов производства в агропромышленном комплексе, развитие логистики и технологий, безусловно, улучшают качество жизни людей, но также приводят к неблагоприятным последствиям для окружающей среды. Образуются многотоннажные отходы, которые утилизируются в лучшем случае при помощи захоронения или при работе сельскохозяйственных предприятий, остаются на полях, усугубляя тем самым негативное воздействие на природные системы. Наиболее опасны кислые стоки с территорий предприятий горнодобывающего комплекса, в которых концентрация тяжелых металлов в сотни, а иногда и тысячи раз превышает экологические нормы.

Основное направление возможного решения проблемы — переход к природоподобной экономике замкнутого цикла, где отходы одного производства не накапливаются, а используются в качестве сырья для другого производства.

В настоящее время существует немало попыток найти применение различным видам растительных отходов: в пищевой промышленности (красители [1–5], растительное масло [6], добавки [7], субстраты для выращивания грибов [8], сырье для получения комплекса продуктов тонкого органического синтеза [9], производство этилового спирта [10, 11]); в сельском хозяйстве (кормовые добавки для животных и птиц [12–14], производство различных удобрений [15], мульчирующий материал [16]); в строительной отрасли (строительные материалы [17, 18]); в легкой промышленности (наполнители для постельных принадлежностей [19]); в целлюлозно-бумажном производстве (целлюлоза, нано-

целлюлоза [9]); использование в качестве топлива (топливные пеллеты [19]) и др. [19–23]. Есть положительный опыт применения отходов сельскохозяйственного производства (соломы, лузги конопли и др.) при ликвидации разливов нефти [24].

Уральский регион является не только территорией с крупными промышленными центрами, но и входит в число производителей значительного количества аграрной продукции (пшеницы, гречихи, овса, рапса, технической конопли). Поэтому для региона актуальна задача применения отходов агропромышленного комплекса (АПК) в качестве сорбентов для очистки сточных вод (СВ) предприятий горнодобывающего комплекса от тяжелых металлов и СВ с урбанизированных территорий, так как это позволит существенно улучшить экологическую ситуацию (утилизация многотоннажных отходов с полей, снижение концентрации загрязняющих веществ на территории предприятий и в окружающей среде) и снизить стоимость очистки (создание сорбента на основе дешевого сырья). Преимущество сорбентов из отходов АПК заключается в экологической безопасности. Сорбенты из экологически чистого природного сырья могут быть использованы для очистки поверхностных СВ городских поселений от тяжелых металлов. В крупных промышленных городах тяжелые металлы попадают в поверхностный сток из пыли и почвы, поэтому концентрация их незначительна, но перенос и накопление загрязнителей в городских водоемах и почвах разрушает экологическую среду и негативно влияет на здоровье населения.

Цель исследования — оценка эффективности использования трех отходов АПК: лузги конопли, пшеничной соломы, лузги гречихи (гранулированной) в качестве сорбента для очистки СВ предприятий горнодобывающего комплекса и СВ с урбанизированных территорий от тяжелых металлов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве сорбентов использовали отходы АПК: лузгу конопли (чешуйки технической конопли, оставшиеся после обработки семян), солому (сухие стебли пшеницы) с полей Челябинской области.

Лузга конопли представляет собой чешуйки технической конопли, оставшиеся после обработки семян конопли, материал применяли без дополнительной обработки.

Солома — сухие стебли пшеницы, собранные на полях Челябинской области, измельченные и прошедшие карбонизацию при температуре 80 °С в течение 10 мин.

Лузга гречихи (гранулированная) — это чешуйки, оставшиеся после обработки ядрышек гречихи. В исследовании использовалась гранулированная лузга. Процесс ее грануляции включает следующие стадии: измельчение, увлажнение, прессование при температуре 120 °С.

Внешний вид образцов представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид образцов: *a* — лузга конопли; *b* — солома; *c* — лузга гречихи (гранулированная)

Fig. 1. Biosorbent samples: *a* — hemp hulls; *b* — straw; *c* — buckwheat hulls (granulated)

Структуру и состав поверхности сорбентов изучали на электронном растровом микроскопе JEOL JSM-6460LV с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности образцов приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты микрорентгеноспектрального анализа образцов, %

Table 1. Results of X-ray microanalysis of the samples, %

Сорбент Sorbent	C	O	K	Mg	Ca	Si
Лузга конопли Hemp hulls	64,38	34,99	0,35	0,13	–	0,15
Солома Straw	40,96	40,22	1,98	–	0,57	16,27
Лузга гречихи Buckwheat hulls	54,26	44,25	0,77	0,42	0,30	–

Анализ образцов показал, что основными химическими элементами в их составе являются экологически безопасные углерод, кислород, калий. В лузге конопли отсутствует кальций, в соломе — магний, а в лузге гречихи — кремний.

Для определения эффективности очистки СВ в качестве сорбата использовали поверхностные сточные (ливневые) воды урбанизированной тер-

ритории г. Челябинска и кислый сток с одного из горнодобывающих предприятий Урала. Химический анализ состава сорбата проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии на приборе OPTIMA 2100DV. Водородный показатель устанавливали на микропроцессорном рН-метре рН-150МИ. Результаты анализа представлены в табл. 2.

Табл. 2. Химический состав сорбата

Table 2. Chemical composition of the sorbate

Элемент Element	Al	Cu	Fe	Pb	Zn	pH
Содержание в городском поверхностном стоке, мг/л Content in urban surface runoff, mg/l	0,17	0,004	0,75	0,02	0,06	6,66
Содержание в кислом стоке с территории горнодобывающего предприятия, мг/л Content in acidic runoff from the territory of a mining enterprise, mg/l	216,29	59,95	614,41	0,98	106,70	2,38

Из табл. 2 видна высокая степень загрязнения СВ с территории горнодобывающего предприятия ионами железа, алюминия, цинка, меди, свинца. Величина водородного показателя 2,38 характерна для сильно кислой среды. Содержание тяжелых металлов в нейтральном стоке с городской территории в 50–800 раз ниже, чем в промышленном стоке. Выбор состава сорбатов позволяет провести исследование эффективности сорбентов в широком диапазоне концентраций.

Исследования взаимодействия в системе «сорбент – сорбат» выполнили в лабораторных условиях методом ограниченного объема при статической сорбции, когда поллютанты находились в жидкой фазе и приводились в контакт с неподвижным сорбентом в динамическом режиме на специальной установке, где загрязнители в подвижной жидкой фазе фильтровались через слой сорбента (рис. 2).

Сорбент помещали в лабораторный стакан, добавляли исследуемую пробу воды и оставляли на 3; 6; 9; 24; 168 ч при температуре окружающей среды 0; 10; 20 °С. При динамическом режиме сорбции скорость фильтрации составляла 0,3; 0,6; 1,2; 15 л/ч.

Изменение состава сорбата при взаимодействии с сорбентами определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии на приборе OPTIMA 2100DV (Perkin Elmer). В качестве фонового раствора применяли воду особой очистки, полученную на приборе очистки воды Simplicity UV.



Рис. 2. Установка для динамических испытаний

Fig. 2. Installation for dynamic tests

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ эффективности очистки стока с территории горнодобывающего предприятия сорбентами в статических условиях в зависимости от температуры представлен в табл. 3.

Табл. 3. Анализ степени извлечения поллютантов из пробы при различной t °С, %

Сорбент Sorbent	Элементы Elements	Степень извлечения поллютантов из пробы при различной t °С, % Degree of extraction of pollutants from the sample, at different t °С, %					
		t = 0 °С		t = 10 °С		t = 20 °С	
		min	max	min	max	min	max
Лузга конопли (городской сток) Hemp hulls (urban runoff)	Al	41	88	35	94	53	94
	Cu	100	100	100	100	100	100
	Fe	80	93	40	97	88	93
	Pb	0	50	0	100	60	85
	Zn	0	67	33	95	33	93
Солома (городской сток) Straw (urban runoff)	Al	18	76	6	94	82	88
	Cu	100	100	100	100	100	100
	Fe	79	81	45	75	57	77
	Pb	0	50	0	100	0	0
	Zn	67	67	50	67	33	67
Лузга гречихи (городской сток) Buckwheat hulls (urban runoff)	Al	41	82	59	94	82	94
	Cu	100	100	100	100	100	100
	Fe	92	100	79	99	84	100
	Pb	100	100	100	100	100	100
	Zn	100	100	100	100	83	100

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Сорбент Sorbent	Элементы Elements	Степень извлечения поллютантов из пробы при различной t °C, % Degree of extraction of pollutants from the sample, at different t °C, %					
		$t = 0$ °C		$t = 10$ °C		$t = 20$ °C	
		min	max	min	max	min	max
Лузга конопли (кислый сток) Hemp hulls (acid mine drainage)	Al	67	74	75	79	80	85
	Cu	77	81	77	85	82	87
	Fe	80	90	81	88	80	88
	Pb	78	89	77	82	67	77
	Zn	75	85	72	78	70	75

В табл. 3 минимальные значения соответствуют трем часам контакта сорбента с сорбатом, максимальные значения — 168 ч. Как видно из табл. 3, после очистки стоков сорбентами концентрация поллютантов значительно уменьшилась или произошло полное извлечение загрязнителей. Исключение составляет процесс сорбции ионов меди, на эффективность которого температура и время практически не влияют. Уже при температуре 0 °C степень сорбции равна 100 %.

Из трех исследованных сорбентов наибольшую эффективность при очистке городского поверхностного стока в статических условиях от тяжелых металлов показала лузга гречихи (гранулированная). Степень сорбции из стока ионов меди, железа, свинца и цинка составила 100 %. Ионы алюминия

лузга гречихи сорбировала с эффективностью 94 %. Высокую сорбционную способность гранулированной лузги гречихи можно объяснить особенностями структуры, в процессе взаимодействия с сорбатом плотные прессованные гранулы увеличивают объем, что соответственно приводит к увеличению поверхности контакта. Повышение температуры не оказывает существенного влияния на эффективность процесса, так как развитая поверхность лузги гречихи обеспечивает высокую степень извлечения тяжелых металлов при 0 °C. Поэтому нет диффузионных затруднений для процесса адсорбции.

Для лузги конопли и соломы при очистке городского стока наблюдается снижение степени извлечения ионов свинца при повышении температуры с 10 до 20 °C. По-видимому, это связано с недостаточной

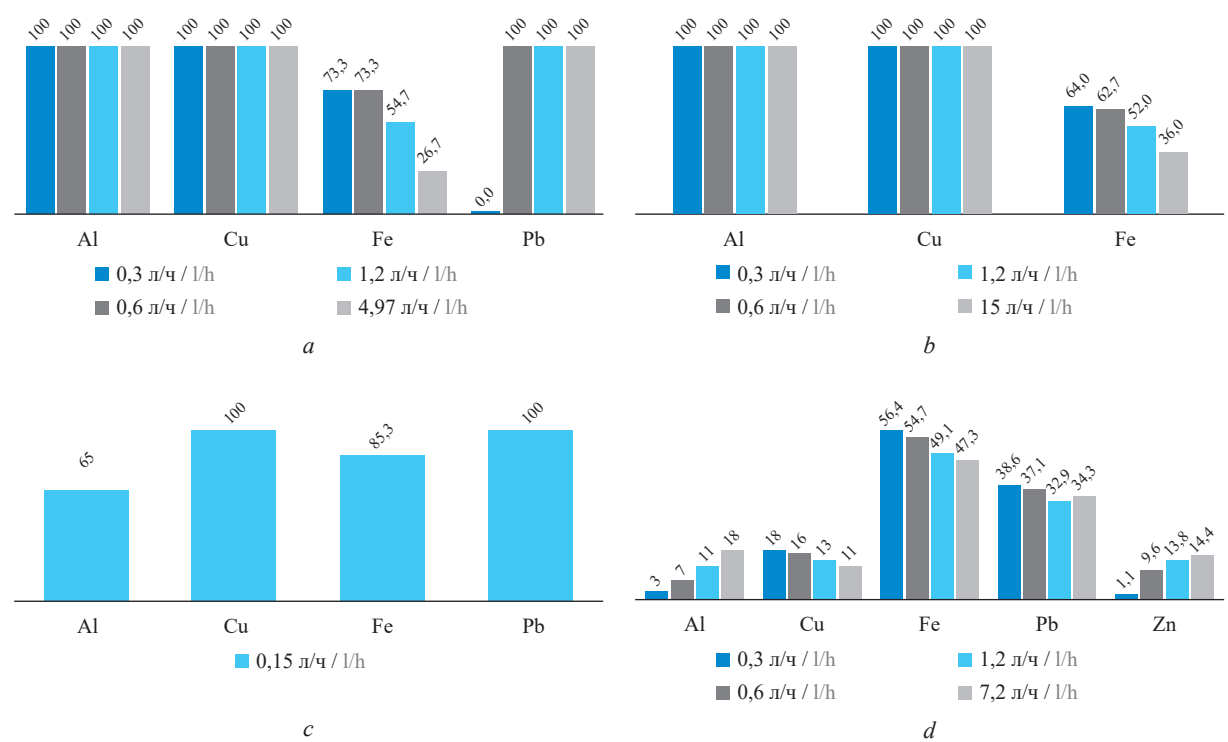


Рис. 3. Эффективность сорбции ионов тяжелых металлов при динамическом режиме фильтрования: *a* — лузга конопли; *b* — солома; *c* — лузга гречихи (гранулированная); *d* — лузга конопли (кислый сток)

Fig. 3. Sorption efficiency for ions of heavy metals in dynamic filtration tests: *a* — hemp hulls; *b* — straw; *c* — buckwheat hulls (granulated); *d* — hemp hulls (acid mine drainage)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18, Выпуск 5, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18, Issue 5, 2023

энергией связи поверхностных активных центров с ионами свинца. При повышении температуры происходит увеличение влияния процесса десорбции.

Наименее эффективно показала себя солома, для которой степень сорбции равна для железа 81 %, цинка — 67 %.

Из всех исследованных образцов солома обладает самой рыхлой структурой, в ходе эксперимента она не разбухала, площадь сорбирующей поверхности оставалась неизменной, что объясняет ее самую низкую эффективность при сорбции поллютантов.

Эффективность очистки городского поверхностного стока и кислого стока с территории горнодобывающего предприятия от тяжелых металлов в динамических условиях в зависимости от скорости фильтрации показана на диаграммах (рис. 3).

При динамическом режиме очистки стока с городской территории от ионов тяжелых металлов использование в качестве сорбента лузги конопли позволяет полностью удалить ионы алюминия, меди, свинца и 73,3 % ионов железа. Скорость фильтрования для сорбции ионов алюминия и меди не оказывает влияния на эффективность процесса. Сорбция ионов железа наиболее эффективна при скорости фильтрации 0,3–0,6 л/ч.

Использование соломы в качестве материала сорбционного фильтра эффективно для очистки стока от ионов алюминия и меди (эффективность сорбции 100 %), при этом концентрация ионов железа снижается на 64 %, сорбция ионов свинца и цинка не наблюдается.

Лузга гречихи полностью очистила сорбат от ионов меди и цинка, при очистке от ионов железа эффективность сорбции составляет 85 %, от ионов алюминия — 65 %. Проблемы возникли с очисткой от ионов цинка, ни один из образцов не справился с его извлечением в динамических условиях.

В динамическом режиме при взаимодействии кислого стока с территории горнометаллургического предприятия с лузгой конопли концентрация всех ионов тяжелых металлов снизилась, причем с увеличением скорости фильтрации количество сорбированных ионов уменьшается. Наибольшая эффективность сорбции для ионов железа составляет 56,4 %, ионов свинца — 38,6 %, ионов алюминия и меди — 18 %, ионов цинка — 14,4 %. Повидимому, воздействие сильной кислоты приводит к окислению органического материала и изменению энергетических характеристик активных центров на его поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучены структура и состав поверхности отходов АПК: лузги конопли; соломы, прошедшей карбонизацию; лузги гречихи гранулированной. Полученные данные подтвердили экологическую безопасность использованных материалов. Основными химическими элементами в их составе являются

углерод, кислород, калий. Определена эффективность сорбции лузгой технической конопли, пшеничной соломой, лузгой гречихи (гранулированной) тяжелых металлов из СВ урбанизированной территории и горнодобывающих предприятий.

Впервые исследования эффективности сорбентов из отходов АПК были проведены не на модельных растворах, содержащих один катион, а на реальных городских стоках и стоках промышленного предприятия, содержащих комплекс загрязнителей, концентрации которых меняются в широких пределах.

В литературных источниках имеются данные об использовании в качестве сорбентов экзотического растительного сырья (древесины папайи, листьев туты, древесины гивеи и т.д.) [25]. В статье приведено исследование растительного сырья, которое получается при производстве сельскохозяйственной продукции в регионе, где необходимо проводить экологические мероприятия по улучшению экологической обстановки.

Данные исследований показали, что в статических условиях лузга гречихи лучше сорбирует поллютанты из городского поверхностного стока. Эффективность очистки стока от ионов меди, железа, свинца и цинка составила 100 %. Исключением является процесс сорбции ионов меди, где максимальная эффективность достигается при низкой температуре 0 °С и минимальном времени контакта с сорбентом.

В динамических условиях максимальный эффект достигнут при применении лузги конопли, которая также показала свою эффективность при сорбции поллютантов из кислого стока с территории горнодобывающего предприятия. Достигнутый эффект очистки стока от ионов алюминия, меди, свинца равен 100 %.

Исследования показали, что на степень извлечения тяжелых металлов лузгой конопли; соломой, прошедшей карбонизацию; лузгой гречихи гранулированной основное влияние оказывает величина поверхности сорбента и энергия активных центров, на которых происходит физическая адсорбция загрязнителей. Лузга гречихи по этим показателям превосходит сорбенты из соломы и лузги конопли.

Проведенные исследования продемонстрировали, что при выборе сорбента для очистки СВ необходимо учитывать химический состав стока и подбирать соответствующий стойкий к агрессивной среде отход АПК. Кроме того, следует учитывать экономические затраты при производстве конечного продукта. Перспективным является использование многокомпонентных сорбентов на основе отходов АПК, которые дают возможность с максимальной эффективностью применять преимущества исследованных материалов.

Полученные результаты показывают, что исследованные отходы АПК служат перспективным

экологически безопасным и эффективным сорбционным материалом, позволяют извлекать тяжелые металлы (алюминий, медь, железо, свинец, цинк)

в широком интервале концентраций из поверхностного стока городских поселений и стока с территории горнодобывающих предприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Язев С.Г. Использование лузги гречихи в пищевом производстве // Наука и современность. 2014. № 34. С. 102–105.
2. Школьников М.Н., Кадрицкая Е.А. Обоснование использования лузги гречихи для получения функциональных пищевых красителей // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств». 2020. № 4 (46). С. 22–28. DOI: 10.17586/2310-1164-2020-10-4-22-28
3. Уразова Я.В., Баходина Л.А., Рожнов Е.Д. Выделение меланина из лузги гречихи посевной // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и техники : сб. науч. ст. Междунар. конф. 2018. С. 970–972.
4. Кадрицкая Е.А., Школьников М.Н., Кокорева Л.А., Ялунина Е.Н., Рожнов Е.Д. Обоснование состава кондитерской глазури с меланином из гречневой лузги // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11. № 1 (57). С. 58–63. DOI: 10.46548/21vek-2022-1157-0011
5. Корпачева С.М., Чугунова О.В., Позняковский В.М. Использование порошка из лузги гречихи в рецептурах и технологии производства бисквитного полуфабриката // Индустрия питания Food Industry. 2021. Т. 6. № 4. С. 55–63. DOI: 10.29141/2500-1922-2021-6-4-6
6. Севодина Н.А., Ласко А.В., Школьников М.Н. Перспектива использования гречневой лузги для получения растительного масла // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования : сб. науч. ст. Междунар. конф. 2017. С. 1066–1067.
7. Семухин А.С. Обоснование выбора лузги гречихи как основного ингредиента для создания биоразлагаемой упаковки для пищевых продуктов // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых : сб. науч. ст. 3-й Всерос. науч. конф. перспективных разработок. 2022. Т. 3. С. 240–242.
8. Крамаренко М.В., Несмеянова А.В. Использование лузги гречихи в качестве субстрата для выращивания вешенки обыкновенной // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК : мат. Всерос. студ. науч.-практ. конф. 2022. С. 244–249.
9. Тарабанько В.Е., Гульбис Г.Р., Иванченко Н.М., Коропачинская Н.В., Кузнецов Б.Н. Исследование процессов переработки древесины и лигносульфонатов в продукты тонкого органического синтеза // Химия в интересах устойчивого развития. 1996. № 4–5. С. 405–417.
10. Жукова Ю.А., Мезенова О.Я. Технологии получения биоэтанола из пшеничной соломы // Вестник Международной академии холода. 2011. № 4. С. 21–23.
11. Swain M.R., Singh A., Sharma A.K., Tuli D.K. Bioethanol production from rice- and wheat straw: An overview // Bioethanol Production from Food Crops. 2019. Pp. 213–231. DOI: 10.1016/B978-0-12-813766-6.00011-4
12. Леснов А.П., Леонтьев А.П., Никитенков А.И. Производство кормов из малоценного растительного сырья для КРС // Эффективное животноводство. 2009. № 9. С. 44–45.
13. Леснов А.П., Леонтьев А.П., Ковалев А.Н. Малоценное растительное сырье в биотехнологиях кормопроизводства // АПК ЮГ. 2011. № 5. С. 40–43.
14. Сергеев Л.А., Логвинова А.С., Болтовский В.С. Подготовка соломы зерновых культур к биотехнологической переработке // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2020. № 1 (229). С. 173–182.
15. Алексеева Т.П., Волкова Е.С., Ньматов А.М. Эффективность соломы озимой пшеницы в системе удобрения проса // Экологические проблемы и пути их решения: естественнонаучные и социокультурные аспекты : сб. ст. по мат. VI Молодежной межрегиональной науч.-практ. конф. студентов, магистрантов и аспирантов. 2020. С. 84–85.
16. Рязанцева Н.В. Использование соломы для мульчирования поверхности почвы в посевах кукурузы // Агротехнологические процессы в рамках импортозамещения : мат. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию со дня рождения заслуженного работника высшей школы РФ. 2016. С. 63–64.
17. Засыпкина Е.М. Строительство домов из соломы // Вестник МИТУ–МАСИ. 2019. № 1. С. 15–17.
18. Замураев А.Л. Горячепрессованные соломенные блоки как экологически чистый, надежный и дешевый строительный материал // Молодой ученый. 2020. № 41 (331). С. 39–41.
19. Клинецвич В.Н., Флюрик Е.А. Способы использования лузги гречихи посевной // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2020. № 1 (229). С. 68–81.
20. Сомин В.А., Комарова Л.Ф., Куталова А.В. Исследования по использованию лузги гречихи для умягчения воды // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. № 2. С. 213–222. DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-2-213-222
21. Кузнецова Е.А., Климова Е.В., Шаяпова Л.В. Производство порошка из гречневой лузги — путь к созданию безотходных высокоэффективных технологий // Зернобобовые и крупяные культуры.

2021. № 1 (37). С. 69–75. DOI: 10.24412/2309-348X-2021-1-69-75

22. Bokhari S.M.Q., Chi K., Catchmark J.M. Structural and physico-chemical characterization of industrial hemp hurd: Impacts of chemical pretreatments and mechanical refining // *Industrial Crops and Products*. 2021. Vol. 171. P. 113818. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113818

23. Спицын А.А., Белоусов И.И., Турсунов Т.Б., Хен В.А. Термохимическая конверсия измельченной уплотненной растительной биомассы // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической акаде-*

мии. 2018. № 224. С. 256–272. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.224.256-272

24. Сироткина Л.В., Новосёлова Н.Ю. Материалы для адсорбционной очистки воды от нефти и нефтепродуктов // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2005. Т. 13. № 3. С. 359–377.

25. Чирова В.С., Собгайда Н.Л., Рзазаде Ф.А. Сорбенты на основе отходов агропромышленного комплекса для очистки сточных вод // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. Т. 18. № 20. С. 263–266.

Поступила в редакцию 31 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 7 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 25 апреля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Олеся Александровна Самодолова — аспирант кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем; Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ)); 454080, г. Челябинск, пр-т В.И. Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 1124060; samodolova@mail.ru;

Александр Павлович Самодолов — аспирант кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем; Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ)); 454080, г. Челябинск, пр-т В.И. Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 1123411; samodolov@mail.ru;

Дмитрий Владимирович Ульрих — доктор технических наук, доцент, директор архитектурно-строительного института; Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ)); 454080, г. Челябинск, пр-т В.И. Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 562874, ORCID: 0000-0002-6851-4257; ulrikhdv@susu.ru;

Татьяна Мопровна Лонзингер — кандидат технических наук, научный сотрудник, доцент кафедры физико-химии материалов; Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ)); 454080, г. Челябинск, пр-т В.И. Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 730964; lonzingertm@susu.ru.

Вклад авторов:

Самодолова О.А. — идея, сбор материала, написание исходного текста.

Самодолов А.П. — идея, сбор материала, написание статьи.

Ульрих Д.В. — научное руководство, написание статьи, обобщение материала, доработка текста.

Лонзингер Т.М. — обобщение материала, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Yazev S.G. The use of buckwheat husks in food production. *Science and Modernity*. 2014; 34:102-105. (rus.).
2. Shkolnikova M.N., Kadritskaya E.A. Rationale for the use of buckwheat husk for the production of functional food colors. *Processes and Food Production Equipment*. 2020; 4(46):22-28. DOI: 10.17586/2310-1164-2020-10-4-22-28 (rus.).
3. Urazova Ya.V., Bakholdina L.A., Rozhnov E.D. Isolation of melanin from buckwheat husks. *Lomonosov readings in Altai: fundamental problems of science and technology : collection of scientific articles of the international conference*. 2018; 970-972. (rus.).
4. Kadritskaya E.A., Shkolnikova M.N., Koko-reva L.A., Yalunina E.N., Rozhnov E.D. Substantiation of the composition of confectionery glaze with melanin from buckwheat husk. *21 century: Results of the Past and Problems of the Present plus*. 2022; 11(1):58-63. DOI: 10.46548/21vek-2022-1157-0011 (rus.).
5. Korpacheva S.M., Chugunova O.V., Poznyakovskiy V.M. Use of buckwheat hull powder in sponge cake semi-finished product formulations and production technology. *Food Industry*. 2021; 6(4):55-63. DOI: 10.29141/2500-1922-2021-6-4-6 (rus.).
6. Sevodina N.A., Lasko A.V., Shkolnikova M.N. The prospect of using buckwheat husks to produce vegetable oil. *Lomonosov readings in Altai: fundamental problems of science and technology : collection of scientific articles of the international conference*. 2017; 1066-1067. (rus.).
7. Semukhin A.S. Rationale for the choice of buckwheat husk as the main ingredient for the creation of biodegradable packaging for food products. *Innovative potential for the development of society:*

the view of young scientists: a collection of scientific articles of the 3rd All-Russian Scientific Conference of Advanced Developments. 2022; 3:240-242. (rus.).

8. Kramarenko M.V., Nesmeyanova A.V. The use of buckwheat husk as a substrate for growing oyster mushrooms. *Scientific research of students in solving urgent problems of the agro-industrial complex : materials of the All-Russian student scientific and practical conference*. 2022; 244-249. (rus.).

9. Tarabanko V.E., Gulbis G.R., Ivanchenko N.M., Koropachinskaya N.V., Kuznetsov B.N. Study of the processing of wood and lignosulfonates into products of fine organic synthesis. *Chemistry for Sustainable Development*. 1996; 4-5:405-417. (rus.).

10. Zhukova Yu.A., Mezenova O.Ya. Technologies for obtaining bioethanol from wheat straw. *Bulletin of the International Academy of Cold*. 2011; 4:21-23. (rus.).

11. Swain M.R., Singh A., Sharma A.K., Tuli D.K. Bioethanol production from rice- and wheat straw: An overview. *Bioethanol Production from Food Crops*. 2019; 213-231. DOI: 10.1016/B978-0-12-813766-6.00011-4

12. Lesnov A.P., Leontiev A.P., Nikitenkov A.I. Production of feed from low-value vegetable raw materials for cattle. *Effective Animal Husbandry*. 2009; 9:44-45. (rus.).

13. Lesnov A.P., Leontiev A.P., Kovalev A.N. Low-value vegetable raw materials in the biotechnologies of fodder production. *APK YUG*. 2011; 5:40-43. (rus.).

14. Sergeyenko L.A., Logvinova A.S., Boltovskiy V.S. Grain crops straw preparing for biotechnological processing. *Proceedings of BSTU. Issue 2, chemical engineering, biotechnology, geoecology*. 2020; 1(229):173-182. (rus.).

15. Alekseeva T.P., Volkova E.S., Nematov A.M. Efficiency of winter wheat straw in the system millet fertilizers. *Ecological problems and ways of their solution: natural scientific and socio-cultural aspects : collection of articles based on materials of the VI Youth Interregional Scientific and Practical Conference of Students, Undergraduates and Postgraduates*. 2020; 84-85. (rus.).

16. Riazantseva N.V. Straw application for soil surface mulching in maize. *Agrotechnological processes in the framework of import substitution: materials*

of the International scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of the honored worker of the higher school of the Russian Federation. 2016; 63-64. (rus.).

17. Zasyapkina E.M. Construction of houses from straw. *Bulletin of MITU-MASI*. 2019; 1:15-17. (rus.).

18. Zamuraev A.L. Hot-pressed straw blocks as an environmentally friendly, reliable and cheap building material. *Young Scientist*. 2020; 41(331):39-41. (rus.).

19. Klintsavich V.N., Flyurik E.A. Methods of use of buckwheat husband sowing. *Proceedings of BSTU. Issue 2, chemical engineering, biotechnology, geoecology*. 2020; 1(229):68-81. (rus.).

20. Somin V.A., Komarova L.F., Kutalova A.V. Study of buckwheat husk application for water demineralisation. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020; 10(2):213-222. DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-2-213-222 (rus.).

21. Kuznetsova E.A., Klimova E.V., Shayapova L.V., Shuvaeva E.G., Fesenko A.N. Production of buckwheat husk powder is the way to create waste-free, highly efficient technologies. *Legumes and Groat Crops*. 2021; 1(37):69-75. DOI: 10.24412/2309-348X-2021-1-69-75 (rus.).

22. Bokhari S.M.Q., Chi K., Catchmark J.M. Structural and physico-chemical characterization of industrial hemp hurd: Impacts of chemical pretreatments and mechanical refining. *Industrial Crops and Products*. 2021; 171:113818. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113818

23. Spitsyn A.A., Belousov I.I., Tursunov T.B., Hen V.A. Thermochemical conversion of grinded pressed plant biomass. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*. 2018; 224:256-272. DOI: 10.21266/2079-4304.2018.224.256-272 (rus.).

24. Sirotkina L.V., Novosyolova N.Yu. Materials for adsorption purification of water from oil and oil products. *Chemistry for Sustainable Development*. 2005; 13(3):359-377. (rus.).

25. Chirova V.S., Sobgayda N.L., Rza-zade F.A. Sorbents based on waste from the agro-industrial complex for wastewater treatment. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2015; 18(20):263-266. (rus.).

Received March 31, 2023.

Adopted in revised form on April 7, 2023.

Approved for publication on April 25, 2023.

BIONOTES: Olesya A. Samodolova — postgraduate student of the Department of Urban Planning, Engineering Networks and Systems; South Ural State University (National Research University) (SUSU) (NRU)); 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 1124060; samodolova@mail.ru;

Aleksandr P. Samodolov — postgraduate student of the Department of Urban Planning, Engineering Networks and Systems; South Ural State University (National Research University) (SUSU) (NRU)); 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 1123411; samodolov@mail.ru;

Dmitrii V. Ulrikh — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Architecture and Civil Engineering; **South Ural State University (National Research University) (SUSU) (NRU)**; 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 562874, ORCID : 0000-0002-6851-4257; ulrikhdv@susu.ru;

Tatiana M. Lonzinger — Candidate of Technical Sciences, Researcher, Associate Professor of the Department of Physical Chemistry of Materials; **South Ural State University (National Research University) (SUSU) (NRU)**; 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RSCI: 730964; lonzingertm@susu.ru.

Author contributions:

Olesya A. Samodolova — provided ideas for the study, collected materials, and wrote the source text.

Aleksandr P. Samodolov — provided ideas for the study, collected materials, and assisted in writing the article.

Dmitrii V. Ulrikh — provided scientific supervision, assisted in writing the article, provided a summary of the collected materials, and finalized the text.

Tatiana M. Lonzinger — assisted in summarizing the collected materials and finalizing the text.

The authors declare no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 332.82

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.757-770

Обзор зарубежного и московского опыта реновации городской застройки

Светлана Витальевна Колобова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема санации, модернизации панельных жилых зданий охватила многие европейские страны в девяностые годы. Программа реновации стартовала в Москве в 2017 г. Несмотря на типовое панельное массовое жилищное строительство в европейских странах и в России, имеются многие градостроительные, архитектурные и строительные различия, а поэтому были приняты разные методы реновации жилой застройки. За прошедший период накопился значительный как положительный, так и отрицательный строительный опыт, который следует учесть для распространения реновации на российские регионы.

Материалы и методы. Выполнен анализ социально-экономических методов санации и модернизации жилых домов в ряде европейских стран, подробно изучен опыт реновации жилой застройки в Москве. Исследованы организационные и финансовые условия реализации программ санации и реновации жилой застройки и отмечен ряд особенностей.

Результаты. На основе изученных методов реализации программ по санации, модернизации и реновации в европейских городах и в Москве составлена таблица с позитивными и негативными факторами. С учетом этих факторов разработана блок-схема по выбору метода реновации применительно к конкретной застроенной территории. Предложен социально-экономический вектор программы реновации по управлению жилищно-коммунальным комплексом.

Выводы. При выборе метода реновации жилой застройки необходимо учитывать интересы жителей и хозяйствующих субъектов. Для мегаполисов, где численность и плотность населения велика, может быть предпочтительнее московская модель реновации с учетом положительного и отрицательного опыта. Для малых городов России, где малоэтажная застройка представляет историческую и архитектурную ценность и небольшая плотность населения, можно применить европейский опыт реновации. При разработке программ реновации важно соблюдать баланс между новым строительством и сохранением исторически сложившейся городской застройки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: санация, модернизация, программа реновации, жилая застройка, панельные дома, жители

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Колобова С.В. Обзор зарубежного и московского опыта реновации городской застройки // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С. 757–770. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.757-770

Автор, ответственный за переписку: Светлана Витальевна Колобова, KolobovaSV@mgsu.ru.

Overview of international and Moscow experience in urban renovation

Svetlana V. Kolobova

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

ABSTRACT

Introduction. The problem of rehabilitation and modernization of panel residential buildings covered many European countries in the nineties. The renovation programme started in Moscow in 2017. Despite the typical panel mass housing construction in European countries and in Russia, there are still many urban planning, architectural and construction differences, and therefore different methods of residential renovation have been adopted. Considerable positive and negative construction experience has been accumulated over the past period which should be taken into account for the extension of the renovation to Russian regions.

Materials and methods. The analysis of socio-economic methods of rehabilitation and modernization of residential buildings in several European countries was carried out, and the experience of residential buildings renovation in Moscow

was studied in detail. The organizational and financial conditions for the implementation of residential rehabilitation and renovation programs have been studied and a number of features have been noted.

Results. Based on the studied methods of implementation of rehabilitation, modernization and renovation programs in European cities and in Moscow, a table with positive and negative factors was compiled. Considering these factors, a flowchart for the choice of renovation method in relation to the specific built-up area was developed. The socio-economic vector of the renovation programme on the management of the housing and communal services has been proposed.

Conclusions. When choosing a method of renovation of residential buildings, it is necessary to consider the interests of residents and business entities. For megacities where the number and density of the population is high, the Moscow model of renovation may be preferable, taking into account positive and negative experience. For small cities in Russia, where low-rise buildings are of historical and architectural value and a population density is low, the European renovation experience can be applied. When developing renovation programs, it is important to maintain a balance between new construction and the preservation of historically established urban development.

KEYWORDS: rehabilitation, modernization, renovation programme, residential development, panel houses, residents

FOR CITATION: Kolobova S.V. Overview of international and Moscow experience in urban renovation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):757-770. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.757-770 (rus.).

Corresponding author: Svetlana V. Kolobova, KolobovaSV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Основные задачи программы реновации сложившейся городской застройки — это повышение качества жизни, приведение жилища к современным стандартам качества и достижение энергоэффективности жилых кварталов. За прошедшие семьдесят лет в европейских странах накопился значительный опыт реновации панельного многоквартирного фонда [1–3].

В пятидесятые годы прошлого века практика строительства типовых блочных и панельных жилых домов, называемых «хрущевками», распространилась на страны Варшавского договора. В ГДР с 1955 до 1990 гг. построено около 6,35 млн квартир и около 2,1 млн квартир в многоквартирных панельных домах. В Восточном Берлине была возведена почти четверть миллиона квартир в панельных домах. В 1999 г. завершены проекты реновации панельного жилья в немецком Лайнефельде-Ворбис, земля Тюрингия, а в 2010 г. в г. Галле, земля Саксония-Анхальт. За эти проекты архитектурное бюро Stefan Forster Architekten получило различные архитектурные премии¹.

Германия столкнулась с проблемой наступившего физического и морального износа панельного жилого фонда и необходимостью проведения его санации в 1990–2000 гг. В Федеративной Республике Германии до 1990-го г., до объединения ГДР и ФРГ, около двух миллионов человек проживали примерно в 500–600 тыс. квартирах в панельных домах в крупных населенных пунктах. В Восточном Берлине 700 тыс. человек проживали в новостройках послевоенного периода в 273 тыс. панельных квартирах в 17 крупных населенных пунктах².

В Берлине по причине экономической целесообразности было принято решение не сносить,

а санировать и модернизировать панельные массивы [4]. Предполагалось, что обновленное жилье будет приносить в будущем отдачу и доходы. Общая сумма санации панельного жилого фонда Берлина составляла 13 млрд немецких марок для 273 тыс. квартир на период с 1993 по 1997 гг. Программу санации панельных жилых зданий поддерживали в федеральном кредитном учреждении Германии. Строительно-эксплуатационным организациям, занимающимся санацией и модернизацией панельного жилого фонда, выделена в общей сложности ссуда в размере 70 млрд немецких марок под низкие проценты. Процентные ставки составляли 1,5–2,5 %, т.е. ниже, чем на рынке капитала, кредитов и займов. По условиям кредитования первые пять лет строительно-эксплуатационные организации были освобождены от погашения кредита. Поэтому первые пять лет программа имела большую экономическую ценность³.

Во многих европейских странах были разработаны государственные программы реновации, санации и модернизации индустриального домостроения. Проблема санации панельных жилых зданий охватила также страны Средней и Восточной Европы. Несмотря на типовое панельное массовое жилищное строительство, в этих странах имеются многие градостроительные, архитектурные и строительные различия, а поэтому были приняты разные методы санации панельных домов.

В странах Средней и Восточной Европы различия касались относительно времени возведения, расположения типовых домов, их размеров, их типов, используемых строительных материалов и конструкций, а также качества строительства. Также различия были в размере сегмента рынка жилья, сроке службы и качестве жилищно-коммунальных

¹ Hannemann C. Die Platte Industrialisierter Wohnungsbau in der DDR. Braunschweig, Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1996. Pp. 25, 46. DOI: 10.1007/978-3-322-91762-1

² Hensler F. Investitionsanalyse bei Hochbauten: Wirtschaftlichkeits- u. Risikoanalyse von Investitionen in Büro- u. Geschäftsgebäude. Wiesbaden : Bauverlag, 1986. Pp. 2, 63–68, 97–100.

³ Kalleya E., Flämig D. (Hrsg.) Panel repair: repair, urban development and financing. 1. Problem Berlin; Heidelberg; New York; Barselona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo; Springer 1999. Pp. 3, 6, 121–144, 150.

услуг, демографических условиях, потребности в жилье, различных общественно-политических и социально-экономических целях, особенностях законодательных, институциональных и финансовых основ, темпов реализации социально-экономических программ развития страны.

Для управления многоквартирными домами в странах Центральной и Восточной Европы была принята программа приватизации жилья, которая оказала влияние на решение вопроса санации панельных массивов. Однако темпы приватизации оставались разными. В то время как, например, в таких странах, как Болгария и Румыния, уже в начале 90-х гг. приватизация завершилась, она продолжалась в Чехии, Словакии и Польше⁴.

Приватизация жилья повлекла за собой ряд проблемных последствий⁵:

- резкое снижение доли арендного жилья за счет быстрой продажи квартир муниципалитетами и последующего дефицита социального жилья;
- удорожание арендной платы;
- нехватка денег на ремонт и техническое содержание у собственников;
- появление новой категории собственников жилья, не имеющих опыта собственности и правового понимания ответственности за содержание, эксплуатацию и ремонт своих квартир, а также общедомовых помещений;
- новые владельцы жилья в основном мало знали о своих правах и обязанностях, что также приводило к вседозволенности и ухудшению добрососедских отношений;
- незнание новых соседей — собственников жилья, фактического строительного состояния их квартир;
- собственники разных квартир не могли производить единовременные платежи за ремонт;
- различное имущественное положение разных собственников затрудняло получение кредитов на ремонт и реконструкцию домов;
- различные правовые отношения собственности (арендаторы и собственники жилья) создавали трудности в едином подходе к финансированию реконструкции.

Такие страны, как Польша, Чехия, Словакия, Венгрия и Словения взяли социальное направление на создание или восстановление доступного и эффективного рынка арендного жилья. Одним из приоритетов этой политики жилищного строительства являлось строительство нового жилья, прежде всего строительство социального жилья и увеличение количества арендуемого жилья для молодых семей,

инвалидов и социально не защищенных категорий населения. В Словении, например, была принята Национальная программа жилищного строительства, согласно которой увеличивалось количество нового жилья (за счет строительства и реконструкции) с 6000 квартир (2000 квартир в год) до 11 000 квартир в 2009 г.⁶

На основе исследований опыта реновации панельных зданий в странах Восточной Европы были выведены определенные тенденции, способствующие достижению экономического и социального эффекта при реновации. Перед выполнением строительных мероприятий требуется тесное взаимодействие с жителями, проведение опроса населения с целью выявления актуальных потребностей и современных требований к качеству жилья в данном регионе. Так как осуществляется реновация жилого фонда, в большей степени находящегося в собственности граждан в результате приватизации, то необходимо повышение грамотности населения в сфере управления жилищными объектами и объектами жилищно-коммунального комплекса. Жители должны быть заинтересованы в проведении реновации физически и морально устаревшего жилого фонда, в котором они проживают; доверять органам исполнительной власти и местного самоуправления, сотрудничать с девелоперами и управляющими компаниями. Процесс реновации должен быть прозрачным и подотчетным гражданам. Таким образом, возникает вопрос управления потребительской активностью жителей региона [5, 6].

Реализация программы реновации в регионах возможна при поддержке государства и региональных властей, что предполагает не только бюджетное, но и внебюджетное финансирование строительных мероприятий, создание благоприятных экономических условий девелоперам: льготное кредитование, налоговые преференции и т.п. [7–9].

Основная задача программы реновации Москвы — не допустить массового появления аварийного жилищного фонда в городе и одновременно скорректировать полученные за предыдущие десятилетия диспропорции развития города, сформировать городскую среду принципиально нового качества.

Реновация жилищного фонда осуществляется с учетом совершенствования сети объектов инфраструктуры, создания дополнительных условий для развития человеческого потенциала, экологии, что обеспечивает комплексное развитие территории в соответствии с современными требованиями к городской среде [10–13].

⁴ Pfeiffer H.G. Notwendige gesetzliche Rahmenbedingungen für die Entstehung einer leistungsfähigen Wohnungswirtschaft und Wohnungsfinanzierung in der Slowakei. Immobilienforschung in Mittel-Ost- und Südost-Europa. Tagungsband. Hg. von der Forschungsgesellschaft fLir Wohnen, Bauen und Planen. Wien. 2004.

⁵ OECD (Hg.). Slovenian Country Note. 02.03.2004.

⁶ European Academy of the Urban Environment (EAUE) 2004.

При реализации программы реновации также планируется решение следующих задач:

- оптимизация транспортной инфраструктуры;
- создание новой городской среды, приспособленной для комфортного проживания, отдыха и работы;
- строительство энергоэффективных многоквартирных домов, приводящих к снижению затрат на их эксплуатацию;
- улучшение экологической ситуации жилой застройки;
- обновление и модернизация инженерной инфраструктуры;
- формирование современного архитектурного облика города.

В крупных городах, таких как Москва, достаточно бюджетных средств для проведения реновации. В регионах России, где имеется дефицит бюджетирования социально ориентированных программ, необходимо разработать организационно-экономический механизм привлечения частных инвестиций в программу реновации жилого фонда. В каждом регионе следует учитывать особенности работы такого механизма. Стоит проанализировать имеющийся опыт государственно-частного партнерства по инвестированию строительных жилищных программ и проектов и применить взаимовыгодные условия сторон в основе механизма.

Процесс реновации начал распространяться на российские регионы. Поэтому важно учесть проблемы, с которыми столкнулись исполнители московской программы реновации за пять лет с 2017 г.

К таким проблемам относится увеличение сроков строительства, связанное с проектированием организации строительства с момента получения задания и его сдачи заказчику [14–16].

Проект организации строительства выполняется на стадии «Проектная документация» и, согласно Постановлению Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию», входит в ее состав. Помимо обязательной государственной экспертизы проекты реновации оцениваются также Московским фондом реновации. Требования и замечания госструктур могут повторяться.

С начала реализации столичной программы реновации у строителей накопился опыт прохождения обязательных инстанций, было выявлено, что у Фонда реновации и у государственной экспертизы дублируются замечания, на которые проектировщику необходимо уделять много внимания. Получается двойной контроль, так как после прохождения экспертизы могут быть обнаружены новые недостатки Фондом реновации, которые необходимо исправить. Вследствие чего увеличиваются сроки сдачи проектной документации и, соответственно, стоимость проекта [17].

Срок проведения государственной экспертизы устанавливается законодательством и по По-

становлению Правительства от 31.12.2019 № 1948 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации и признании утратившими силу некоторых актов и отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации» не должен превышать более сорока двух рабочих дней с возможностью продления срока не более чем на двадцать рабочих дней. Фонд реновации придерживается возможности получения положительного заключения с первого раза. Однако из-за срыва сроков Фонд теряет время, а это для государственных объектов имеет важное значение. Бесплатно проект полностью может отправляться на экспертизу не более трех раз, далее обязует проектную организацию оплачивать каждое согласование, но только в том случае, если эти серьезные сдвиги сроков или дополнительных согласований не связаны с требованиями по изменению исходных данных самого фонда.

Так, был проведен анализ проблемных зон строительной организацией, которая занимается реновацией городской застройки. В результате чего выявлены повторяющиеся замечания как Московской государственной экспертизы, так и Московского фонда реновации по следующим позициям: продолжительность строительства; установка строительных машин и механизмов; организационно-технологические схемы; организация мониторинга; конструкция котлована; календарный план и график потребности в строительных машинах и механизмах; требования Московского фонда реновации; согласующие службы; стесненные условия; недостающая информация проекта организации строительства; внесение изменений в нормативно-правовые акты.

Причем и у Московского фонда реновации, и у Московской государственной экспертизы наибольшее количество нареканий имеется по увеличению сроков строительства, организационно-технологической схеме и требованиям Фонда реновации, которые прописаны на официальном сайте. Для того чтобы процесс сдачи проектной документации занимал меньше времени, следует качественно на начальном этапе прорабатывать документацию, чтобы не тратить в дальнейшем время на устранение замечаний. Возможно, необходима и выработка алгоритма согласованности действий проверяющих структур. Таким образом, есть резерв для сокращения продолжительности реализации проекта [18].

К числу недостатков относится и нехватка вновь создаваемых парковочных мест в больших городах, мегаполисах.

Проблемным является дефицит финансовых средств в малых и средних городах России на новое строительство и переселение жителей, отсутствие специальных предприятий по утилизации строительного мусора после сноса ветхого и аварийного жилья. Очевидно, потребуется распространение за-

кона о реновации не только на Московский регион, но и на другие регионы [19].

Важной социальной причиной негативного отношения к реновации остается настороженность жителей, в основном пожилого возраста, ветхих пятиэтажек, связанных с переездом с обжитого места на новое неизвестное место. Люди консервативны и не хотят волноваться и разочаровываться. Ведь новая инфраструктура может оказаться менее удобной, по их мнению. Вызывает беспокойство также появление большого числа новых жителей с их требованиями и устоями [20].

Риски с потерей налаженного бизнеса возникают также у предпринимателей, которые при переезде могут потерять своих клиентов. Тем более, что компенсации за переезд получают только собственники, а бизнесменам-арендаторам выплаты не полагаются.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В 2018 г. в Европарламенте рассматривался вопрос о долгосрочной, рассчитанной до 2050 г., программе реновации панельных домов с целью повышения их энергоэффективности, доходности и привлекательности⁷.

Французская лаборатория провела исследования расходов на энергоэффективные программы. Расчеты показали, что средняя стоимость ремонта здания равна €316/м² для жилья в многоквартирном доме и €374/м² для индивидуального жилищного строительства.

Стоимость ремонта домов по проектам, финансируемым Евросоюзом, превышает €1200/м².

По расчетам французской лаборатории достижения энергоэффективности можно достичь при следующих обстоятельствах:

- финансовая помощь Евросоюза;
- проведение реновации в установленные сроки;
- определение норматива потребления энергии;
- выделение бюджета для достижения показателя;
- применение льгот, таких как уменьшенный НДС, уменьшенный налог на имущество, льготы по зарплате;

- предоставление прозрачной отчетности строительными компаниями по освоению бюджетных средств, включая работы и услуги субподрядчиков.

Возможная рентабельность инвестиций при соблюдении таких условий выше 5 %, что нормально для крупных европейских проектов и позволяет привлечь частные инвестиции. В настоящее время такое инвестирование отсутствует по причине убыточности, компенсируемой налогоплательщиками Европы. Поэтому многомиллиардная государственная программа реновации в ЕС финансируется из бюджета.

В ФРГ санация и модернизация панельных массивов инициировалась муниципалитетами. Строительные организации, жилищные компании и собственники жилья выработали и реализовали собственные стратегии реновации как возможность повышения конкурентоспособности на рынке недвижимости. Успехом в реализации программы реновации становится объединение усилий всех участников рынка недвижимости и их ресурсов: государственных средств (до 65 % денежных средств финансирования из федерального бюджета); муниципальных средств (примерно 30 %); средств инвесторов и мелкого бизнеса при долевом участии мелких частных собственников (2–5 %) [21].

В Берлине был застроен многоквартирными панельными домами район Марцан-Хелерсдорф в 1975–1985 гг. В 1990-е гг. началась модернизация и санация таких домов. Строительные мероприятия проводились без отселения жильцов. Для России подобный опыт реконструкции без выселения жителей возможен при соблюдении ряда условий: «субъектом» таких работ должны быть товарищество собственников жилья и органы местного самоуправления (см. Федеральный закон РФ от 06.10.2013 № 131-ФЗ, ред. от 03.07.2016) и необходимо, чтобы реконструкция была включена в государственную программу и финансировалась в долевом участии (Правительство РФ — 70 %, региональный бюджет — 20 %, местный бюджет — 8 %, органы местного самоуправления — 2 %) [22].

В России еще предстоит законодательно прорабатывать возможности совместного государственно-частного финансирования таких проектов. Может быть, понадобится принятие федеральной программы реновации ветхого жилищного фонда в регионах. Кроме того, муниципалитеты не обладают возможностями для реализации подобных программ, потому что 85 % денежных средств у них изымается в федеральный бюджет, а потом возвращается лишь частично (в объеме 20–30 %) целевым образом (субвенции) на реализацию только инфраструктурных (транспортная сеть, объекты транспортной инфраструктуры, общегородские инженерные сооружения) или уникальных социальных объектов общегородского назначения (например, спортивных) [23].

Основные принципы проведения реновации в столице: добровольность; закрытость перечня домов — участников программы; право отказа от участия в программе; возможность получения в собственность по выбору равнозначной или равноценной квартиры с отделкой комфорткласса в своем районе или денежной компенсации; улучшение жилищных условий очередников; освобождение от взносов на капитальный ремонт; помощь в переезде льготным категориям граждан; расселение

⁷ Davor Mikulić, Sunčana Slijepčević, Goran Buturac. Energy renovation of multi apartment buildings: Contributions to economy and climate changes // Energy and Buildings. 2020. Vol. 224. P. 110247. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110247

коммуналок; решение проблем ипотечных квартир; гарантия от выселения; бесплатная регистрация недвижимости; право увеличения жилплощади; право сохранения договора аренды или выкупа в собственность арендуемого помещения; публичное обсуждение с жителями предлагаемых проектов.

В Москве пилотным проектом реновации района проспекта Вернадского явился реновационный проект консорциума российского архитектурно-градостроительного бюро MASTER'SPLAN и испанского архитектора Рикардо Бофилла, который, по мнению жителей, стал лучшим. По выводам архитекторов, у района было несколько недостатков, которые нужно было исправлять. Это слабая внутренняя система пешеходных связей, огромное количество замкнутых территорий, зоны слишком плотной застройки, плохо развитая социальная инфраструктура. Так, в результате реализации проекта реновации экономический потенциал района увеличился почти вдвое — со 173 до 309 млрд руб., а средняя плотность застройки выросла только в 1,7 раза. Вновь созданная транспортная развязка открыла возможности для разнообразных услуг, в том числе и для малого бизнеса, ежегодный доход составит примерно 7 млрд руб. Прирост населения, инвестиционная привлекательность территории и активизация предпринимательских структур позволят увеличить доходность городского бюджета втрое, до 1 млрд руб. в год, уже за вычетом расходов на содержание новой инфраструктуры и благоустройства, которые составят порядка 0,4 млрд руб. в год.

Жилищные условия граждан существенно улучшились — площадь возросла с 19 м² на человека до 27 м² на человека. Таким образом решается важнейшая городская проблема обеспеченности граждан жильем по современным нормативам. Согласно статистике, в Москве количество квартир на 15 % меньше количества семей. В рамках данной концепции эти показатели сбалансированы.

Распространение накопленного опыта московской реновации городской застройки возможно и в других регионах страны, в первую очередь в городах-миллионниках. По мнению авторов статьи [24], комплексная реконструкция территорий затруднена по причине отсутствия в большинстве российских городов плана развития территории. Первоначально девелоперы находят территорию и составляют план ее развития, так как занимаются подготовкой всех коммуникаций. Европейский опыт, напротив, показывает, что муниципальные службы проводят инженерные коммуникации. Были выделены следующие организационные параметры: логистика, обеспечение работой генподрядчика, охра-

рана труда и защита окружающей среды, пожарная безопасность, система управления строительством, планирование, влияние уже имеющихся на территории объектов на строительство, состояние строительной площадки, транспортные условия внутри комплекса, трудовые ресурсы, утилизация отходов, контроль сроков и качества выполнения работ. Технологические параметры: геологические условия, воздействия от соседних зданий, машины и механизмы, инженерные сети, технология возведения зданий, строительные материалы, работы с грунтом.

В Московской области также уделяется пристальное внимание проблемам комплексного территориального планирования и развитию транспортной и инженерной инфраструктуры. В научной статье автором показаны основные направления индустриального развития региона, включая географию и состав проектируемых и строящихся индустриальных парков. Развивается малоэтажное индивидуальное строительство. Московской областью подготовлена нормативная база для реализации проекта о комплексном развитии территорий, включая введение мастер-плана, корректировку региональных норм градостроительного проектирования и др. [25].

По данным ЦИАН, крупнейшего интернет-сервиса для покупателей и арендаторов жилья, обладателя самой большой и актуальной базы объявлений, потенциальные участники всероссийской реновации расположены в Волгограде (35 %), Красноярске (34 %), Челябинске (32 %) и Казани (32 %). Эти города развивались в советское время как крупные промышленные центры, для обеспечения жильем индустриальных гигантов в них активно строились большие микрорайоны панельных пятиэтажек⁸.

Особенности московской реновации также обусловлены социально-демографическими характеристиками столицы. К ним можно отнести: высокую плотность населения (по официальным данным Росстата, на 01.01.2020 плотность населения Москвы составляет 4883,43 чел. на км²)⁹.

Для сравнения, численность постоянного населения Волгограда на 01.01.2020 составляет 1 008 998 чел. (согласно оперативным данным Росстата от 23.04.2020 «Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 01.01.2020 г.», самый населенный городской район Волгограда на 2020 г. — Дзержинский с численностью постоянного населения 181 185 человек)¹⁰.

Общее количество населения Москвы продолжает увеличиваться с каждым годом и в 2021 г. составило более 13 млн чел. Всероссийская перепись

⁸ Соколова Е. Первый в очереди на снос. Волгоград назвали потенциальным участником всероссийской реновации. URL: <https://v1.ru/text/gorod/66468880/>

⁹ Эффективность экономики России: Федеральная служба государственной статистики.

¹⁰ Население Волгограда по районам. URL: <http://www.statdata.ru/naselenie/gorod/volgograd>

населения проведена с 15 октября по 14 ноября 2021 г. и, по данным Росстата, население Москвы составляет 13 010 112 человек¹¹.

В настоящее время большинство российских регионов характеризуются низкой плотностью населения и ежегодным снижением численности населения.

Исследования показывают, что реновация по московскому методу в малых городах, численностью до одного миллиона жителей, нецелесообразна по причине низкой плотности населения и ежегодного снижения его численности. Поэтому нет необходимости возводить многоэтажные жилые дома в пятиэтажных микрорайонах, так как с высокой вероятностью спроса на них не будет. В этих условиях для проработки механизма реновации в регионах особо пристальное внимание стоит уделить европейскому опыту реновации, который во многих аспектах противоположен московскому.

Некоторые ученые считают, что в малых европейских городах, во-первых, старый жилой фонд не разрушается; отсутствуют затраты на утилизацию строительного мусора от сноса здания; во-вторых, в реконструируемом доме большая часть строительных конструкций уже имеется (фундаменты, перекрытия, лестницы, наружные стены); в-третьих, отсутствует потребность в новых земельных участках под застройку [26–30].

Однако следует отметить, что качество строительства и последующей эксплуатации панельных многоквартирных жилых домов в европейских странах оказалось лучше российских аналогов. К моменту инвентаризации жилого фонда и оценки состояния индустриальных жилых домов выяснилось, что большинство домов находятся в аварийном состоянии, либо приближаются к нему.

Таким образом, накопленный опыт освоения программы реновации в России имеет как позитивные, так и негативные моменты. Основой реновации является снос ветхого, достигшего физического и морального износа, жилья, затем строительство новых зданий на освободившейся территории и переселение жителей в новостройки в своем же районе, в отличие от ранее описанной системы реновации в Европе, которая направлена на устранение морального износа за счет потери количества квартир, повышения энергоэффективности [31].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Можно обобщить передовой опыт европейских стран и пятилетний столичный опыт реновации жилой застройки.

В городах Германии, сохраняя первоначальную планировочную структуру территории, властями проводилась реновация, нацеленная на эффективное управление жилым массивом в будущем. Проводились такие мероприятия, как: изменение функцио-

нала фрагментов территорий; перепрофилирование общественных зданий; изменение планировочной структуры квартир с увеличением площади; устройство современных ярких подъездов и расширение входных пространств; утепление, декоративное оформление и украшение фасадов; расширение и озеленение зон благоустройства; в ряде случаев снижение этажности домов и обустройства общественных мест отдыха на крышах; устройство детских площадок и площадок для выгула животных.

В процессе реновации в Москве появляются «умные дома» со считывающим оборудованием, выводящим информацию на диспетчерские службы; оптимизируется пространство: проектируются подземные паркинги, надземные многоэтажные гаражи, парковочные места для специального транспорта, аварийно-спасательных служб; предусматриваются обязательные пандусы, подъемники, проходы в домах для маломобильных групп населения, что обеспечит жителям безопасную среду жизнедеятельности.

При реализации программы реновации в регионах планируется решение следующих социально-экономических задач: оптимизация транспортных развязок; создание городской безбарьерной среды, доступной для маломобильных групп населения, приспособленной для комфортного проживания, отдыха и работы; строительство современных энергоэффективных многоквартирных жилых домов, снижение эксплуатационных затрат; улучшение экологической ситуации жилой застройки; обновление и модернизация инженерной инфраструктуры с применением цифровых технологий; формирование современного архитектурного облика городов.

Таким образом, можно выделить позитивные и негативные факторы, полученные в результате пятилетней реализации московской программы реновации. Полученный в ходе реализации программы реновации опыт приведен на рис. 1.

Перед началом проведения строительных мероприятий необходимо тесное взаимодействие с жителями, организация социологического опроса населения с целью выявления актуальных потребностей жителей и современных требований к качеству жилья в данном регионе. Органам исполнительной власти и местного самоуправления требуется заручиться поддержкой жителей, так как программа направлена, прежде всего, на улучшение качества их жизнедеятельности. Так как осуществляется реновация жилого фонда, в большей степени находящегося в собственности граждан в результате приватизации, то необходимо повышение грамотности населения в сфере управления жилищными объектами и объектами жилищно-коммунального комплекса.

¹¹ Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/56580>

Позитивные факторы Positive factors	Негативные факторы Negative factors
<ul style="list-style-type: none">Освоение бюджета Budget developmentПривлечение частных инвесторов в развитие территории Attraction of private investors to the development of the areaУвеличение количества жилой площади, обеспеченность семей жильем по новым стандартам Increase in the living space, provision of families with housing according to new standardsРазгрузка транспортной инфраструктуры Transportation infrastructure unloadingСоздание новой городской среды, приспособленной для комфортного проживания, отдыха и работы Creation of new urban environment adapted for comfortable living, recreation and workСтроительство энергоэффективных многоквартирных домов, приводящих к снижению затрат на их эксплуатацию Construction of energy efficient multi-apartment houses leading to reduction of maintenance costsУлучшение экологической ситуации жилой застройки Improving the environmental situation of residential buildingsОбновление и модернизация инженерной инфраструктуры с применением BIM-технологий Renovation and modernization of engineering infrastructure with the use of BIM-technologiesФормирование современного архитектурного облика города Formation of the modern architectural appearance of the cityСоздание рабочих мест, снижение напряженности с трудовой занятостью населения Creating jobs, reducing the tension with employment of the populationАктивное взаимодействие с населением по реализации реновации и обустройству новостроек Active interaction with the population on the implementation of renovation and redevelopment	<ul style="list-style-type: none">Нехватка финансовых средств в малых и средних городах России на новое строительство и переселение жителей Lack of financial resources in small and medium-sized Russian cities for new construction and resettlementНастороженность жителей к новациям и переселению в другое жилье Residents' reluctance towards innovation and resettlement to other housingОтсутствие специальных предприятий по утилизации строительного мусора после сноса ветхого и аварийного жилья Lack of special facilities for disposal of construction waste after demolition of old and dilapidated housingНедостаточное количество вновь создаваемых парковочных мест Insufficient number of newly created parking spacesСтроительство в стесненных условиях Construction in cramped conditionsУвеличение сроков строительства домов для переселения из ветхого жилья, в том числе по причине пандемии Longer timeframe for construction of houses for resettlement from dilapidated housing, including due to pandemicИзменение проектной документации в процессе строительства Changes in project documentation during constructionДвойной контроль Ростехнадзора и Фонда реновации за качеством строительства Dual control by Rostekhnadzor and the Renovation Fund over construction quality

Рис. 1. Опыт реализации программы реновации городской застройки (авторская разработка)

Fig. 1. Experience in implementing the urban development renovation program (author's development)

На основе исследований опыта реновации панельных зданий в европейских странах, а также московского опыта были выведены определенные тенденции, способствующие достижению экономического и социального эффекта при проведении реновации. Социально-экономический вектор про-

граммы реновации заключается в тесном сотрудничестве органов исполнительной власти, органов местного самоуправления с жителями. На рис. 2 представлен вектор развития взаимодействия власти и населения по управлению жилищно-коммунальным комплексом.

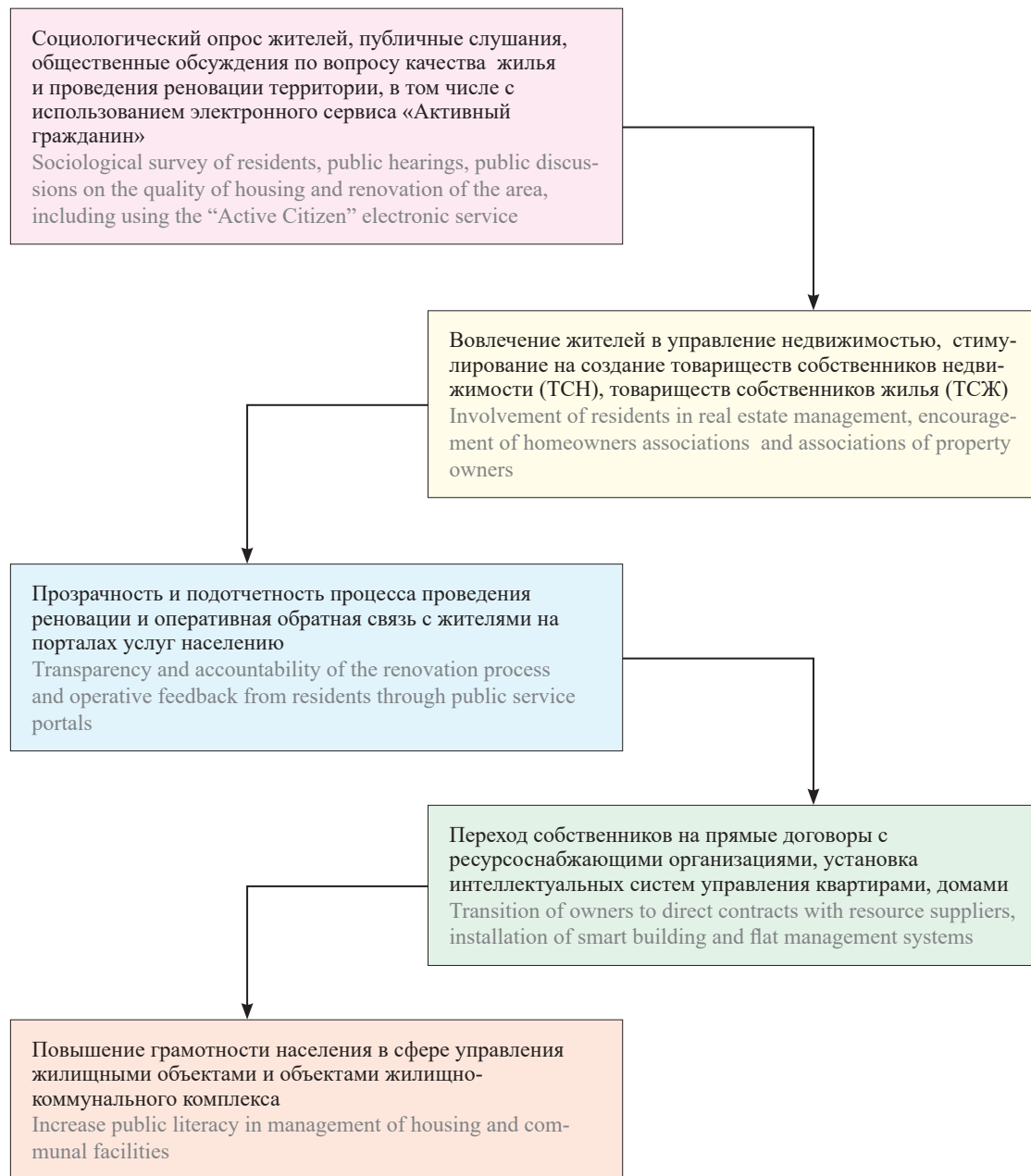


Рис. 2. Социально-экономический вектор взаимодействия власти и населения (авторская разработка)

Fig. 2. Socio-economic vector of interaction between the government and the population (author's development)

Жители должны быть заинтересованы в проведении реновации физически и морально устаревшего жилого фонда, в котором они проживают. Население должно доверять органам исполнительной власти и местного самоуправления, сотрудничать с девелоперами и управляющими компаниями. Процесс осуществления реновации предполагает прозрачность и подотчетность гражданам. Таким образом, возникает вопрос управления потребительской активностью жителей региона.

Принятие органами исполнительной власти решения о реновации застроенной территории должно быть совместно с жителями. Для этого проводятся публичные слушания или общественные обсуждения

путем голосования на портале услуг. Предварительно по специальным методикам проводится аналитическая работа по определению величин физического и морального износа, расчеты по численности и плотности населения, стоимости земельного участка. Оцениваются финансовые возможности местного и регионального бюджета, а также привлечения внебюджетных средств и частного капитала. Только после определения всех составляющих можно выбрать метод реновации. В результате расчетов и данных опроса населения готовится проект нормативно-правового акта о реализации программы реновации в регионе. Графически блок-схема принятия решения по выбору метода реновации в регионах показана на рис. 3.

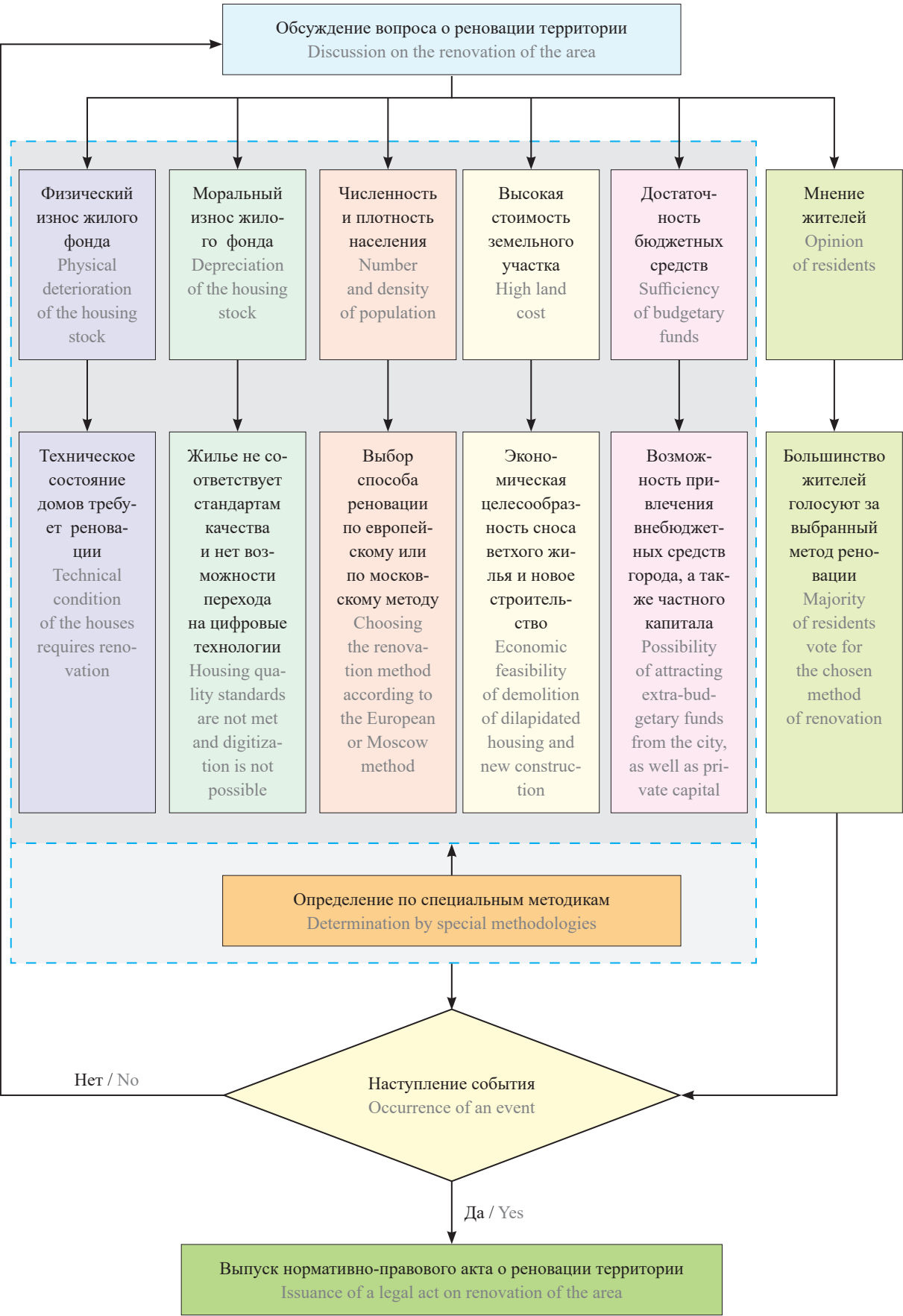


Рис. 3. Принятие решения о реновации территории (авторская разработка)
Fig. 3. Making a decision on the renovation of the territory (author's development)

Итогом принятия решения является выпуск нормативно-правового акта по реализации программы реновации по методу, выбранному властями совместно с населением. В таком документе должны быть определены основные задачи реновации, участники программы, порядок и способ реализации, сроки выполнения, виды финансирования, а также закреплена юридическая ответственность сторон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подводя итоги, можно отметить, что успешная реализация программы реновации зависит от грамотной политики взаимодействия органов власти с населением и хозяйствующими субъектами на территории, а также от правильно выбранного метода реновации для данного конкретного региона, города.

Для мегаполисов, городов-миллионников возможно предпочтительнее выбрать московскую модель реновации с учетом положительного и отрицательного опыта за прошедшие пять лет с начала реализации столичной реновации.

Для малых городов России, составляющих историческую и архитектурную ценность, при разработке программ реновации важно сохранение рационального сочетания между архитектурными нововведениями и сохранением культурно-исторического наследия. Возможно применить в малых городах европейский опыт реновации застроенной территории.

Исследования показали, что эффективность программы реновации достигается при условии соблюдения следующих факторов:

- активное взаимодействие с жителями;

- создание условий инвестиционной привлекательности реновации;
- формирование условий эффективного использования производственных ресурсов;
- налаживание тесного научно-технического сотрудничества с передовыми компаниями;
- поощрение инновационной деятельности в строительстве;
- осуществление финансирования перспективных проектов;
- предоставление правовых гарантий инвесторам;
- создание и развитие инновационной инфраструктуры;
- проведение грамотной инвестиционной политики через применение различных методов стимулирования (льготы, субсидии, кредиты, уменьшение налоговых ставок);
- наличие заинтересованности предпринимателей в реновации;
- содействие развитию малого и среднего бизнеса;
- предоставление открытой информации о хозяйственной деятельности субъектов;
- привлечение отраслевых институтов и научно-производственных организаций для применения высокотехнологичной продукции в процессе реновации;
- разработка и принятие мер по прямому и косвенному субсидированию убыточных социальных объектов;
- создание условий для добросовестной конкуренции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Поляков В.Г., Чебанова С.А., Князев А.Б., Попов Д.А. Опыт реновации в России и восточноевропейских странах // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 4 (81). С. 283–292.

2. Kolobova S.V. A review of the experience of major repairs and reconstruction of multi-apartment, industrial, residential buildings in European countries and in Russia and its future prospects // IV International Scientific and Practical Conference. 2021. DOI: 10.1145/3487757.3490795

3. Колобова С.В. Опыт санации панельных зданий в странах Средней и Восточной Европы // Экономика и предпринимательство. 2019. № 11 (112). С. 825–829.

4. Колобова С.В. Инвестиционное планирование мероприятий по санации индустриальной жилой застройки Берлина на основе имитационных моделей // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 2. С. 257–270. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.257-270

5. Коренькова Г.В., Митякина Н.А., Белых Т.В., Дорохова Е.И. Зарождение реновационных процес-

сов в жилищной сфере крупных городов России (на примере города Белгорода) // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 60–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-60-69. EDN XSYTWI

6. Меркурьева К.Р. Девелопмент урбанизированных территорий: развитие реновации и опыт ее реализации на примере города Тюмени // International Agricultural Journal. 2022. Т. 65. № 2. DOI: 10.55186/25876740_2022_6_2_32. EDN QKMUBH

7. Самойлова Н.В., Кошелева О.Ю., Казанова Н.В. Проблемы и сценарные стратегии градостроительного роста Волгограда в аспекте устойчивого экологического развития // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 3. С. 61–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-61-70 EDN UJBGJV

8. Байгулов Р.М., Корсакова И.В. Современная инвестиционная политика субъектов РФ // Вестник Московского гуманитарно-экономического института. 2021. № 3. С. 11–18. DOI: 10.37691/2311-5351-2021-0-3-11-18. EDN ROEAXB

9. Инсафутдинов А.Р., Кудинов А.В., Топчий Д.В. Формирование организационно-технических параметров реализации проектов комплексной застройки городской среды // Перспективы науки. 2021. № 5 (140). С. 151–153.
10. *Kedir F., Hall D.M.* Resource efficiency in industrialized housing construction — A systematic review of current performance and future opportunities // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 286. P. 125443. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125443
11. *Maalsen S.* Smart housing: the political and market responses of the intersections between housing, new sharing economies and smart cities // *Cities*. 2019. Vol. 84. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.cities.2018.06.025
12. *Ylipulli J., Luusua A.* Smart cities with a Nordic twist? Public sector digitalization in Finnish data-rich cities // *Telematics and Informatics*. 2020. Vol. 55. P. 101457. DOI: 10.1016/j.tele.2020.101457
13. *Serrano-Jiménez A., Femenías P., Thuvander L., Barrios-Padura Á.* A multi-criteria decision support method towards selecting feasible and sustainable housing renovation strategies // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 278. P. 123588. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123588
14. Ильичева Е.Д., Кузьмина Т.К. Особенности и слабые стороны проекта организации строительства в условиях реновации // Инженерный вестник Дона. 2021. № 5. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6991>
15. Цона Н.В., Карпушкин А.С., Горин А.К. Нормативные и законодательные особенности российской и европейской систем согласования изменений в рабочей документации при бюджетном финансировании строительного проекта // Экономика строительства и природопользования. 2019. № 3 (72). С. 131–141.
16. Цона Н.В., Карпушкин А.С., Горин А.К. Исследование теоретических и методических особенностей процедуры проведения строительного контроля // Экономика строительства и природопользования. 2019. № 4 (73). С. 91–101.
17. Топчий Д.В., Юргайтис А.Ю., Попова А.Д., Юргайтис Ю.С. Формирование объектной топологии для гармонизации прохождения экспертизы проектной документации объектов перепрофилирования // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10. № 4. С. 92–104. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.4.09
18. Лукьянова А.О., Рязанова Г.Н. Разработка алгоритма реновации жилья на региональном уровне // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре : сб. ст. 77-й Всерос. науч.-техн. конф. Самара, 2020. С. 108–111.
19. Хабибуллин Р.Т., Дмитриева Е.О. Анализ реализации федерального проекта «Формирование комфортной городской среды» муниципальной программы Ленинского внутригородского района городского округа Самара «Комфортная городская среда» на 2018–2022 годы: обратная связь с населением. ФГБОУ ВПО «Самарский государственный экономический университет» // Научно-практические исследования. 2020. № 3–3 (26). С. 68–72.
20. Колобова С.В. От реновации к модернизации застроенной среды с учетом цифровизации строительства // Управленческий учет. 2022. № 9–1. С. 63–70. DOI: 10.25806/uu9-12022
21. Меерович М.Г., Малько А.В., Козлова Л.В., Гладкова Е.А. Реновация панельной застройки 1960–1980-х гг. в Германии // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7. № 1 (20). С. 111–119
22. Меерович М.Г., Францева Ю.В. Проблемы комплексной регенерации жилой среды районов крупнопанельной застройки. Возможность адаптации германского опыта к социально-экономическим и правовым условиям стран СНГ // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7. № 1 (20). С. 120–130.
23. Максимов Р.И. Проблемы строительства зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки // Интерактивная наука. 2021. № 7 (62). С. 24–26. DOI: 10.21661/r-554649
24. Фесенко Д. Дмитрий Климов о перспективах развития Московской области — от транспортной инфраструктуры до КРТ (интервью) // Архитектурный вестник. 2021. № 2 (179). С. 36–41. EDN RVPYFF.
25. *Chebanova S.A., Polykov V.G., Azarov A.V.* Designing of organizational and technological solutions for construction in constrained urban environments // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 687. Issue 4. P. 044004. DOI: 10.1088/1757-899X/687/4/044004
26. Чебанова С.А., Азаров В.Н., Азаров А.В., Поляков В.Г. Влияние организационно-технологических решений строительства в стесненных городских условиях на окружающую среду // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4790>
27. Поляков В.Г., Чебанова С.А., Антонов А.Д. Организационно-технологические проблемы при строительстве в стесненных городских условиях // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 2 (79). С. 113–118.
28. *Azarov V.N., Burlachenko O.V., Chebanova S.A., Seimova G.V.* Consideration of the effect of flue gas emissions into the atmosphere when selecting construction sites // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 698. Issue 7. P. 077057. DOI: 10.1088/1757-899X/698/7/077057
29. Чебанова С.А., Азаров А.В., Беккер М.Е. Особенности и проблемы организационно-технологических решений строительства в стесненных условиях // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 4 (77). С. 146–152.

30. Ryzhova O., Khrichenkov A. Principles of renovation the territory of residential buildings dating from 1960s to 1970s: coping with modern housing crisis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 481. P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012024

Поступила в редакцию 21 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 11 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 19 апреля 2023 г.

31. Фурсина Ю.В., Иванова С.О., Леонова А.Н. Опыт реконструкции зданий в странах Европы и сравнение с реновацией в России // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. № 5. С. 241–246. DOI: 10.33619/2414-2948/42/32

ОБ АВТОРЕ: **Светлана Витальевна Колобова** — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры социальных, психологических и правовых коммуникаций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9062-2255, Scopus: 57190853602, ResearcherID: AAA-4778-2019, ORCID: 0000-0003-2551-7404; KolobovaSV@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Polyakov V.G., Chebanova S.A., Knyazev A.B., Popov D.A. Renovation experience in Russia and eastern European countries. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2020; 4(81):283-292. (rus.).
2. Kolobova S.V. A review of the experience of major repairs and reconstruction of multi-apartment, industrial, residential buildings in European countries and in Russia and its future prospects. *IV International Scientific and Practical Conference*. 2021. DOI: 10.1145/3487757.3490795
3. Kolobova S.V. Experience in rehabilitation of panel buildings in central and eastern Europe. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2019; 11(112):825-829. (rus.).
4. Kolobova S.V. Investment planning of measures for rehabilitation of industrial residential buildings in Berlin based on simulation models. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(2):257-270. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.257-270 (rus.).
5. Koren'kova G., Mityakina N., Belikh T., Dorokhova E. Formation of renovation processes of residential buildings in Russian cities. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022; 1:60-69. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-60-69. EDN XSYTWI. (rus.).
6. Merkur'yeva K.R. Development of urbanized territories: the development of renovation and the experience of its implementation on the example of the city of Tyumen. *International Agricultural Journal*. 2022; 65(2). DOI: 10.55186/25876740_2022_6_2_32. EDN QKMUBH. (rus.).
7. Samoylova N., Kosheleva O., Kasanova N. Problems and scenario strategies for the urban development of Volgograd in the aspect of sustainable environmental development. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022; 3:61-70. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-61-70. EDN UJBGV. (rus.).
8. Baigulov R.M., Korsakova I.V. Modern investment policy of the subjects of the Russian Federation. *Bulletin of the Moscow Humanitarian and Economic Institute*. 2021; 3:11-18. DOI: 10.37691/2311-5351-2021-0-3-11-18. EDN ROEAXB. (rus.).
9. Insafutdinov A.R., Kudinov A.V., Topchy D.V. Formation of organizational and technical parameters for implementing integrated development projects for the urban environment. *Science Prospects*. 2021; 5(140):151-153. (rus.).
10. Kedir F., Hall D.M. Resource efficiency in industrialized housing construction — A systematic review of current performance and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 286:125443. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125443
11. Maalsen S. Smart housing: the political and market responses of the intersections between housing, new sharing economies and smart cities. *Cities*. 2019; 84:1-7. DOI: 10.1016/j.cities.2018.06.025
12. Ylipulli J., Luusua A. Smart cities with a Nordic twist? Public sector digitalization in Finnish data-rich cities. *Telematics and Informatics*. 2020; 55:101457. DOI: 10.1016/j.tele.2020.101457
13. Serrano-Jiménez A., Femenías P., Thuvander L., Barrios-Padura Á. A multi-criteria decision support method towards selecting feasible and sustainable housing renovation strategies. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 278:123588. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123588
14. Ilyicheva E.D., Kyzmina T.K. Features and weaknesses of the construction organization project in the conditions of renovation. *Engineering Journal of Don*. 2021; 5. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6991> (rus.).
15. Tsopa N.V., Karpushkin A.S., Gorin A.K. Normative and legislative specificities for the Russian and European concurrence system of changes

in working documentation with budgetary financing of the construction project. *Economics of Construction and Nature Management*. 2019; 3(72):131-141. (rus.).

16. Tsopa N.V., Karpushkin A.S., Gorin A.K. Research of theoretical and methodical features of the procedure of construction control. *Economics of Construction and Nature Management*. 2019; 4(73):91-101. (rus.).

17. Topchy D.V., Yurgaytis A.Y., Popova A.D., Yurgaytis Y.S. Formation of object topology for the harmonization of the examination of the project documentation of conversion objects. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2019; 10(4):92-104. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.4.09 (rus.).

18. Lukyanova A.O., Ryazanova G.N. Development of housing renovation algorithm at the regional level. *Traditions and innovations in construction and architecture: collection of articles of the 77th All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2020; 108-111. (rus.).

19. Khabibullin R.T., Dmitrieva E.O. Analysis of the implementation of the federal project "Formation of a comfortable urban environment" of the municipal program of the Leninsky intracity district of the city district of Samara "Comfortable urban environment" for 2018–2022: feedback from the population. FGBOU VPO "Samara State University of Economics". *Scientific and Practical Research*. 2020; 3-3(26):68-72. (rus.).

20. Kolobova S.V. From renovation to modernization of the built environment taking into account the digitalization of construction. *Management Accounting*. 2022; 9-1:63-70. DOI: 10.25806/uu9-12022 (rus.).

21. Meerovich M.G., Malko A.V., Kozlova L.V., Gladkova E.A. Renovation of panel development in 1960–1980-s in Germany. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2017; 7(1):111-119. (rus.).

22. Meerovich M.G., Frantseva Yu.V. Problems of complex regeneration of residential area of the regions of large-panel development. Possibility to adapt German experience to social, economical and law conditions of the countries of CIS. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2017; 7(1):120-130. (rus.).

23. Maksimov R.I. Problems of construction of buildings and structures in conditions of dense urban

development. *Interactive Science*. 2021; 7(62):24-26. DOI: 10.21661/r-554649 (rus.).

24. Fesenko D. On the prospects for the development of the Moscow region — from transport infrastructure to KRT. Interview with Dmitry Klimov. *Architectural Bulletin*. 2021; 2(179):36-41. EDN RVPYFF. (rus.).

25. Chebanova S.A., Polykov V.G., Azarov A.V. Designing of organizational and technological solutions for construction in constrained urban environments. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 687(4):044004. DOI: 10.1088/1757-899X/687/4/044004

26. Chebanova S.A., Azarov V.N., Azarov A.V., Poljakov V.G. Influence of organizational and technological solutions of construction in cramped urban conditions on the environment. *Engineering Journal of Don*. 2018; 1. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/nly2018/4790> (rus.).

27. Polyakov V.G., Chebanova S.A., Antonov A.D. Organizational and technological problems in construction in cramped urban conditions. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2020; 2(79):113-118. (rus.).

28. Azarov V.N., Burlachenko O.V., Chebanova S.A., Seimova G.V. Consideration of the effect of flue gas emissions into the atmosphere when selecting construction sites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 698(7):077057. DOI: 10.1088/1757-899X/698/7/077057

29. Chebanova S.A., Azarov A.V., Bekker M.E. Features and problems of organizational and technological solutions of construction in cramped conditions. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2019; 4(77):146-152. (rus.).

30. Ryzhova O., Kharchenkov A. Principles of renovation the territory of residential buildings dating from 1960s to 1970s: Coping with modern housing crisis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 481:012024. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012024

31. Fursina Y., Ivanova S., Leonova A. Experience in the reconstruction of buildings in Europe and comparison with the renovation in Russia. *Bulletin of Science and Practice*. 2019; 5(5):241-246. DOI: 10.33619/2414-2948/42/32 (rus.).

Received November 21, 2022.

Adopted in revised form on April 11, 2023.

Approved for publication on April 19, 2023.

BIONOTES: Svetlana V. Kolobova — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Social, Psychological and Legal Communications; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9062-2255, Scopus: 57190853602, ResearcherID: AAA-4778-2019, ORCID: 0000-0003-2551-7404; KolobovaSV@mgisu.ru.

REVIEW PAPER / НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

UDC 69:502.131.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.771-784

A review of sustainability applications in the construction industry: perspectives and challenges

Naji Alaa Jalil Naji, Elsheikh Asser Mohamed*Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. One of the main causes of annual environmental degradation directly or indirectly is construction. The purpose of this study is to highlight current environmental issues in the construction industry. Besides how the construction sector can contribute to reducing the negative impact on the environment and creating "healthy buildings" that can be sustainable for both residents and our environment.

Materials and methods. An overall literature survey was carried out to get relevant information and provide an overview of the current situation regarding the applications of sustainability in the construction industry. According to the selected theme, an inclusive investigation was conducted using several databases, such as Google Scholar, Scopus, eLIBRARY.RU, and ScienceDirect. Many crucial key words, such as environmental sustainability, social sustainability, economic sustainability, sustainable development, environmental issues, etc. Were used to extract data on the sustainability issues in the construction industry. The primary data was compiled in the form of tables and figures. In most cases, the emphasis was on recent data.

Results. The most common methods for modelling sustainable construction indicators are described below, as well as the sustainable construction materials that have been used recently.

Conclusions. Building information modelling (BIM) appears is the single most commonly used technology today. With the development of computer technology, BIM is increasingly being used in combination with other techniques to achieve sustainable building goals. Careful selection of sustainable building materials may be the quickest way for builders to start integrating sustainable building design concepts.

KEYWORDS: environmental sustainability, social sustainability, economic sustainability, modelling sustainability indicators, building information modelling, sustainability, environmental issues

FOR CITATION: Naji Alaa Jalil Naji, Elsheikh Asser Mohamed. A review of sustainability applications in the construction industry: perspectives and challenges. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):771-784. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.771-784 (rus.).

Corresponding author: Naji Alaa Jaleel Naji, alaa.alnsray@qu.edu.iq.

Обзор применения устойчивого развития в строительной отрасли: перспективы и проблемы

Наджи Алаа Джалиль Наджи, Эльшейх Ассер Мохамед*Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН);
г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из главных причин ежегодного ухудшения состояния окружающей среды прямо или косвенно является строительство. Цель исследования — освещение актуальных экологических проблем в строительной отрасли, а также рассмотрение возможностей строительства в уменьшении негативного воздействия на окружающую среду и создание «здоровых зданий», которые могут быть устойчивыми как для жильцов, так и для природной среды.

Материалы и методы. Проведен обзор литературы для получения информации по текущей ситуации в применении принципов устойчивого развития в строительной сфере. Исследование выполнено с помощью баз данных: Google Scholar, Scopus, eLIBRARY.ru и ScienceDirect. Использованы ключевые слова: экологическая устойчивость, социальная устойчивость, экономическая устойчивость, устойчивое развитие, экологические проблемы и так далее. Первичные сведения получены в виде таблиц и рисунков.

Результаты. Описаны наиболее распространенные методы моделирования показателей устойчивого строительства, а также устойчивые строительные материалы, которые используются в последнее время.

Выводы. Информационное моделирование зданий (BIM) — технология, наиболее часто применяемая на сегодняшний день. С развитием компьютерных технологий BIM все чаще используется в сочетании с другими методиками для достижения целей устойчивого развития в строительстве: переработка и повторное использование отходов, устойчивое производство продукции или применение экологически чистых ресурсов. Тщательный выбор экологических устойчивых строительных материалов может стать самым быстрым способом для строителей начать интегрировать концепции устойчивого дизайна здания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экологическая устойчивость, социальная устойчивость, экономическая устойчивость, моделирование показателей устойчивости, информационное моделирование зданий, устойчивое развитие, экологические проблемы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Наджи А.Дж.Н., Эльшейх А.М. A review of sustainability applications in the construction industry: perspectives and challenges // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С.771–784. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.771-784

Автор, ответственный за переписку: Наджи Алаа Джаилиль Наджи, alaa.alnsray@qu.edu.iq.

INTRODUCTION

In 1987, Gro Harlem Brundtland Commission published a report called “Our Common Future”, which aroused the interest both of researchers and decision-makers. This report terms sustainability as “meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs” [1].

Sustainable construction aims to create and operate buildings adapted to resource efficiency and environmental design. There are seven principles for sustainable construction, including reducing resource consumption, using recyclable resources, reusing resources, applying life cycle costing, protecting from toxic substances, and focusing on quality [2].

The consumption of natural resources by some is at a rate that will leave little for future generations, and the pollution produced by the high standard of living of the wealthy is on the rise; furthermore, legislation doesn't set functions or limits for people's lives, including their consumption of natural resources and the limits of pollution resulting from their lives; therefore, sustainability development must be based on social value and lifestyle [3].

A sustainable building must have a positive impact on the climate and environment during the design, construction, and operation stages, as well as save resources and improve the quality of life for its users. Saying a building is sustainable is simple and appealing, but what are the actual factors or indicators that make a building sustainable [4]?

In general, the developing countries suffer from a delay in implementing the idea of sustainability in industry construction and are also exposed to the depletion of their natural resources and wealth without planning for their future needs. Sustainable development will be the best solution to environmental problems and the decreasing availability of natural resources [5].

In recent years, the rapid growth of the construction industry has led to irrational consumption of resources and increased environmental pollution. Although a lot of sustainability evaluation indicator systems have been proposed, like the Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency (CASBEE) and Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), these systems use sets of standard indicators and requirements to assess the buildings' sustainability, like energy consumption, raw materials, and waste, but don't monitor the sustainability during implementation projects or project lifecycles after starting operations [6].

MATERIALS AND METHODS

An overall literature survey was carried out to get relevant information and provide an overview of the current situation regarding the applications of sustainability in the construction industry. Some of the key challenges facing the construction industry have been highlighted, such as environmental impact and the depletion of natural resources. According to the selected theme, an inclusive investigation was conducted using several databases, such as Google Scholar, Scopus, e library, and ScienceDirect. Many crucial key words, such as environmental sustainability, social sustainability, economic sustainability, modeling sustainability indicators, building information modeling, sustainable development, environmental issues, etc., were used to extract data on the sustainability issues in the construction industry.

The primary data was obtained in the form of tables and figures. In most cases, the emphasis was on recent data, i.e., the previous 5 years (2018–2022), for compiling data on current applications of sustainability in the construction industry. When current information was unavailable, older data was used in some cases.

The most significant sustainability issues in the construction industry are highlighted, and opportunities and challenges are presented. Subsequently, the possibilities of integration of BIM, lean management, and sustainability have been reviewed and described.

Environmental sustainability

The conservation of biodiversity and the restoration of natural resources are central to environmental sustainability. Environmental sustainability prioritizes organism health over financial gain. Meanwhile, social sustainability is stressed through participation and maintaining a social system that embodies human dignity. This is driven by fears about global environmental problems or generally focuses on keeping a human-supported environment [7].

Environmental sustainability is meeting the resource needs and serving the needs of existing and future generations without compromising the validity of the ecosystems that provide them. Environmental sustainability is a series of handcuffs on the four main activities organizing the scale of the human economic subsystem: use of renewable energy, use of non-renewable energy, pollution, and waste reduction. Environmental sustainability addressed a lot of solutions, like using natural capital more effi-

ciently, the recycling policy, the use of renewable resources instead of depletable resources, the redesign of production processes, or recycling generated waste

to minimize the production of toxic materials [8]. Definitions of environmental sustainability are presented in Table 1.

Table 1. Summary of environmental sustainability definitions

Authors	Definition
N.P. Melville [9]	Environmental sustainability is ability enabled organizational practices and processes that improve environmental and economic performance
J. Morelli [10]	Environmental sustainability is meeting the resource and services needs of current and future generations without compromising the health of the ecosystems that provide them
R. Goodland [11]	Environmental sustainability seeks to improve human welfare by protecting the sources of raw materials used for human needs and ensuring that the sinks for human wastes are not exceeded, in order to prevent harm to humans
M.V. Mishenin [12]	Environmental sustainability is the ability of the ecological system to plastically move from the initial from one equilibrium state to another without changing the internal stable ones
B. Moldan et al. [13]	Environmental sustainability is maintaining nature's services at a suitable level. Pointing out the indivisible connection between these services and human well-being

We can update the definition of environmental sustainability, as environmental sustainability is about the long-term qualities that are evaluated in the natural environment and that most people want to preserve, like the capabilities that the natural environment must keep, like good living conditions, clean water, fresh air, and

a suitable climate. Furthermore, people's quality of life improves. Today, the environmental issues facing us are fundamentally different from those humanity had to deal with in previous generations. Table 2 presented five hot-topic environmental problems in the construction industry and described them.

Table 2. A summary of five hot environmental issues in the construction industry

Environmental Issues	Description
Climate Change	In general, climate change is the biggest challenge facing the world currently. Climate change is the result of the increasing emission of toxic gases into the atmosphere, which could lead to an increase in global temperatures for centuries. CO ₂ emissions in the construction industry are becoming a global concern, and the challenges confronting the building and construction sectors have peaked in recent years. Buildings and construction accounted for 37 % of global final CO ₂ emissions in 2020 [14]
Energy consumption	Renewable energy is one of the sustainable development goals that has a significant impact on the entire human race and ensures access to affordable, reliable, sustainable, and modern energy for all. This goal addresses climate change directly by reducing global greenhouse gas emissions
Waste Production	Waste production is considered a high-impact factor in sustainable construction. In the construction industry, natural resource consumption is high as well as an important contributor to waste generation. although a high percentage of the waste can be recycled and reused. A large proportion of this waste is discarded; instead, rational resource use and waste reuse have resulted in reduced waste production
Natural capital depletion	Renewable nature seeks to address the increasing threat posed by the depletion of natural capital. Because almost all economic activity is related to the use of natural resources, an irrational consumption of natural resources has presented us with a new challenge
Air Pollution	Air pollution has become an environmental threat that surrounds the whole world. The rapid growth of industrial development and construction activities may be responsible for air quality deterioration. Construction-linked dust is due to exhaust emissions from construction machinery and transport vehicles; therefore, emissions from construction sites are one of the main reasons responsible for air pollution

Zero emissions is an aim that must be followed up without delay to avoid the rising catastrophic costs related to climate change, as well as the necessity for both government financial institutions and the private sector to choose, once and for all, the green economy [15].

The use of renewable energy sources such as direct solar energy, wind and ocean energy, bioenergy, and hydropower will help the world achieve the principles of sustainability, but the renewable energy sector faces a lot of critical issues like difficulties in storage and the lack of predictability of investment in this sphere [16].

Waste management is considered the most imperious and impactful modern environmental crisis due to the unavailability of disposal sites; thereby, reducing waste production is a necessary aim without which no economic pattern can be sustainable. Many approaches and strategies have been used to achieve this goal, like recycling processes [17].

To manage the natural capital depletion challenge, it will call for forward planning and considering the environmental impact. Rational use of natural resources and the trend toward the green economy may help restore natural resources [18].

Pollution of surface water leads to decreased quality. Changes in volume and discharge of surface water have impacted potable water supply, the destruction of aquatic habitats, and, moreover, the loss of amenities and recreation. There is no technique or pattern for managing the sustainability of urban

water. There are a lot of ways to improve water sustainability, like stormwater management, desalination, and water reuse [19].

Integrated management of air pollution is one of the solutions to improving the quality of the air. It includes continuously monitoring the implementation of laws; implementing specific programs to reduce air pollution; encouraging public participation in order to reduce air pollution (citizens and non-governmental organizations); and promoting education and culture [20].

Social sustainability

The main objective of the construction industry is to provide society with a variety of construction projects; thus, improving the social performance of construction projects is critical to achieving social sustainability. It is vital to study and assess the social performance of construction projects, which would help with an adequate decision [21].

Social sustainability is one of the pillars of sustainability. However, the social aspects are taken less into consideration than the economic and environmental [22]. One of the critical issues when measuring sustainability in any field is identifying relevant sustainability indicators [23]. Social sustainability indicators deal with the social prosperity of humans and address the cultural perspectives of communities [24]. Social sustainability lacks detailed and appropriate assessment methods with a clear definition; definitions of social sustainability are presented in Table 3.

Table 3. Summary of Definitions: Social Sustainability

Authors	Definition
X. Xiahou et al. [25]	The social sustainability, which is to meet the demands of current and future populations and communities
M. Rostamnezhad et al. [26]	Social sustainability is the engagement among employees, local communities, clients, and the supply chain to ensure meeting the needs of current and future populations and communities
J. Morelli [27]	It is ensuring the efficient use of natural resources by present and future generations by the protection and development of social conditions which will support meeting human needs and ensuring environmental sustainability
A.N. Nesterov [28]	Social sustainability is addressing development challenges not only in the present but also in the future, not only with a focus on current citizens but also on future generations
T. Popović [29]	Social sustainability is a quality of societies. It signifies the nature-society relationships, mediated by work, as well as relationships within the society. Social sustainability is given, if work within a society and the related institutional arrangements

Cities across the world are experiencing accelerated growth, and the associated increase in anthropogenic activities and outcomes places an enormous burden on the environment and leads to poor social sustainabi-

lity. The clear concept and identified relevant indicators enhance decision-making processes for practitioners and provide suitable practical guidelines for different stakeholders to allow social sustainability to be achieved [30].

Economic sustainability

Economic sustainability is ultimately considered the most attractive and communal pillar of sustainability, as it reflects the long-term viewpoint of an establishment in terms of financial and marketing measures [31]. Economic sustainability is concerned with activities aimed at increasing social cohesion, equalizing opportunities, combating marginalization, and limiting

income disparities and access to employment, education, and healthcare. Therefore, there is an interrelated regulatory relationship between economic growth and social sustainability [32]. Economic sustainability focuses on natural capital, which provides finance inputs into the production process that are both renewable and exhaustible. Definitions of economic sustainability are presented in Table 4.

Table 4. Summary of economic sustainability definitions

Authors	Definition
M. Guth et al. [32]	The economic sustainability (or socio-economic sustainability if we assume that income inequalities are part of social sustainability), can be seen in terms of the income gap between agricultural and non-agricultural sectors
M.M.A.A. Ghaffar et al. [33]	Economic sustainability refers to practices that support long-term economic growth without negatively impacting the community's social, environmental, and cultural aspects
R. Štefko et al. [34]	Economic sustainability deals with financial performance, utilization of resources in an optimal way, and the profitable long-term functioning of the company
R. Goodland [11]	Economic sustainability is maintenance of capital or keeping capital intact and it devolve on consuming interest
W.D.N.S.M. Tennakoon et al. [31]	Economic sustainability is the long-term standpoint of an establishment in terms of financial and marketing measures

Across the world, there is growing recognition that the current model of economic growth requires ever-increasing resource use and leads to increased pollutant emissions. Historically, economic theory has concentrated on the efficiency of the use of merchandise and to a much lesser extent on equity distribution, therefore, economic sustainability aims to prevent self-interested, profit-hungry firms from having a harmful impact on the environment [35].

Green economics was suggested as one of the best solutions to reduce the negative impact of economic development on the environment in the 2014 environmental indicator report. Green economy refers to environmental, social, and economic patterns and creations that enable communities to use resources more effectively, such as encouraging overall human welfare while protecting the natural systems that sustain us¹.

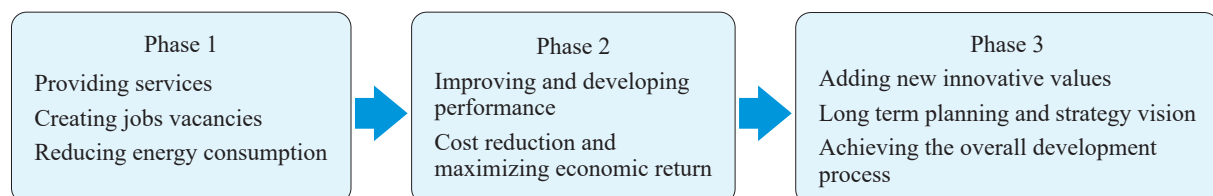
Some have sought to define the “green economy” as a dynamic process of economic switching towards achieving a zero-emission goal, increasing the efficiency of resource use, and improving the welfare of humans by using techniques and creations that create new

jobs while minimizing harmful environmental impacts in the long term [36].

The green economy focuses on keeping the natural capital as a condition for the development of the economy, while the sustainable development of social and economic systems focuses on stability without maleficence to the natural environment [37].

Figure shows phases of achieving economic sustainability that should include increasing economic returns, decreasing energy consumption, minimizing costs, and adding new innovative values.

Both organizations and government institutions are searching for methods to prompt environmental consciousness among stakeholders by making labor practices environmentally friendly. Recently, there has been a focus on adopting innovative environmental and social practices such as green rising innovation, green production, and green marketing. One of the most commonly used terms recently is “green employee behavior”, which refers to the conscious effort that requires employees at their workplace to conduct themselves in an environmentally friendly manner [38].



Phases of achieving economic sustainability [33]

¹ Environmental impact of Production — Consumption System in Europe. Environmental Indicator Report. 2014.

Building Information Modelling, Lean and Sustainability

In construction projects, the lean management philosophy aimed for timely project completion and identified alternatives during the project cycle life, which resulted in increased profits and safe processes that reduced environmental harm impact [39].

The objectives of environmental sustainability in construction are mainly focused on reducing material waste, conserving water, reducing pollution, using environmentally friendly materials and methods, and encouraging recycling thereby².

A lot of studies have proposed the connection between building information modeling (BIM), lean management philosophy, and sustainability in a possible integrated theoretical framework to improve performance in the construction sector [40, 41].

Several researchers are investigating the theoretical integration of three factors (BIM, lean management, and sustainability) into the construction process in order to present more efficient and sustainable projects throughout their entire lifecycle [42, 43].

The recent studies and literature review show the necessity for further experimental studies on the promising topic of modelling sustainability indicators in construction projects, as no widely accepted strategy has been discussed to reach sustainability in construction projects by using BIM-lean principles. Thus, one critical trend for further research could be the creation of additional studies on how to model indicators that actually contribute to this pathway [44].

Many studies discuss the integration of sustainability with project management and the links between project sustainability management and project success. In this aspect, proposals are summarized about using BIM techniques to model sustainability indicators in construction projects, like the multi-criteria decision model that was created by using the applications of BIM in achieving sustainable buildings; this model measured the impact of project sustainability management to achieve environmental and social sustainability [45].

Sustainable Building Technologies

Due to economic and environmental reasons, the production of sustainable materials has recently gained more attention, in which the use of waste material in the construction sector is a crucial step toward sustainability. The scientists and researchers look out for innovative and sustainable means to reuse/recycle the waste in the construction sphere in order to reduce its negative impact on the environment. In addition, provide alternatives to replace the natural building material [46].

Yearly, around 10 billion tons of concrete are produced worldwide [47]. Such production of concrete is likely to grow to 18 billion tons by 2050 [48]. The concrete industry has a big impact on the environment and is a key consumer of natural resources around the world. Furthermore, the use of recycled materials in civil engineering applications, such as plastic waste material as coarse and fine aggregate alternatives, has recently been investigated [49].

Numerous researchers have checked feasibility of use different recycled materials like plastic waste material, bricks waste, marble wastes, concrete fractions, Glass Waste, and waste Steel slag waste as alternatives for natural building material [50].

RESULTS OF THE RESEARCH

Although sustainable construction has become a real challenge for the future of the construction sector, the gap between construction project management and sustainability is still great. This topic is currently attracting the attention of more researchers [51, 52].

There are few studies debating the modelling of sustainability in the construction industry. However, the use of smart and statistical technologies, like multi-criteria assessment methods to integrate sustainability indicators in the construction industry, helps achieve initiatives for sustainable cities [53]. Description of the main methods of multi-criteria assessment in the Table 5.

Table 5. Summary of the main multi-criteria assessment methods

Method	Description
Analytic hierarchy process (AHP)	Analytic hierarchy technique is a multiple-criteria decision-making method for the analysis of complex issues. It permits the creation of a hierarchical framework, the assessment of relative importance, and the integrated assessment of factors with various criteria to make effective group decisions [54]
Analytic network process (ANP)	The ANP technique is a multi-criteria assessment method that is an advanced and generalized form of the AHP technique. The AHP method's main limitation is the assumption that relationships between elements follow a strict hierarchical framework, which ignores the interdependence of decision levels (criteria, sub-criteria, and alternatives). While AHP is weak at addressing many decision-making problems in the real world. ANP is a more powerful technique for modeling many complex decision-making issues as it provides for the evaluation of interactions and dependencies that exist in real life [55]

² Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries: a Discussion Document. CIB & UNEP-IETC, 2002.

End of the Table 5

Monte Carlo Simulation	Monte Carlo simulation is a mathematical technique that is used to estimate the possible results of an uncertain event. This technique is a useful method to improve decision-making under uncertain conditions and model complex issues [56]
System Dynamics (SD)	The system dynamics technique is complementary serves to analyze complex, dynamic, and nonlinear interactions between variables, and is generally used to simulate an evaluation process [57]
Fuzzy Sets theory	Fuzzy logic is a technique for modelling and addressing uncertain information in a form similar to the principle of probability theory by relating numerical values within the range [0,1] with proposed or probable facts [58]
Delphi Method	The Delphi method is a technique that uses rounds of questionnaires about certain questions until agreement is reached among the selected experts [59]

The multi-criteria assessment methods are commonly used to evaluate sustainability aspects, especially social sustainability. Generally, a multi-criteria assessment method is included when the problem and the assessment framework are defined. The weights of the criteria that comprise the assessment framework are then determined. After this, the different alternatives are evaluated with respect to each criterion. Finally, the evaluation of the alternatives is weighted against the weight of each criterion [60].

System dynamics employs a set of concepts and tools to aid in the understanding of the structure and interactions within complex systems, making it an effective tool for modelling complex socioeconomic-environmental issues [61].

The hybrid system-dynamic (SD-fuzzy) approach using the DEMATEL technique presents a powerful tool for modelling social sustainability indicators by using the complex interconnected methodology of various impacting factors and decision-making. Furthermore, it can be executed on various kinds of projects to analyze and prioritize the factors affecting the social sustainability performance of the project [62].

The building sector can take up the obligation to contribute to sustainable development by finding more environmentally benign methods of construction and building. Among the directions for solutions is to be found in new material applications, recycling and reuse, sustainable production of products. Description of the main recycled materials in the construction industry in the Table 6.

Table 6. Summary of major recycled materials in the construction industry

Authors	Recycled materials	Replacements materials	Impact
B. Basaran et al. [63]	Marble wastes	Fine aggregate	Positive impact on the concrete compressive strength as 15 % replacement ratio maximum
J. Sivamani [64]	Concrete fractions	Fine aggregate	Positive impact on the concrete compressive strength as 30 % replacement ratio maximum
C.M. Yun et al. [65]	Glass Waste	Coarse aggregate	Positive impact on the concrete compressive strength as 10 % replacement ratio maximum with superplasticizer
Y. Agrawal et al. [66]	Dolomite quarry waste	Fine aggregate	Equivalent impact on the concrete compressive strength as 10 % replacement ratio maximum
N.S. Piro et al. [67]	Steel slag waste	Coarse aggregate	Positive impact on the concrete compressive strength as a partial replacement
D.J. Abdullah et al. [68]	Brick waste	Coarse aggregate	Equivalent impact on the concrete compressive strength as 10 % replacement ratio maximum
M.M. Radhi et al. [69]	Plastic waste high-density polyethylene (HDPE)	Coarse aggregate	Equivalent impact on the concrete compressive strength as 30 % replacement ratio maximum
C. Suksiripattanapong et al. [70]	Plastic waste (polyethylene terephthalate)	Additions	Improvement in the compressive strength
H. Ghanem et al. [71]	Wastewater plastic gallons	Plastic mesh layers	Exhibited ductile behavior and the load carrying capacity

CONCLUSION AND DISCUSSION

The main goal of this review is to highlight the possibilities and main methodological challenges of applying sustainability in the construction sector. There is a rising demand for the harnessing of sustainability to assess the environmental impact of construction projects. Invite those interested in impact assessment processes to draw attention to these issues and make efforts to improve sustainability performance to reduce the harmful impact of the construction industry on the environment. Many conclusions can be summed up as follows:

- multi-criteria assessment methods are widely used to assess aspects of sustainability, especially social sustainability. Typically, the multi-criteria assessment method is used when the problem and the scope of the assessment are defined. Then the weights

of the criteria that make up the evaluation system are determined. After that, different alternatives are evaluated for each criterion. Finally, the evaluation of the alternatives is weighted by the weight of each criterion;

- building information modelling (BIM) appears to be the single most commonly used technology thus far. With the development of computer technology, BIM has constantly been used in combination with other technologies to achieve the sustainability development goals in the construction industry;

- among the directions for solutions is to be found in new material applications, Recycling and reuse sustainable materials as a substitute for natural resources, careful selection of eco-friendly, sustainable building materials may be the critical step for builders to start integrating sustainable design concepts in buildings.

REFERENCES

1. Butlin J. Our common future. By World commission on environment and development. (London, Oxford University Press, 1987, pp. 383 £5.95.). *Journal of International Development*. 1989; 1(2):284-287. DOI: 10.1002/jid.3380010208
2. Zhong Y., Wu P. Economic sustainability, environmental sustainability and constructability indicators related to concrete- and steel-projects. *Journal of Cleaner Production*. 2015; 108:748-756. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.095
3. Giryа M.A., Giryа L.V. Prospects for applying green standards and technologies in housing construction. *Engineering Journal of Don*. 2018; 3. (rus.).
4. Kangezova M.Kh., Petrosyan R.S., Zherugov R.A. Application of methods for assessing the environmental conditions in construction. *Science and Business: Ways of Development*. 2019; 6(96):54-56. (rus.).
5. Knopfел H. Sustainability in construction projects. *Management of Projects and Programs*. 2020; (1):22-37. DOI: 10.36627/2075-1214-2020-1-1-22-37 (rus.).
6. 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
7. Hidayat Y.A., Rohman M.A., Utomo C. Social sustainability indicators for school buildings in Surabaya. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 447(1):012033. DOI: 10.1088/1755-1315/447/1/012033
8. Sutton P. A perspective on environmental sustainability. *Paper on the Victorian Commissioner for Environmental Sustainability*. 2004; 1-32.
9. Melville N.P. Information Systems Innovation for Environmental Sustainability. *MIS Quarterly*. 2010; 34(1):1-21. DOI: 10.2307/20721412.
10. Morelli J. Environmental sustainability: A definition for environmental professionals. *Journal of Environmental Sustainability*. 2011; 1(1):1-10. DOI: 10.14448/jes.01.0002
11. Goodland R. The concept of environmental sustainability. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1995; 26(1):1-24. DOI: 10.1146/annurev.es.26.110195.000245.
12. Mishenin M.V. Stability of ecological systems of the Arctic zone under the conditions of anthropogenic impact. *Interexpo GEO-Siberia*. 2022; 2(4):43-53. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-4-43-53
13. Moldan B., Janoušková S., Hák T. How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets. *Ecological Indicators*. 2012; 17:4-13. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.04.033
14. Hamilton I., Rapf O., Kockat D.J., Zuhair D.S., Abergel T., Oppermann M. et al. Global status report for buildings and construction. *United Nations Environmental Programme*. 2020.
15. Ermakova E.P. About the draft pan-European code on climate and regulatory issues of "green" financing in the European union. *State and Law*. 2020; 5:96-107. DOI: 10.31857/S013207690009682-2 (rus.).
16. Cîrstea S.D., Moldovan-Teseliос C., Cîrstea A., Turcu A.C., Darab C.P. Evaluating renewable energy sustainability by composite index. *Sustainability*. 2018; 10(3):811. DOI: 10.3390/su10030811
17. Shilkina S.V. Global trends in waste management and analysis of the situation in Russia. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2020; 7(1):5. DOI: 10.15862/05ECOR120 (rus.).
18. Okhotnikov I.V. "Green economy" as the basis for effective environmental and economic interaction in the modern world. *Economics*. 2016; 1(26):47-51. (rus.).
19. Klepov V.I. Ratio of quantity and quality of water resources at managing water economic systems. *Environmental Engineering*. 2020; 1:94-99. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-1-94-100 (rus.).

20. Karelin A.O., Lomtev A.Yu., Volkodava M.V., Yeregin G.B. The improvement of approaches to the assessment of effects of the anthropogenic air pollution on the population in order to management the risk for health. *Hygiene and Sanitation*. 2019; 98(1):82-86. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-1-82-86 (rus.).
21. Yu W., Cheng S., Ho W., Chang Y. Measuring the Sustainability of Construction Projects through Their Lifecycle: A Taiwan Lesson. *Sustainability*. 2018; 10(5):1523. DOI: 10.3390/su10051523
22. Sierra L.A., Yepes V., Pellicer E. A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 187:496-513. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.022
23. Fernández-Sánchez G., Rodríguez-López F. A methodology to identify sustainability indicators in construction project management — Application to infrastructure projects in Spain. *Ecological Indicators*. 2010; 10(6):1193-1201. DOI: 10.1016/j.ecolind.2010.04.009
24. Popovic T., Barbosa-Póvoa A., Kraslawski A., Carvalho A. Quantitative indicators for social sustainability assessment of supply chains. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 180:748-768. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.142
25. Xiahou X., Tang Y., Yuan J., Chang T., Liu P., Li Q. Evaluating Social Performance of Construction Projects: An Empirical Study. *Sustainability*. 2018; 10(7):2329. DOI: 10.3390/su10072329
26. Rostamnezhad M., Nasirzadeh F., Khanzadi M., Jarban M.J., Ghayoumian M. Modeling social sustainability in construction projects by integrating system dynamics and fuzzy-DEMATEL method: a case study of highway project. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2020; 27(7):1595-1618. DOI: 10.1108/ECAM-01-2018-003
27. Yilmaz M., Yildiz S. The importance of occupational health and safety (OHS) and OHS budgeting in terms of social sustainability in construction sector. *Journal of Building Material Science*. 2021; 2(1). DOI: 10.30564/jbms.v2i1.2591
28. Nesterov A.N. Assessment of the sustainability of the socio-economic development of the city. *Actual Problems of the Humanities and Natural Sciences*. 2010; 7:117-122. (rus.).
29. Popović T. *Quantitative indicators of social sustainability applicable in process systems engineering*. Lappeenranta, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.21807.79525
30. Tseng M.L., Li S.X., Lin C.W.R., Chiu A.S. Validating green building social sustainability indicators in China using the fuzzy delphi method. *Journal of Industrial and Production Engineering*. 2023; 40(1):35-53. DOI: 10.1080/21681015.2022.2070934
31. Tennakoon W.D.N.S.M., Janadari M.P.N. Measuring economic sustainability: Are we doing it right? *Sri Lanka Journal of Social Sciences and Humanities*. 2022; 2(1):21. DOI: 10.4038/sljssh.v2i1.53
32. Guth M., Smędzik-Ambroży K., Czyżewski B., Stępień S. The economic sustainability of farms under common agricultural policy in the European Union countries. *Agriculture*. 2020; 10(2):34. DOI: 10.3390/agriculture10020034
33. Ghaffar M.M.A.A., El Aziz N.A.A. Urban form and economic sustainability in housing projects. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2021; 68(1). DOI: 10.1186/s44147-021-00032-w
34. Štefko R., Vašaničová P., Jenčová S., Pachura A. Management and economic sustainability of the Slovak industrial companies with medium energy intensity. *Energies*. 2021; 14(2):267. DOI: 10.3390/en14020267
35. Van Niekerk A.J. Inclusive economic sustainability: SDGs and global inequality. *Sustainability*. 2020; 12(13):5427. DOI: 10.3390/su12135427
36. Mikhno I., Koval V., Shvets G., Garmatiuk O., Tamošiūnienė R. Green economy in sustainable development and improvement of resource efficiency. *Central European Business Review*. 2021; 10(1):99-113. DOI: 10.18267/j.cebr.252
37. Dovlatova G., Dovlatova A., Smakhtina A., Tkachova O., Chistyakov A., Bondarenko O. et al. Modernization of Russian environmental efficiency in the green economy. *E3S Web of Conferences*. 2021; 244:10045. DOI: 10.1051/e3sconf/202124410045
38. Tahir R., Athar M.R., Afzal A. The impact of greenwashing practices on green employee behaviour: Mediating role of employee value orientation and green psychological climate. *Cogent Business & Management*. 2020; 7(1):1781996. DOI: 10.1080/23311975.2020.1781996
39. Mao X., Zhang X. Construction Process Reengineering by Integrating Lean Principles and Computer Simulation Techniques. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2008; 134(5):371-381. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:5(371)
40. Mellado F., Lou E.C.W. Building information modelling, lean and sustainability: An integration framework to promote performance improvements in the construction industry. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 61:102355. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102355
41. Tsarev A.I. Implementation of BIM technologies in the construction sector: the European experience. *Construction: Science and Education*. 2022; 12(3):125-136. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.8 (rus.).
42. Khodeir L.M., Othman R. Examining the interaction between lean and sustainability principles in the management process of AEC industry. *Ain Shams Engineering Journal*. 2018; 9(4):1627-1634. DOI: 10.1016/j.asej.2016.12.005
43. Babalola O., Ibem E.O., Ezema I.C. Lean construction: an approach to achieving sustainable built environment in Nigeria. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1299(1):012007. DOI: 10.1088/1742-6596/1299/1/012007

44. Stanitsas M., Kirytopoulos K., Leopoulos V. Integrating sustainability indicators into project management: The case of construction industry. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 279:123774. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123774
45. Carvalho M.M., Rabechini Jr.R. Can project sustainability management impact project success? An empirical study applying a contingent approach. *International Journal of Project Management*. 2017; 35(6):1120-1132. DOI: 10.1016/j.ijproman.2017.02.018
46. Lamba P., Kaur D.P., Raj S., Sorout J. Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development : a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022; 29(57):86156-86179. DOI: 10.1007/s11356-021-16980-y
47. Meyer C. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*. 2009; 31(8):601-605. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010
48. Hache E., Simoën M., Seck G.S., Bonnet C., Jabberi A., Carcanague S. The impact of future power generation on cement demand: An international and regional assessment based on climate scenarios. *International Economics*. 2020; 163:114-133. DOI: 10.1016/j.inteco.2020.05.002
49. Rafiq A.H., Al-kamaki Y.S.S. The effect of adding waste plastic fibers on the concrete properties and shear strength of rc beams : a review. *The Journal of University of Duhok*. 2022; 25(2):507-530. DOI: 10.26682/sjuod.2022.25.2.45
50. Da Silva T.R., de Azevedo A.R.G., Cecchin D., Marvila M.T., Amran M., Fediuk R. et al. Application of plastic wastes in construction materials: A review using the concept of life-cycle assessment in the context of recent research for future perspectives. *Materials*. 2021; 14(13):3549. DOI: 10.3390/ma14133549
51. López F.R., Sánchez G.F. Challenges for sustainability assessment by indicators. *Leadership and Management in Engineering*. 2011; 11(4):321-325. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000142
52. Balalov V.V., Barabanova T.A. The life cycle assessment of smart sustainable cities. *Construction: Science and Education*. 2022; 12(2):72-101. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.6 (rus.).
53. Olawumi T.O., Chan D.W. Critical success factors for implementing building information modeling and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey. *Sustainable Development*. 2019; 27(4):587-602. DOI: 10.1002/sd.1925
54. Elshafei G., Katunský D., Zeleňáková M., Negm A. Opportunities for using analytical hierarchy process in green building optimization. *Energies*. 2022; 15(12):4490. DOI: 10.3390/en15124490
55. Chen C.H. A Hybrid Multi-Criteria Decision-Making Approach Based on ANP-Entropy TOPSIS for Building Materials Supplier Selection. *Entropy*. 2021; 23(12):1597. DOI: 10.3390/e23121597
56. Gervásio H., da Silva L.S. Life-cycle social analysis of motorway bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2013; 9(10):1019-1039. DOI: 10.1080/15732479.2011.654124
57. Karami S., Karami E., Buys L., Droge-muller R. System dynamic simulation: A new method in social impact assessment (SIA). *Environmental Impact Assessment Review*. 2017; 62:25-34. DOI: 10.1016/j.eiar.2016.07.009
58. Fayek A.R. *Fuzzy hybrid computing in construction engineering and management*. Emerald Group Publishing, 2018. DOI: 10.1108/9781787438682
59. Kermanshachi S., Rouhanizadeh B., Dao B. Application of Delphi method in identifying, ranking, and weighting project complexity indicators for construction projects. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*. 2020; 12(1). DOI: 10.1061/(asce)la.1943-4170.0000338
60. Zavadskas E.K., Turskis Z., Volvačiovas R., Kildiene S. Multi-criteria assessment model of technologies. *Studies in Informatics and Control*. 2013; 22(4). DOI: 10.24846/v22i4y201301
61. Guan D., Gao W., Su W., Li H., Hokao K. Modeling and dynamic assessment of urban economy – resource – environment system with a coupled system dynamics — geographic information system model. *Ecological Indicators*. 2011; 11(5):1333-1344. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.02.007
62. Mohagheghian E., Hosseini-Nasab H., Abraham A., Fakhrzad M.B. Sustainability Considerations in the Product Design Using System Dynamics and Fuzzy Cognitive Maps. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 383-394. DOI: 10.1007/978-3-030-73689-7_37
63. Basaran B., Kalkan I., Aksoylu C., Özkılıç Y.O., Sabri M.M.S. Effects of Waste Powder, Fine and Coarse Marble Aggregates on Concrete Compressive Strength. *Sustainability*. 2022; 14(21):14388. DOI: 10.3390/su142114388
64. Sivamani J. Sustainable Utilization of Dumped Concrete Wastes as Fine Aggregates in Concrete — An Experimental Study. *International Journal of Engineering*. 2022; 35(9):1795-1802. DOI: 10.5829/ije.2022.35.09c.16
65. Yun C.M., Rahman M.R., Kuok K.K., Chai A.P.S., Ding A.B.S., Bakri M.K.B. Glass Waste as Coarse Aggregate Filler Replacement in Concrete. *Waste Materials in Advanced Sustainable Concrete*. 2022; 25-44. DOI: 10.1007/978-3-030-98812-8_2
66. Agrawal Y., Gupta T., Sharma R.K. Strength and durability assessment of concrete containing dolomite quarry waste as fine aggregate. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2022; 24(1):268-286. DOI: 10.1007/s10163-021-01318-0
67. Piro N.S., Mohammed A., Hamad S.M., Kurda R. Electrical Resistivity-Compressive strength

predictions for normal strength concrete with waste steel slag as a coarse aggregate replacement using various analytical models. *Construction and Building Materials*. 2022; 327:127008. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127008

68. Abdullah D.J., Abbas Z.K., Abed S.K. Some Properties of Concrete Containing Waste Brick as Partial Replacement of Coarse Aggregate and Addition of Nano Brick Powder. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 961(1):012093. DOI: 10.1088/1755-1315/961/1/012093

69. Radhi M.M., Khalil W.I., Shafeeq S. Flexural behavior of sustainable reinforced concrete

beams containing HDPE plastic waste as coarse aggregate. *Cogent Engineering*. 2022; 9(1). DOI: 10.1080/23311916.2022.2127470

70. Suksiripattanapong C., Phetprapai T., Sing-sang W., Phetchuay C., Thumrongvut J., Tabyang W. Utilization of recycled plastic waste in fiber reinforced concrete for eco-friendly footpath and pavement applications. *Sustainability*. 2022; 14(11):6839. DOI: 10.3390/su14116839

71. Ghanem H., Chahal S., Khatib J., Elkordi A. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Recycled Plastic Mesh. *Buildings*. 2022; 12(12):2085. DOI: 10.3390/buildings12122085

Received December 14, 2022.

Adopted in revised form on April 4, 2023.

Approved for publication on April 19, 2023.

B I O N O T E S : **Naji Alaa Jalil Naji** — postgraduate student of the Engineering Academy of the Department of Construction; **Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN)**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9156-6899; 1042215018@pfur.ru;

Elsheikh Asser Mohamed — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Engineering Academy of the Department of Construction; **Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN)**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; elsheykh_am@pfur.ru.

Authors' contribution:

Naji Alaa Jalil Naji — idea, material collection and data processing, writing an article.

Elsheikh Asser Mohamed — revision of the text, scientific editing.

The authors declare that there is no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Butlin J. Our common future. By World commission on environment and development. (London, Oxford University Press, 1987, pp. 383 £5.95.) // *Journal of International Development*. 1989. Vol. 1. Issue 2. Pp. 284–287. DOI: 10.1002/jid.3380010208

2. Zhong Y., Wu P. Economic sustainability, environmental sustainability and constructability indicators related to concrete- and steel-projects // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 108. Pp. 748–756. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.095

3. Гиря М.А., Гиря Л.В. Перспективы применения зеленых стандартов и технологий в жилищном строительстве // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 3.

4. Кангезова М.Х., Петросян Р.С., Жеругов Р.А. Применение методов оценки состояния среды жизнедеятельности в строительстве // *Наука и бизнес: пути развития*. 2019. № 6 (96). С. 54–56.

5. Кнопфель Х. Устойчивость в строительных проектах // *Управление проектами и программами*. 2020. № 1. С. 22–37. DOI: 10.36627/2075-1214-2020-1-1-22-37

6. 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

7. Hidayat Y.A., Rohman M.A., Utomo C. Social sustainability indicators for school buildings in Surabaya // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 447. Issue 1. P. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/447/1/012033

8. Sutton P. A perspective on environmental sustainability // *Paper on the Victorian Commissioner for Environmental Sustainability*. 2004.

9. Melville N.P. Information Systems Innovation for Environmental Sustainability // *MIS Quarterly*. 2010. Vol. 34. Issue 1. Pp. 1–21. DOI: 10.2307/20721412

10. Morelli J. Environmental Sustainability: A Definition for Environmental Professionals // *Journal of Environmental Sustainability*. 2011. Vol. 1. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.14448/jes.01.0002

11. Goodland R. The concept of environmental sustainability // *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1995. Vol. 26. Issue 1. Pp. 1–24. DOI: 10.1146/annurev.es.26.110195.000245

12. Mishenin M.V. Stability of ecological systems of the Arctic zone under the conditions of anthropogenic impact // *Interexpo GEO-Siberia*. 2022. Vol. 2. Issue 4. Pp. 43–53. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-4-43-53

13. Moldan B., Janoušková S., Hák T. How to understand and measure environmental sustainability:

Indicators and targets // Ecological Indicators. 2012. Vol. 17. Pp. 4–13. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.04.033

14. Hamilton I., Rapf O., Kockat D.J., Zuhair D.S., Abergel T., Oppermann M. et al. Global status report for buildings and construction. United Nations Environmental Programme. 2020.

15. Ермакова Е.П. О проекте общеевропейского закона о климате и проблемах нормативного регулирования «зеленого» финансирования в Европейском Союзе // Государство и право. 2020. № 5. С. 96–107. DOI: 10.31857/S013207690009682-2

16. Cirstea S.D., Moldovan-Teseliu C., Cirstea A., Turcu A.C., Darab C.P. Evaluating renewable energy sustainability by composite index // Sustainability. 2018. Vol. 10. Issue 3. P. 811. DOI: 10.3390/su10030811

17. Шилкина С.В. Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России // Отходы и ресурсы. 2020. Т. 7. № 1. С. 5. DOI: 10.15862/05ECOR120

18. Охотников И.В. «Зеленая экономика» как основа эффективного эколого-экономического взаимодействия в современном мире // Экономика. 2016. № 1 (26). С. 47–51.

19. Клёнов В.И. Соотношение количества и качества водных ресурсов при управлении водохозяйственными системами // Природообустройство. 2020. № 1. С. 94–99. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-1-94-100

20. Карелин А.О., Ломтев А.Ю., Волкодаева М.В., Еремин Г.Б. Совершенствование подходов к оценке воздействия антропогенного загрязнения атмосферного воздуха на население в целях управления рисками для здоровья // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 1. С. 82–86. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-1-82-86

21. Yu W., Cheng S., Ho W., Chang Y. Measuring the sustainability of construction projects throughout their lifecycle: A Taiwan lesson // Sustainability. 2018. Vol. 10. Issue 5. P. 1523. DOI: 10.3390/su10051523

22. Sierra L.A., Yepes V., Pellicer E. A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 187. Pp. 496–513. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.022

23. Fernández-Sánchez G., Rodríguez-López F. A methodology to identify sustainability indicators in construction project management — Application to infrastructure projects in Spain // Ecological Indicators. 2010. Vol. 10. Issue 6. Pp. 1193–1201. DOI: 10.1016/j.ecolind.2010.04.009

24. Popovic T., Barbosa-Póvoa A., Kraslawski A., Carvalho A. Quantitative indicators for social sustainability assessment of supply chains // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 180. Pp. 748–768. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.142

25. Xiahou X., Tang Y., Yuan J., Chang T., Liu P., Li Q. Evaluating Social Performance of Construction

Projects: An Empirical Study // Sustainability. 2018. Vol. 10. Issue 7. P. 2329. DOI: 10.3390/su10072329

26. Rostamnezhad M., Nasirzadeh F., Khanzadi M., Jarban M.J., Ghayoumian M. Modeling social sustainability in construction projects by integrating system dynamics and fuzzy-DEMATEL method: a case study of highway project // Engineering, Construction and Architectural Management. 2020. Vol. 27. Issue 7. Pp. 1595–1618. DOI: 10.1108/ECAM-01-2018-003

27. Yilmaz M., Yildiz S. The importance of occupational health and safety (OHS) and OHS budgeting in terms of social sustainability in construction sector // Journal of Building Material Science. 2021. Vol. 2. Issue 1. DOI: 10.30564/jbms.v2i1.2591

28. Нестеров А.Н. Оценка устойчивости социально-экономического развития города // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2010. № 7. С. 117–122.

29. Popović T. Quantitative indicators of social sustainability applicable in process systems engineering. Lappeenranta, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.21807.79525

30. Tseng M.L., Li S.X., Lin C.W.R., Chiu A.S. Validating green building social sustainability indicators in China using the fuzzy delphi method // Journal of Industrial and Production Engineering. 2023. Vol. 40. Issue 1. Pp. 35–53. DOI: 10.1080/21681015.2022.2070934

31. Tennakoon W.D.N.S.M., Janadari M.P.N. Measuring economic sustainability: Are we doing it right? // Sri Lanka Journal of Social Sciences and Humanities. 2022. Vol. 2. Issue 1. P. 21. DOI: 10.4038/sljssh.v2i1.53

32. Guth M., Smędzik-Ambroży K., Czyżewski B., Stępień S. The economic sustainability of farms under common agricultural policy in the European Union countries // Agriculture. 2020. Vol. 10. Issue 2. P. 34. DOI: 10.3390/agriculture10020034

33. Ghaffar M.M.A.A., El Aziz N.A.A. Urban form and economic sustainability in housing projects // Journal of Engineering and Applied Science. 2021. Vol. 68. Issue 1. DOI: 10.1186/s44147-021-00032-w

34. Štefko R., Vašaničová P., Jenčová S., Pachura A. Management and economic sustainability of the Slovak industrial companies with medium energy intensity // Energies. 2021. Vol. 14. Issue 2. P. 267. DOI: 10.3390/en14020267

35. Van Niekerk A.J. Inclusive economic sustainability: SDGs and global inequality // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 13. P. 5427. DOI: 10.3390/su12135427

36. Mikhno I., Koval V., Shvets G., Garmatiuk O., Tamošiūnienė R. Green economy in sustainable development and improvement of resource efficiency // Central European Business Review. 2021. Vol. 10. Issue 1. Pp. 99–113. DOI: 10.18267/j.cebr.252

37. *Dovlatova G., Dovlatova A., Smakh-tina A., Tkachova O., Chistyakov A., Bondarenko O. et al.* Modernization of Russian environmental efficiency in the green economy // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. P. 10045. DOI: 10.1051/e3sconf/202124410045
38. *Tahir R., Athar M.R., Afzal A.* The impact of greenwashing practices on green employee behaviour: Mediating role of employee value orientation and green psychological climate // Cogent Business & Management. 2020. Vol. 7. Issue 1. P. 1781996. DOI: 10.1080/23311975.2020.1781996
39. *Mao X., Zhang X.* Construction process reengineering by integrating lean principles and computer simulation techniques // Journal of Construction Engineering and Management. 2008. No. 134 (5). Pp. 371–381. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:5(371)
40. *Mellado F., Lou E.C.W.* Building information modelling, lean and sustainability: An integration framework to promote performance improvements in the construction industry // Sustainable Cities and Society. 2020. Vol. 61. P. 102355. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102355
41. *Царев А.И.* Европейский опыт внедрения BIM-технологий в строительном секторе // Строительство: наука и образование. 2022. № 12 (3). С. 125–136. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.8
42. *Khodeir L.M., Othman R.* Examining the interaction between lean and sustainability principles in the management process of AEC industry // Ain Shams Engineering Journal. 2018. Vol. 9. Issue 4. Pp. 1627–1634. DOI: 10.1016/j.asej.2016.12.005
43. *Babalola O., Ibem E.O., Ezema I.C.* Lean construction: an approach to achieving sustainable built environment in Nigeria // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1299. Issue 1. P. 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/1299/1/012007
44. *Stanitsas M., Kirytopoulos K., Leopoulos V.* Integrating sustainability indicators into project management: The case of construction industry // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 279. P. 123774. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123774
45. *Carvalho M.M., Rabechini Jr.R.* Can project sustainability management impact project success? An empirical study applying a contingent approach // International Journal of Project Management. 2017. Vol. 35. Issue 6. Pp. 1120–1132. DOI: 10.1016/j.ijproman.2017.02.018
46. *Lamba P., Kaur D.P., Raj S., Sorout J.* Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: a review // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. Issue 57. Pp. 86156–86179. DOI: 10.1007/s11356-021-16980-y
47. *Meyer C.* The greening of the concrete industry // Cement and Concrete Composites. 2009. Vol. 31. Issue 8. Pp. 601–605. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010
48. *Hache E., Simoën M., Seck G.S., Bonnet C., Jabberi A., Carcanague S.* The impact of future power generation on cement demand: An international and regional assessment based on climate scenarios // International Economics. 2020. Vol. 163. Pp. 114–133. DOI: 10.1016/j.inteco.2020.05.002
49. *Rafiq A.H., Al-kamaki Y.S.S.* The effect of adding waste plastic fibers on the concrete properties and shear strength of rc beams: a review // The Journal of University of Duhok. 2022. Vol. 25. Issue 2. Pp. 507–530. DOI: 10.26682/sjuod.2022.25.2.45
50. *Da Silva T.R., de Azevedo A.R.G., Cecchin D., Marvila M.T., Amran M., Fediuk R. et al.* Application of plastic wastes in construction materials: A review using the concept of life-cycle assessment in the context of recent research for future perspectives // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 13. P. 3549. DOI: 10.3390/ma14133549
51. *López F.R., Sánchez G.F.* Challenges for sustainability assessment by indicators // Leadership and Management in Engineering. 2011. Vol. 11. Issue 4. Pp. 321–325. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000142
52. *Балалов В.В., Барабанова Т.А.* Оценка жизненного цикла интеллектуальных устойчивых городов // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. № 2. С. 72–101. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.6
53. *Olawumi T.O., Chan D.W.* Critical success factors for implementing building information modeling and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey // Sustainable Development. 2019. Vol. 27. Issue 4. Pp. 587–602. DOI: 10.1002/sd.1925
54. *Elshafei G., Katunský D., Zelenáková M., Negm A.* Opportunities for using analytical hierarchy process in green building optimization // Energies. 2022. Vol. 15. Issue 12. P. 4490. DOI: 10.3390/en15124490
55. *Chen C.H.* A hybrid multi-criteria decision-making approach based on anp-entropy topsis for building materials supplier selection // Entropy. 2021. Vol. 23. Issue 12. P. 1597. DOI: 10.3390/e23121597
56. *Gervásio H., da Silva L.S.* Life-cycle social analysis of motorway bridges // Structure and Infrastructure Engineering. 2013. Vol. 9. Issue 10. Pp. 1019–1039. DOI: 10.1080/15732479.2011.654124
57. *Karami S., Karami E., Buys L., Drogemuller R.* System dynamic simulation: A new method in social impact assessment (SIA) // Environmental Impact Assessment Review. 2017. Vol. 62. Pp. 25–34. DOI: 10.1016/j.eiar.2016.07.009
58. *Fayek A.R.* Fuzzy hybrid computing in construction engineering and management. Emerald Group Publishing, 2018. DOI: 10.1108/9781787438682
59. *Kermanshachi S., Rouhanizadeh B., Dao B.* Application of Delphi method in identifying, ranking, and

weighting project complexity indicators for construction projects // *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*. 2020. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1061/(asce)la.1943-4170.0000338

60. Zavadskas E.K., Turskis Z., Volvačiovas R., Kildiene S. Multi-criteria assessment model of technologies // *Studies in Informatics and Control*. 2013. Vol. 22. Issue 4. DOI: 10.24846/v22i4y201301

61. Guan D., Gao W., Su W., Li H., Hokao K. Modeling and dynamic assessment of urban economy – resource – environment system with a coupled system dynamics — geographic information system model // *Ecological Indicators*. 2011. Vol. 11. Issue 5. Pp. 1333–1344. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.02.007

62. Mohagheghian E., Hosseini-Nasab H., Abraham A., Fakhrzad M.B. Sustainability considerations in the product design using system dynamics and fuzzy cognitive maps // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Pp. 383–394. DOI: 10.1007/978-3-030-73689-7_37

63. Basaran B., Kalkan I., Aksoylu C., Özkılıç Y.O., Sabri M.M.S. Effects of Waste Powder, Fine and Coarse Marble Aggregates on Concrete Compressive Strength // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Issue 21. P. 14388. DOI: 10.3390/su142114388

64. Sivamani J. Sustainable utilization of dumped concrete wastes as fine aggregates in concrete — an experimental study // *International Journal of Engineering*. 2022. Vol. 35. Issue 9. Pp. 1795–1802. DOI: 10.5829/ije.2022.35.09c.16

65. Yun C.M., Rahman M.R., Kuok K.K., Chai A.P.S., Ding A.B.S., Bakri M.K.B. Glass waste as coarse aggregate filler replacement in concrete // *Waste Materials in Advanced Sustainable Concrete*. 2022. Pp. 25–44. DOI: 10.1007/978-3-030-98812-8_2

66. Agrawal Y., Gupta T., Sharma R.K. Strength and durability assessment of concrete containing dolomite quarry waste as fine aggregate // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2022. Vol. 24. Issue 1. Pp. 268–286. DOI: 10.1007/s10163-021-01318-0

67. Piro N.S., Mohammed A., Hamad S.M., Kurda R. Electrical resistivity-compressive strength predictions for normal strength concrete with waste steel slag as a coarse aggregate replacement using various analytical models // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 327. P. 127008. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127008

68. Abdullah D.J., Abbas Z.K., Abed S.K. Some properties of concrete containing waste brick as partial replacement of coarse aggregate and addition of nano brick powder // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 961. Issue 1. P. 012093. DOI: 10.1088/1755-1315/961/1/012093

69. Radhi M.M., Khalil W.I., Shafeeq S. Flexural behavior of sustainable reinforced concrete beams containing HDPE plastic waste as coarse aggregate // *Cogent Engineering*. 2022. Vol. 9. Issue 1. DOI: 10.1080/23311916.2022.2127470

70. Suksiripattanapong C., Phetprapai T., Singsang W., Phetchuay C., Thumrongvut J., Tabyang W. Utilization of recycled plastic waste in fiber reinforced concrete for eco-friendly footpath and pavement applications // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Issue 11. P. 6839. DOI: 10.3390/su14116839

71. Ghanem H., Chahal S., Khatib J., Elkordi A. Flexural behavior of concrete beams reinforced with recycled plastic mesh // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 12. P. 2085. DOI: 10.3390/buildings12122085

Поступила в редакцию 14 декабря 2022 г.

Принята в доработанном виде 4 апреля 2023 г.

Одобрена для публикации 19 апреля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Наджи Алаа Джалиль Наджи** — аспирант Инженерной академии департамента строительства; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-9156-6899; 1042215018@pfur.ru;

Эльшейх Ассер Мохамед — кандидат технических наук, доцент Инженерной академии департамента строительства; **Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; elsheykh_am@pfur.ru.

Вклад авторов:

Наджи А.Дж. — идея, сбор материала и обработка данных, написание статьи.

Эльшейх А.М. — доработка текста, научное редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 629.052.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.785-797

Моделирование процессов создания высокотехнологичной продукции строительного назначения

Галина Леонидовна Сафина¹, Денис Сергеевич Ершов²,
Алексей Сергеевич Корнев³, Рустам Зиннатуллович Хайруллин³

¹ Филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета в г. Мытищи (Филиал НИУ МГСУ в г. Мытищи); г. Мытищи, Россия;

² Московский политехнический университет (Московский политех); г. Москва, Россия;

³ Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации (ГНМЦ Минобороны России); г. Мытищи, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На современном этапе реализации Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года возникает необходимость управления уникальными инновационными проектами по созданию высокотехнологичной строительной продукции и изделий, по которым пока нет исторической ретроспективы и не накоплен опыт управления такими проектами: по разработке и созданию композитных материалов, металлопорошков для аддитивного производства, самовосстанавливающегося бетона и т.д. Поэтому проблема разработки математической модели создания высокотехнологичной продукции строительного назначения является актуальной.

Материалы и методы. При разработке модели применялись методы марковского и полумарковского моделирования систем и методы программно-целевого планирования, которые хорошо себя зарекомендовали при моделировании этапов жизненного цикла (ЖЦ) в процессе формирования высокотехнологичных и уникальных образцов техники специального назначения.

Результаты. Разработана модель изготовления высокотехнологичной продукции строительного назначения, позволяющая моделировать и управлять этапами ее ЖЦ. Приведены результаты численного моделирования. Результаты моделирования показали возможность эффективного управления ЖЦ производства высокотехнологичной продукции. Разработанная модель входит в состав научно-методического аппарата для сквозного моделирования основных этапов ЖЦ высокотехнологичной продукции строительного назначения. При этом в зависимости от конкретной решаемой задачи моделирование периодов ЖЦ может быть проведено с разным уровнем детализации с применением тех или иных моделей этапов ЖЦ. Для отдельных типов создаваемой продукции часть стадий ЖЦ может быть исключена из общей модели или, наоборот, добавлена в общую модель. Разработанная модель может служить средством получения дополнительных исходных данных с целью использования при выполнении информационного моделирования с помощью BIM-технологий.

Выводы. Представленная модель достаточно адекватно описывает реальные процессы разработки и создания продукции. Модель не требовательна к качеству и полноте исходных данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокотехнологичная продукция, инновационные строительные материалы и изделия, моделирование, программно-целевое планирование, жизненный цикл создания высокотехнологичной продукции строительного назначения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сафина Г.Л., Ершов Д.С., Корнев А.С., Хайруллин Р.З. Моделирование процессов создания высокотехнологичной продукции строительного назначения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С. 785–797. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.785-797

Автор, ответственный за переписку: Рустам Зиннатуллович Хайруллин, zrkzrk@list.ru.

Modelling of processes of creation of hi-tech construction products

Galina L. Safina¹, Denis S. Ershov², Aleksey S. Kornev³, Rustam Z. Khayrullin³

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

² Moscow polytechnical university; Moscow, Russian Federation;

³ Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation; Mytishchi, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. At the current stage of implementation of the Strategy for development of the construction industry and housing and communal services of the Russian Federation for the period till 2030 there is a need for management of unique innovation projects on creation of hi-tech construction products and products for which there is no historical retrospective and sufficient experience in management of such projects: development and creation of composite materials, metal powder for the additive manufacturing, self-healing concrete, etc. Therefore, the problem of developing a mathematical model for the creation of hi-tech building products is relevant.

Materials and methods. Working out the model, the methods of Markov and semi-Markov systems modelling and methods of programmed planning that have proven to be good at modelling the stages of the life cycle when creating high-tech and unique samples of special purpose machinery were applied.

Results. A model of creation of hi-tech building products, which allows to model and manage the stages of the product life cycle, has been developed. The results of numerical modelling are given. The results of the modelling have shown the possibility of effective management of the stages of the life cycle of high-tech products. The developed model is a part of scientific and methodical apparatus for end-to-end modelling of basic stages of life cycle of high-tech building production. In this case, depending on the specific problem to be solved, the modelling of individual stages of the life cycle can be carried out with different levels of detail using those or other models of life cycle stages. For certain types of created products, some of the life cycle stages may be excluded from the general model or, on the contrary, added to the general model. The model developed in the article can serve as a means of obtaining additional input data to be used for information modelling with the help of BIM technologies.

Conclusions. The developed model adequately enough describes real processes of product development and creation. The model is not demanding for quality and completeness of input data.

KEYWORDS: hi-tech products, innovative building materials and products, modelling, programme-target planning, life cycle of hi-tech building products creation

FOR CITATION: Safina G.L., Ershov D.S., Kornev A.S., Khayrullin R.Z. Modelling of processes of creation of hi-tech construction products. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):785-797. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.785-797 (rus.).

Corresponding author: Rustam Z. Khayrullin, zrkzrk@list.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленное и гражданское строительство входят в группу ключевых направлений экономического развития государства. Экономика в целом и строительная отрасль, в частности, несмотря на санкционное давление, сохранили рост. Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года призвана консолидировать усилия участников градостроительной деятельности и сферы ЖКХ. Стратегия является программным документом, характеризующим состояние строительного сектора, отраслей по производству строительных материалов и строительной техники и определяющим основные принципы, цели и задачи, приоритеты и направления государственной политики на среднесрочную и долгосрочную перспективы.

На современном этапе реализации Стратегии возникает необходимость управления уникальными инновационными проектами [1–6], в том числе по созданию высокотехнологичной строительной продукции и изделий (ВСПИ) [7–16], по которым еще нет исторической ретроспективы (не накоплен достаточный опыт управления проектами). В качестве примеров можно привести проекты по разработке и созданию композитных материалов, металлопорошков для аддитивного производства, самовосстанавливающегося бетона, стеклянной черепицы, смарт-стекла, токопроводящего бетона, гибкой керамической плитки, ряда перспективных теплоизоляционных материалов, измерительных систем, современной и перспек-

тивной контрольно-измерительной техники и т.д. Проблема разработки модели создания высокотехнологичной продукции строительного назначения является актуальной.

В статье с применением методов марковских и полумарковских систем [17–24] и методов программно-целевого планирования [25–27] приведена разработанная модель создания высокотехнологичной продукции, позволяющая моделировать наиболее важные этапы жизненного цикла (ЖЦ) [28, 29] ВСПИ, начиная от разработки научно-технического задания и заканчивая процессом эксплуатации, в том числе эксплуатации с проведением текущего и восстановительного ремонта.

Разработанная модель входит в состав научно-методического аппарата для сквозного моделирования основных этапов ЖЦ ВСПИ. При этом в зависимости от конкретной решаемой задачи моделирование отдельных этапов ЖЦ может быть выполнено с разным уровнем детализации или часть этапов возможно исключить из модели.

Полученные с помощью разработанной в статье модели данные о временных и технологических параметрах создания ВСПИ могут быть использованы при проведении информационного моделирования с помощью BIM-технологий [30, 31].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описание структуры ЖЦ ВСПИ

Жизненный цикл ВСПИ представим в виде последовательности следующих этапов: создание научно-технического задания (НТЗ), проведение научно-исследовательских работ (НИР), проведение

опытно-конструкторских работ (ОКР), производство (ПРО), эксплуатация (ЭКС). Отметим, что указанные этапы могут реализоваться с некоторым наложением, т.е. последующий этап ЖЦ может начинаться незадолго до окончания предыдущего этапа.

Анализ данных по разработке высокотехнологичной продукции показал, что суммарная продолжительность первых двух этапов составляет примерно 10–15 % продолжительности ЖЦ. Производственно-технологический процесс, включающий третий и четвертый этапы, составляет в среднем 20–30 % продолжительности ЖЦ. Процесс эксплуатации, являющийся, как правило, самым длительным этапом, составляет 60–70 % общей продолжительности ЖЦ.

Методический подход к описанию динамики этапов ЖЦ на основе дискретной полумарковской модели

Полумарковский процесс может быть описан графом $G(A, V, P)$, где множество узлов $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ определяет состояния процесса; множество дуг $V = \{V_{ij}\}_{mm}$ — направления переходов процесса из одного состояния в другое, где $V_{ij} = 1$, если переход $A_i \rightarrow A_j$ возможен, и $V_{ij} = 0$, если данный переход невозможен. Вероятности переходов в различные состояния задаются с помощью матрицы $\Pi(t) = \{\pi_{ij}(t)\}_{mm}$, где $\pi_{ij}(t) = P(V_{ij} = 1 | \tau_i < t)$ — условная вероятность перехода $A_i \rightarrow A_j$ за время t ; τ_i — случайное время пребывания процесса в состоянии A_i с известным законом распределения [17, 22].

Вероятности переходов удовлетворяют условию нормировки:

$$\sum_{j=1}^m \pi_{ij}(t) = 1, (i = 1, 2, \dots, m).$$

В качестве управляющих воздействий $u_i \in U$ могут быть использованы как детерминированные величины или функции (изменяющиеся во времени объемы ресурсов, выделяемые на разных этапах ЖЦ), так и случайные величины (момент начала или окончания некоторого этапа ЖЦ, момент начала или окончания выделения ресурса и т.д.).

Длительность ЖЦ ВСПИ равна сумме длительностей его этапов:

$$T_{\text{ЖЦ}} = \tau_{\text{НТЗ}} + \tau_{\text{НИР}} + \tau_{\text{ОКР}} + \tau_{\text{ПРО}} + \tau_{\text{ЭКС}}.$$

Длительности этапов ЖЦ, как правило, являются случайными величинами, поскольку процессы создания ВСПИ протекают при воздействии целого ряда случайных и неопределенных факторов.

Полумарковская модель процессов ЖЦ образцов ВСПИ при массовом производстве

Представим процесс в виде последовательности состояний (рис. 1).

Начальное состояние инновационного проекта определяется имеющимся на момент начала разработки НТЗ, а конечное состояние проекта — выводением из эксплуатации ВСПИ. Переходы в различные состояния осуществляются с вероятностями $\pi_{ij}(t)$ в дискретные моменты времени $t = 1, 2, \dots, T$.

Выпишем систему уравнений для вероятностей состояния процесса в соответствии с графом, изображенным на рис. 2:

$$\begin{aligned} P_{\text{НТЗ}}(t+1) &= (1 - \pi_{\text{НТЗ}}) P_{\text{НТЗ}}(T); \\ P_{\text{НИР}}(t+1) &= \pi_{\text{НТЗ}} P_{\text{НТЗ}}(T) + (1 - \pi_{\text{НИР}}) P_{\text{НИР}}(T); \\ P_{\text{ОКР}}(t+1) &= \pi_{\text{НИР}} P_{\text{НИР}}(T) + (1 - \pi_{\text{ОКР}}) P_{\text{ОКР}}(T); \\ P_{\text{ПРО}}(t+1) &= \pi_{\text{ОКР}} P_{\text{ОКР}}(T) + (1 - \pi_{\text{ПРО}}) P_{\text{ПРО}}(T); \\ P_{\text{ЭКС}}(t+1) &= \pi_{\text{ПРО}} P_{\text{ПРО}}(T) + (1 - \pi_{\text{ЭКС}}) P_{\text{ЭКС}}(T). \end{aligned} \quad (1)$$

При этом в каждый момент времени $t = 1, 2, \dots, T$ выполняется условие нормировки:

$$P_{\text{НТЗ}}(t) + P_{\text{НИР}}(t) + P_{\text{ОКР}}(t) + P_{\text{ПРО}}(t) + P_{\text{ЭКС}}(t) = 1. \quad (2)$$

Исходными данными модели являются начальные значения вероятностей состояний и условные вероятности переходов $\pi_{ij}(t)$.

Отметим, что описанная модель используется при моделировании процессов одновременной реализации нескольких проектов по созданию ВСПИ.

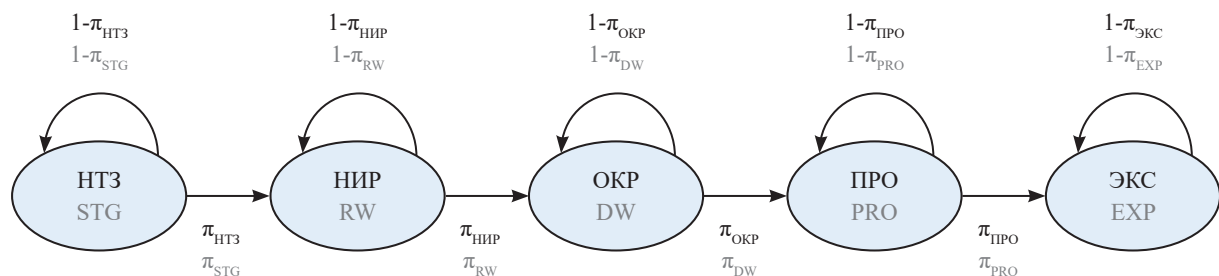


Рис. 1. Граф проектного процесса создания типовых образцов ВСПИ

Fig. 1. The count of design process of creation of typical samples of hi-tech building production and products

Полумарковская модель процессов ЖЦ при создании уникального единичного образца ВСПИ

Граф полумарковской модели приведен на рис. 2. Опишем основные положения этой модели:

1. Задаются шагом продолжительности равной одному году и задаются средним значением продолжительности этапов ЖЦ кратной одному году.
2. Каждый этап ЖЦ представляется в виде нескольких шагов основной части ЖЦ, одного шага завершающей части работ и нескольких шагов доработки.
3. На каждом этапе в процессе выполнения основных работ осуществляется переход к следующему шагу выполнения этапа с вероятностью 1. Переход от основной части к завершающей также осуществляется с вероятностью, равной 1.
4. Переходы от завершающей части этапов ЖЦ: НТЗ, НИР, ОКР, ПРО к основной части этапов последующих этапов ЖЦ: НИР, ОКР, ПРО, ЭКС проводятся с вероятностями: $\pi_{НТЗ}, \pi_{НИР}, \pi_{ОКР}, \pi_{ПРО}$, а переход от завершающей части этапа на доработку (без изменения этапа ЖЦ) — с вероятностями: $1-\pi_{НТЗ}, 1-\pi_{НИР}, 1-\pi_{ОКР}, 1-\pi_{ПРО}$ соответственно.
5. С каждого шага при доработке, за исключением последнего, осуществляется переход на очередной шаг следующего этапа ЖЦ с вероятностями: $\pi_{НТЗ}, \pi_{НИР}, \pi_{ОКР}, \pi_{ПРО}$, а переход от следующего шага доработки (без изменения этапа ЖЦ) — с вероятностями: $1-\pi_{НТЗ}, 1-\pi_{НИР}, 1-\pi_{ОКР}, 1-\pi_{ПРО}$.
6. Переход с последнего шага доработки на последний шаг следующего этапа ЖЦ осуществляется с вероятностью 1.
7. Продолжительность этапа эксплуатации выбирается так, чтобы при его завершении вероятность отличалась от 1-го на величину, не превосходящую $1-\gamma$, где $\gamma \approx 0,95-0,98$ — гарантированный уровень готовности.

Методический подход к описанию динамики ЖЦ на основе использования логистических функций

Типичная логистическая модель описывается следующим дифференциальным уравнением для вероятности готовности производимого продукта [17]:

$$\frac{dP}{dt} = \vartheta p(1-p), \quad p(0) = p_0, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

где ϑp — интенсивность (темпы) создания продукта; p_0 — начальный уровень готовности продукта, определяемый уровнем научно-технического и технологического задела.

Решение уравнения (3) имеет вид:

$$p(t) = \frac{p_0}{p_0 + (1-p_0) \cdot \exp\left(-\int_0^t \vartheta(\tau) d\tau\right)}. \quad (4)$$

При постоянном темпе создания продукта ($\vartheta = \text{const}$) уравнение (4) принимает более простой вид:

$$p(t) = \frac{p_0}{p_0 + (1-p_0) \cdot \exp(-\vartheta t)}. \quad (5)$$

Способы достижения гарантированного уровня готовности разработки ВСПИ

Задавая гарантированный уровень γ готовности ВСПИ: $P(t) = \gamma$ и используя выражение (5), можно рассчитать время готовности ВСПИ с заданным уровнем достоверности:

$$t_\gamma = -\frac{\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0}{\gamma(1-p_0)}\right)}{\vartheta}. \quad (6)$$

Также можно задать требуемое значение времени готовности продукта t_{need} и из (5) найти необходимый темп выполнения проектных работ:

$$\vartheta_\gamma = -\frac{\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0}{\gamma(1-p_0)}\right)}{t_{\text{need}}}. \quad (7)$$

Формулы (6), (7) позволяют вычислять время готовности и темп выполнения проектных работ, обеспечивающие гарантированное значение уровня готовности γ при разработке продукта.

Трансформация вариантов планирования этапов ЖЦ с применением логистической модели

Предположим, что процесс разработки ВСПИ изначально запланирован на отрезке времени $0 \leq t \leq T$ с постоянным плановым темпом производства $\vartheta_{\text{пл}}$. Тогда с вероятностью γ в соответствии с формулой (7):

$$T = \frac{-\left(\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0}{\gamma(1-p_0)}\right)\right)}{\vartheta_{\text{пл}}}.$$

Рассмотрим варианты трансформации первоначального плана, которые возникают при необходимости ускорения процесса создания ВСПИ или при недостаточности ресурсного обеспечения.

Первые три варианта трансформации реализуемы в случае достаточности ресурсного обеспечения. Первый вариант трансформации реализуем для производств, которые могут быть мгновенно перестроены от темпа $\vartheta_{\text{пл}}$ до некоторого значения ϑ^* , причем $a_0 > \vartheta_{\text{пл}}$. Примером такого вида производства может служить гибкая производственная система. Пусть в некоторый момент времени t^* , такой что $0 < t^* < T$, возникает необходимость ускорения производства с целью завершения процесса создания нового продукта к моменту времени T^* , причем $t^* < T^* < T$. Тогда трансформированный вариант плана создания продукта необходимо реализовывать

Научно-технический
задел
Scientific and technical
groundwork

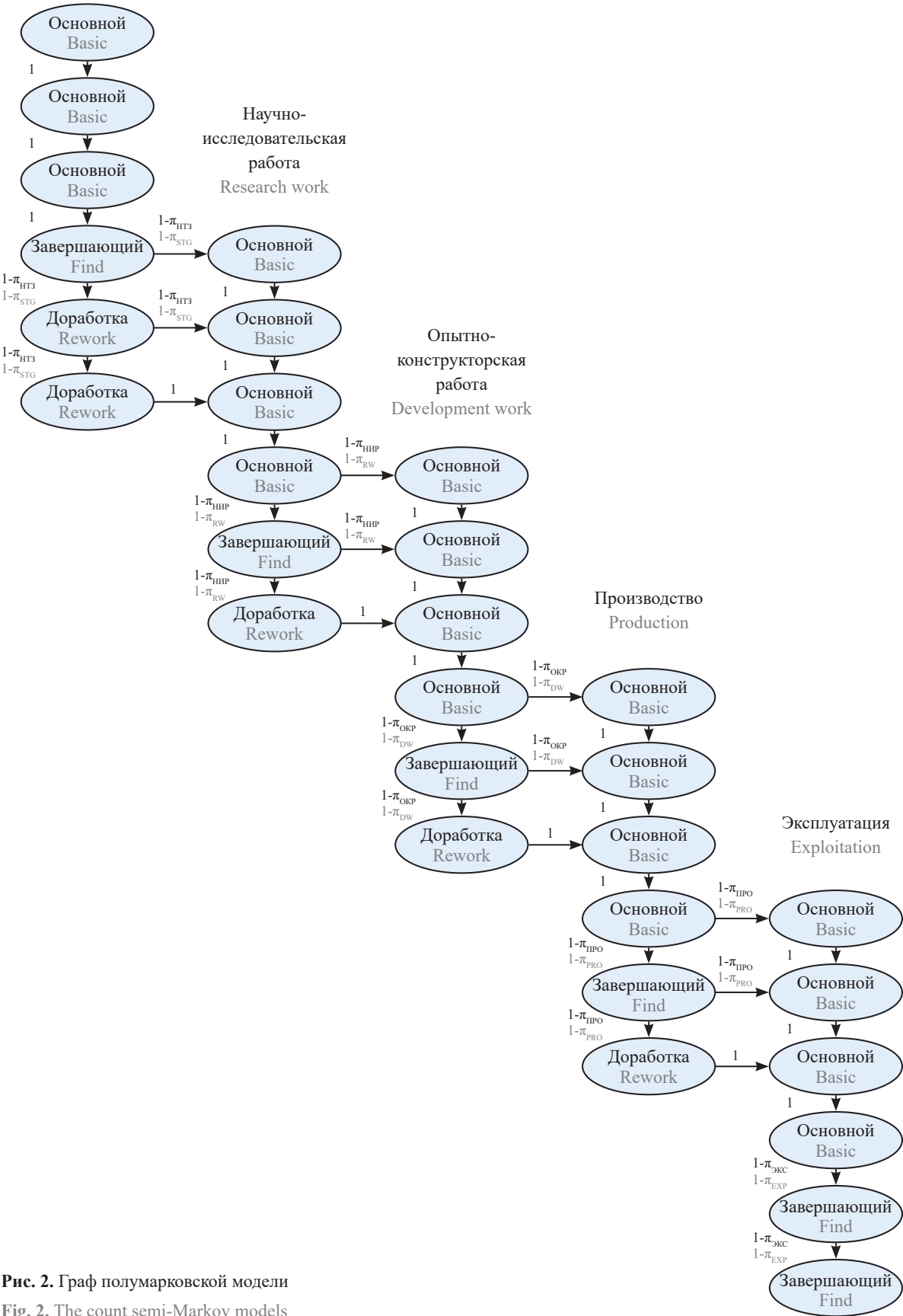


Рис. 2. Граф полумарковской модели
Fig. 2. The count semi-Markov models

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 5, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 5, 2023

на отрезке времени $t^* < t \leq T^*$ с более высоким темпом $\vartheta = a_0 > \vartheta_{\text{пл}}$, равным:

$$a_0 = \frac{-\left(\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0^*}{\gamma(1-p_0^*)}\right)\right)}{T^* - t^*},$$

где $p_0^* = p_0 / (p_0 + (1-p_0) \cdot \exp(-\vartheta \cdot t^*))$ — значение вероятности, достигнутой на момент времени $t = t^*$ при реализации первоначального плана создания продукта. При этом производственная функция будет иметь излом в момент времени $t = t^*$ (рис. 3, а).

Второй вариант трансформации может быть реализован в случае невозможности мгновенного изменения темпа производства. Предположим, что изменение темпа возможно по линейному закону: $\vartheta = \vartheta_{\text{пл}} + a_1(t - t^*)$ при $t^* < t \leq T^*$. Значение пара-

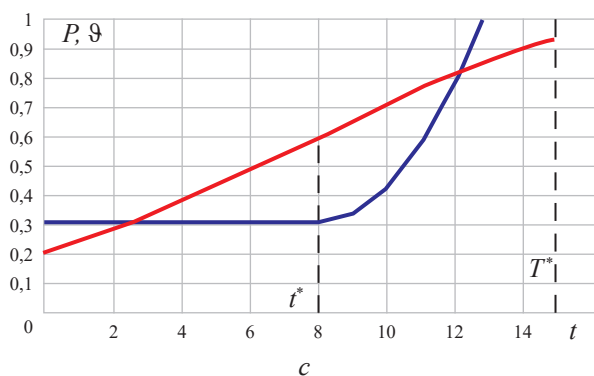
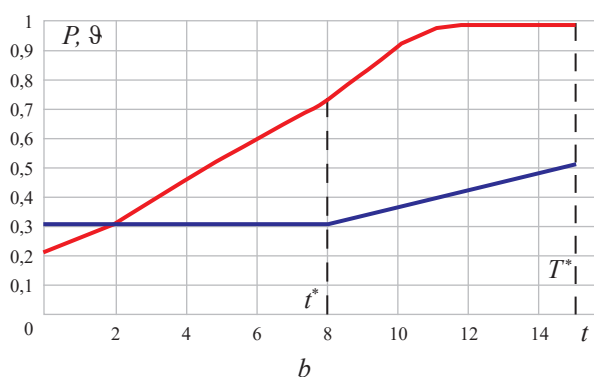
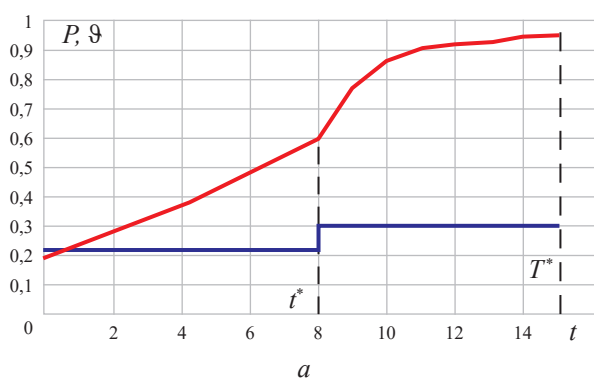


Рис. 3. Трансформация вариантов

Fig. 3. Transformation of variants

метра a_1 , обеспечивающее выполнение плана с вероятностью γ , равно:

$$a_1 = -2 \cdot \frac{\left(\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0^*}{\gamma(1-p_0^*)}\right) + \vartheta_{\text{пл}} T^*\right)}{(T^* - t^*)^2}.$$

При этом производственная функция уже не будет иметь излома в момент времени $t = t^*$, а темп производства еще будет иметь излом в точке $t = t^*$ (рис. 3, б).

Третий вариант трансформации может быть применен для инерционных непрерывных производств в случае невозможности «обеспечения излома» для функции темпа производства. Зададим изменение темпа производства с помощью гладкой функции — квадратической параболы: $\vartheta = \vartheta_{\text{пл}} + a_2(t - t^*)^2$ при $t^* < t \leq T^*$. Значение параметра a_2 , обеспечивающее выполнение плана с вероятностью γ , равно:

$$a_2 = -3 \cdot \frac{\left(\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0^*}{\gamma(1-p_0^*)}\right) + \vartheta_{\text{пл}} T^*\right)}{(T^* - t^*)^3}.$$

При этом и темп производства, и производственная функция будут в окрестности точки $t = t^*$ гладкими функциями (без изломов) (рис. 3, в).

Четвертый вариант трансформации первоначального плана возникает при недостаточности ресурсного обеспечения для его реализации в случае производств, которые могут быть мгновенно перестроены от темпа ϑ до ϑ^* . Предположим, что ресурса достаточно только для обеспечения интенсивности, равной ϑ^* , причем $0 < \vartheta^* < \vartheta_{\text{пл}}$. Тогда оценка новой продолжительности T^* создания продукта с вероятностью γ имеет вид:

$$T^* = \frac{\left(\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0^*}{\gamma(1-p_0^*)}\right)\right)}{\vartheta^*},$$

где $T^* > T$; $p_0^* = p_0 / (p_0 + (1-p_0) \cdot \exp(-\vartheta_{\text{пл}} \cdot t^*))$ — значение вероятности, достигнутой на момент времени $t = t^*$ при реализации первоначального плана создания продукта.

Методический подход к моделированию процесса создания ВСПИ с помощью производственной функции

В качестве альтернативного подхода по отношению к описанному в разделах 5–7 может быть использован подход, основанный на применении производственной функции Кобба – Дугласа [32]:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_N) = K_{KD} x_1^{\chi_1} x_2^{\chi_2} \dots x_N^{\chi_N},$$

где x_1, x_2, \dots, x_N — объемы затрат ресурсов; $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ — объем «выпускаемой продукции», причем $\chi_1 + \chi_2 + \dots + \chi_N \leq 1$, $\chi_n \geq 0$, $n = 1, 2, \dots, N$; $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_N$ и $K_{KD} \geq 0$ — производственно-технологические

коэффициенты, характеризующие производственный процесс. В простейшем случае объемы затрат ресурсов определены на декартовом произведении:

$$\mathbf{X} = [0; X_1] \cdot [0; X_2] \cdot \dots \cdot [0; X_N],$$

где $0 \leq x_n \leq X_n$, $n = 1, 2, \dots, N$. Проведем нормирование стандартной функции Коба – Дугласа [28]. Обозначим $M = \max f(x_1, x_2, \dots, x_N)$. Тогда нормированная функция

$$\tilde{f}(x_1, x_2, \dots, x_N) = \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_N)}{M}$$

будет принимать значения $0 \leq \tilde{f}(x_1, x_2, \dots, x_N) \leq 1$, и после задания законов изменения объемов затрат в виде монотонно неубывающих функций времени: $x_n = \psi_n(t)$ нормированная функция $\tilde{f}(x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t))$ может быть интерпретирована как вероятность $p(t)$ выполнения этапа ЖЦ при создании ВСПИ. После такой интерпретации могут быть численно реализованы способы достижения гарантированного уровня готовности γ , аналогичные описанным в разделе 6, и методы трансформации вариантов планирования этапов ЖЦ, аналогичные описанным в разделе 7.

Методика моделирования процесса эксплуатации изделий с учетом проведения текущего и восстановительного ремонтов

Под действием потока отказов с интенсивностью $\lambda(t)$ в процессе эксплуатации некоторые образцы изделия с определенной вероятностью $p(t)$ переходят в неисправное состояние и подлежат текущему ремонту. Текущий ремонт (ТР) выполняется специалистами-ремонтниками с привлечением специалистов сервисного центра или специалистов предприятия-изготовителя. При ТР возвращается только работоспособность изделия, т.е. происходит компенсация действия потока внезапных отказов.

Однако с течением времени интенсивность отказов непрерывно увеличивается, что связано со старением и деградиационными процессами [21], протекающими в узлах и механизмах изделия. В простейших случаях используется линейная зависимость интенсивности потока постепенных отказов от времени: $\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha t$, где λ_0 — интенсивность внезапных отказов изделия; α — скорость нарастания интенсивности постепенных отказов.

Параметры интенсивности постепенных отказов λ_0 и α зависят от условий и режимов эксплуатации и, как правило, могут быть рассчитаны по паспортным характеристикам изделия, таким как средняя наработка до отказа в различных условиях и режимах эксплуатации.

В целях профилактики и снижения действия постепенных отказов периодически проводится восстановительный ремонт (ВР), который предназначен для устранения причин, вызывающих постепенные отказы. Он включает диагностику технического состояния, профилактические замены составных

частей, регулировочные и наладочные работы. ВР осуществляется силами сервисных центров предприятий-изготовителей, при этом восстановление высокотехнологичного изделия осуществляется до максимального уровня его готовности.

Методика определения целесообразности продолжения эксплуатации ВСПИ

Восстановление технического состояния и готовности высокотехнологичного изделия к применению требует соответствующих затрат материальных ресурсов. В качестве критерия целесообразности проведения ремонта и продолжения эксплуатации [17] может служить превышение затрат на ремонт и эксплуатацию в течение последующих двух-трех лет над затратами на создание нового образца ВСПИ с более прогрессивными характеристиками.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты применения модели процессов ЖЦ типовых образцов ВСПИ

На рис. 4 представлены зависимости вероятностей реализации этапов проекта от времени при заданных значениях вероятностей переходов: $\pi_{НТЗ}(t) = 0,8$; $\pi_{ННР}(t) = 0,7$; $\pi_{ОКР}(t) = 0,65$; $\pi_{ПРО}(t) = 0,5$; $\pi_{ЭКС}(t) = 0$ и начальных значениях вероятностей состояний: $P_{НТЗ}(0) = 0,5$; $P_{ННР}(0) = 0,15$; $P_{ОКР}(0) = 0,15$; $P_{ПРО}(0) = 0,15$; $P_{ЭКС}(0) = 0,05$.

Эти параметры характеризуют уровень НТЗ и производственно-технологических возможностей для реализации проекта. Итоговая функция $P_{ЭКС}(t)$ характеризует вероятность реализации проекта к моменту времени t .

Из рисунка видно, что за время $T = 10$ лет проект реализуется практически достоверно ($P_{ЭКС}(10) = 0,98$).

Модель описывает динамику этапов ЖЦ при массовой разработке ВСПИ. Модель показывает в каждый момент времени объемы выполняемых работ по соответствующим этапам ЖЦ.

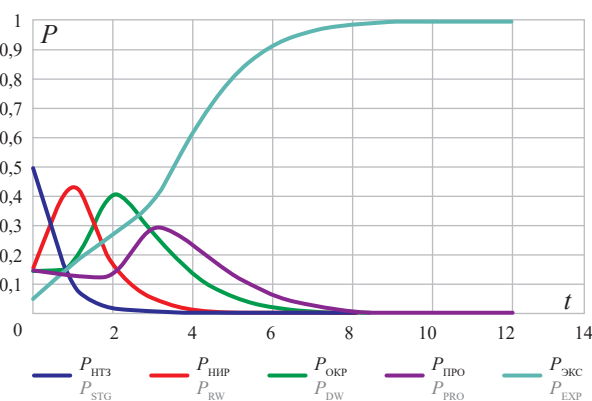


Рис. 4. Динамика вероятностей реализации этапов проекта

Fig. 4. Dynamics of probabilities of realization of project stages

Отметим, что по своему виду функция $P_{\text{экс}}(t)$ напоминает логистическую функцию, которая широко используется в качестве моделей рабочих процессов в экономике, строительстве и производстве [3]. Модели, основанные на использовании логистической функции, будут описаны ниже.

Результаты применения полумарковской модели процессов ЖЦ уникального единичного образца изделия

На рис. 5 представлены зависимости вероятностей этапов ЖЦ от времени.

При реализации этапов ЖЦ обычно происходит «некоторое наложение» конца предыдущего этапа и начала следующего этапа (последующий этап начинается немного раньше, чем завершается предыдущий). Итоговая функция $P_{\text{экс}}(t)$ характеризует вероятность реализации проекта к моменту времени t . Из приведенного рисунка видно, что за время $T = 17$ лет проект реализуется практически достоверно и начинается процесс эксплуатации $P(T) > \gamma$.

Отметим, что по своему виду функция $P_{\text{экс}}(t)$ на отрезке времени эксплуатации напоминает логистическую функцию, которая широко используется в качестве моделей рабочих процессов в экономике, строительстве и производстве [17, 32].

Результаты моделирования с помощью логистической функции

На рис. 6 приведены графики вероятности готовности ВСПИ с постоянным темпом производства $\vartheta = 0,5$ 1/год, но с разными начальными уровнями готовности $p(0) = p_0$ (5).

Очевидно, что при увеличении начального уровня готовности продукта логистическая функция быстрее стремится к своему предельному значению.

Опишем динамику выполнения проектных работ в зависимости от стратегии ресурсного обеспе-

чения. В работе [20] исследованы основные стратегии ресурсного обеспечения. Предположим, что темп $\vartheta(t)$ создания образца ВСПИ пропорционален ресурсному обеспечению $S(t)$. Ресурсное обеспечение может быть постоянным по времени или, например, линейно нарастать по времени в процессе выполнения отдельного этапа проекта:

$$S(t) = S_0 + S_1 t,$$

где $S_0 > 0$ и $S_1 > 0$. На рис. 7 показаны графики логистических функций готовности при разработке ВСПИ для различных стратегий ресурсного обеспечения: $S(t) = S_1 = \text{const}$ и $S(t) = S_0 + S_1 t$, $S_0 = \text{const}$, $S_1 = \text{const}$.

Видно, что если ресурсное обеспечение возрастает с течением времени, то уровень готовности растет быстрее, чем в случае постоянства ресурсного обеспечения.

Результаты последовательного моделирования этапов ЖЦ с применением логистической модели

Результаты последовательного моделирования этапов ЖЦ с применением логистической модели для каждого этапа ЖЦ представлены на рис. 8. Предполагалось, что очередной этап ЖЦ начинается за три месяца до окончания предыдущего этапа ЖЦ.

Видно, что продолжительности этапов ЖЦ составляют: $t_{\text{нтз}} = 3$ года, $t_{\text{нпр}} = 3$ года, $t_{\text{окр}} = 2$ года и $t_{\text{про}} = 3,5$ года. Процесс производства начинается через 8 лет, а процесс эксплуатации — через 13,5 лет.

Достоинством логистической модели является сочетание ее простоты и достаточной адекватности реальным процессам, а также минимальные требования к наличию исходных данных, необходимых для практической реализации.

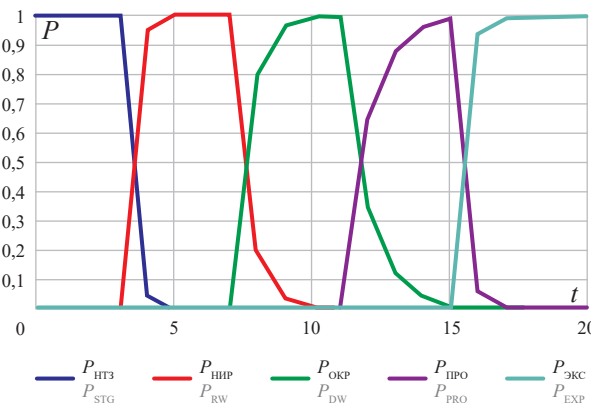


Рис. 5. Динамика вероятностей реализации этапов проекта по разработке уникального единичного образца ВСПИ

Fig. 5. Dynamics of probabilities of realization of project stages on working out of the unique individual sample of hi-tech building production and products

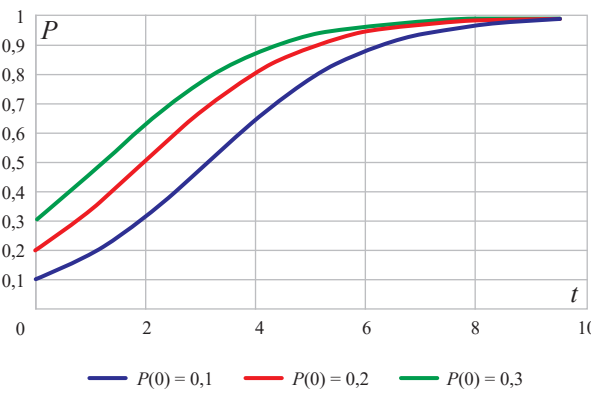


Рис. 6. Логистические функции готовности продукта с разными начальными значениями уровней готовности

Fig. 6. Logistical functions of readiness of a product with different initial values of levels of readiness

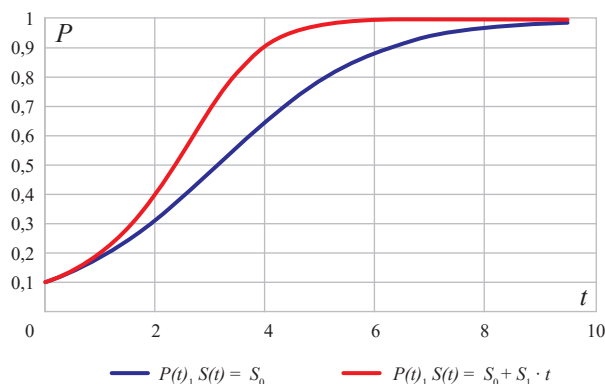


Рис. 7. Логистические функции готовности продукта при разных законах ресурсного обеспечения

Fig. 7. Logistical functions of readiness of a product at different laws of resource maintenance

Результаты моделирования процесса эксплуатации изделий с учетом проведения текущего и восстановительного ремонтов

В процессе эксплуатации изделия из ВСПИ происходит постепенное снижение уровня готовности изделия в силу воздействия различных деструктивных факторов (износа и отказов составных частей и механизмов, повреждений). Интенсивность таких воздействий со временем увеличивается и наступает момент достижения предельного срока эксплуатации, после чего изделие снимается со снабжения и направляется на утилизацию. Предельный срок эксплуатации в среднем составляет 15–20 лет. Он устанавливается в процессе разработки изделия и контролируется изготовителем в течение времени его эксплуатации.

На рис. 9 показана динамика коэффициента готовности K_A и средней готовности $K_A^{(сред)}$ образца ВСПИ в процессе эксплуатации с проведением ВР.

Отметим, что существуют оптимальные значения межремонтных интервалов [17, 21], которые

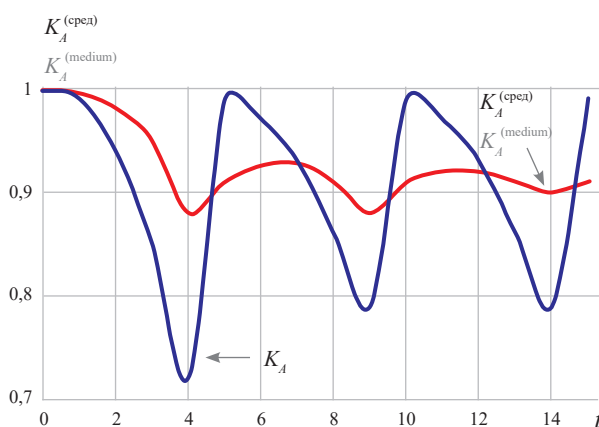


Рис. 9. Динамика коэффициента готовности образца ВСПИ к применению

Fig. 9. Dynamics of factor of readiness of the sample of hi-tech building production and products to application

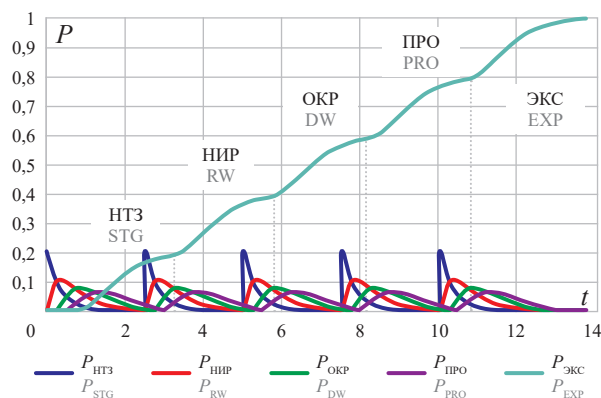


Рис. 8. Моделирования этапов ЖЦ с помощью логистической функции

Fig. 8. Modelling of life cycle stages by means of logistical function

обеспечивают в среднем максимальное значение коэффициента готовности ВСПИ при ограниченном ресурсном обеспечении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная модель входит в состав научно-методического аппарата для сквозного моделирования основных этапов ЖЦ ВСПИ. При этом в зависимости от конкретной решаемой задачи моделирование может быть проведено с разным уровнем детализации того или другого этапа ЖЦ.

Представленная модель достаточно хорошо себя зарекомендовала. В настоящее время эта модель эффективно применяется при формировании долгосрочных и среднесрочных программ развития парка специальной техники [21, 25]. Достоинством предлагаемой математической модели создания ВСПИ является сочетание ее простоты и высокой адекватности реальным процессам, а также минимальная требовательность к исходным данным, необходимым для их реализации.

Приведенная в статье полумарковская модель этапов ЖЦ может быть использована для моделирования и анализа динамики выполнения проектных работ по созданию сложных технических систем, средств метрологического обеспечения специальной техники и другой высокотехнологической продукции.

Данная модель не учитывает процессы старения (деградации) ВСПИ. В случае необходимости моделирования процесса долгосрочной эксплуатации, при котором проявляются эффекты старения, в представленной в статье модели предусмотрена возможность интеграции с моделями деградации и старения [21].

Возможность деления каждого этапа ЖЦ в модели на несколько частей позволяет настроить модель с учетом реальной продолжительности каждого этапа ЖЦ.

Предусмотренная в модели возможность управления темпом производства дает возможность настроить модель для учета как производств с длительным технологическим циклом, так и производств, обладающих возможностью быстрой переналадки и перенастройки.

Разработана модель создания высокотехнологичной продукции строительного назначения, включающая основные этапы ЖЦ: разработку научно-технического задания, проведение научно-исследовательских работ, проведение опытно-конструкторских работ, производство и эксплуа-

тацию. С помощью модели можно моделировать общие закономерности этапов ЖЦ, она нетребовательна к качеству используемых исходных данных. Поэтому ее в первую очередь необходимо применять при моделировании создания продукции и изделий, по разработке и технологии производства которых еще в недостаточной степени накоплен статистический материал. Результаты моделирования показывают высокую адекватность разработанной модели реальным процессам создания высокотехнологичной строительной продукции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Глазкова В.В. Теоретические аспекты инновационного развития единых теплоснабжающих организаций в условиях перехода на новый энергетический уклад // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 8. С. 1073–1084. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1073-1084
2. Савоскина Е.В., Солопова Н.А., Акри Е.П., Домнина С.В. Анализ инновационных механизмов решения жилищных проблем в Российской Федерации // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 8. С. 1096–1112. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1096-1112
3. Бакрунов Ю.О., Васильева Е.Ю. Внедрение инновационных технологий в управление строительной и специальной техникой // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 6. С. 813–822. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.813-822
4. Король Е.А., Шушунова Н.С. Использование инновационных технологий устройства стеновых покрытий с модульными системами озеленения // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 7. С. 912–925. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.912-925
5. Kumar R., Vilochani P.G.P., Kanhthinisha S., Patil O., Cerdas F., Sangwan K.S. et al. Live life cycle assessment implementation using cyber physical production system framework for 3D printed products // Procedia CIRP. 2022. Vol. 105. Pp. 284–289. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.047
6. Vallero D.A., Brasier C. Sustainable design. John Wiley & Sons, Inc, 2008. DOI: 10.1002/9780470259603
7. Гладких В.А., Королев Е.В., Хусид Д.Л. Стойкость сероасфальтобетонов к образованию коллен // Вестник МГСУ. 2016. № 12. С. 70–78. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.70-78
8. Mio A., Fermaglia M. Multiscale modelling techniques in Life Cycle Assessment: application to product design // Procedia CIRP. 2022. Vol. 105. Pp. 688–693. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.115
9. Ruan S., Unluer C. Influence of mix design on the carbonation, mechanical properties and microstructure of reactive MgO cement-based concrete // Cement and Concrete Composites. 2017. Vol. 80. Pp. 104–114. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.03.004
10. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. Pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
11. Luo X.J. Retrofitting existing office buildings towards life-cycle net-zero energy and carbon // Sustainable Cities and Society. 2022. Vol. 83. P. 103956. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103956
12. Ekolu S.O. A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 127. Pp. 306–320. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.056
13. Possan E., Thomaz W.A., Aleandri G.A., Felix E.F., C.P. dos Santos A. CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study // Case Studies in Construction Materials. 2017. Vol. 6. Pp. 147–161. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.01.007
14. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. Pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
15. Ershov D.S., Malahov A.V., Levina T.A., Khayrullin R.Z. Model of operation of computer measuring system // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2388. Issue 1. P. 012040. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012040
16. Ershov D.S., Malahov A.V., Levina T.A., Khayrullin R.Z. To simulating the functioning of workplace for the verification of measuring instruments // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2388. Issue 1. P. 012147. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012147
17. Буравлев А.И., Еланцев Г.А. Вероятностные модели управления жизненным циклом вооружения и военной техники // Вооружение и экономика. 2021. № 3 (57). С. 45–65.

18. Буренок В.М. Проблемы создания системы управления полным жизненным циклом вооружения, военной и специальной техники // Вооружение и экономика. 2014. № 2 (27). С. 4–9.

19. Клочков В.В., Дутов А.В. Модель управления прикладными исследованиями и разработками в наукоемкой промышленности // Экономический анализ: теория и практика. 2012. № 35 (290). С. 9–17.

20. Буравлев А.И. Модели управления ресурсным обеспечением проектов создания высокотехнологичной продукции // Вооружение и экономика. 2019. № 4 (50). С. 62–71.

21. Хайруллин Р.З. Оптимизация процессов эксплуатации и обновления парка измерительной техники // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 28–34. DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-8-28-34

22. Королюк В.С. Стохастические модели систем. Киев : Наукова думка, 1989. 203 с.

23. Wei W., Xu W., Liu J. Stochastic P-bifurcation analysis of a class of nonlinear Markov jump systems under combined harmonic and random excitations // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2021. Vol. 582. P. 126246. DOI: 10.1016/j.physa.2021.126246

24. Temraz N.S.Y. Comparison of fuzzy semi-Markov models for one unit with mixed standby units with and without preventive maintenance using regenerative point method // Heliyon. 2021. Vol. 7. Issue 8. P. e07717. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07717

25. Брезгин В.С. и др. Методология программно-целевого планирования развития системы вооружения на современном этапе. М.: Граница, 2013. 519 с.

26. Ershov D.S., Levina T.A., Adylina A.P., Grozovsky G.I., Parfenyeva I.E. The simulation of the process of operation of installations of the highest ac-

curacy for reproduction and transmission of units of physical quantities // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2373. Issue 8. P. 082003. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/8/082003

27. Ершов Д.С., Хайруллин Р.З. Математическая модель рабочего места поверки средств измерений как нестационарная система обслуживания // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т. 65. № 10. С. 701–711. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-701-711

28. Telizhenko A., Lukianykhin V., Kuzmenko S., Lukianykhina E., Shevchenko T., Vishnitskaya E. et al. Concept of integrated waste management as recoverable resources in product cycle // Journal of Environmental Science & Engineering. 2012. Vol. 1. Issue 3. Pp. 312–323.

29. Matokhina A.V., Kizim A.V., Skvaznikov D.E., Aleshkevich A.A., Malikov V.P., Kravchenko D.A. Development of the intelligent platform of technical systems modernization at different stages of the life cycle // Procedia Computer Science. 2017. Pp. 913–918. DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.118

30. Morsi D.M.A., Ismaeel W.S.E., Ehab A., Othman A.A.E. BIM-based life cycle assessment for different structural system scenarios of a residential building // Ain Shams Engineering Journal. 2022. Vol. 13. Issue 6. P. 101802. DOI: 10.1016/j.asej.2022.101802

31. Rad M.A.H., Jalaei F., Golpour A., Varzande S.S.H., Guest G. BIM-based approach to conduct Life Cycle Cost Analysis of resilient buildings at the conceptual stage // Automation in Construction. 2021. Vol. 123. P. 103480. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103480

32. Замков О.О., Толстомятенко А.В., Черемных Ю.Н. Математические методы в экономике : учебник. М. : Дело и сервис, 1998. 368 с.

Поступила в редакцию 30 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 27 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 19 апреля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Галина Леонидовна Сафина — кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой фундаментального образования; Филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета в г. Мытищи (Филиал НИУ МГСУ в г. Мытищи); 141006, г. Мытищи, Олимпийский пр-т, д. 50; РИНЦ ID: 715001, Scopus: 57192380329, ResearcherID: AAC-4507-2022, ORCID: 0000-0001-9409-1174; safinagl@mgsu.ru;

Денис Сергеевич Ершов — кандидат технических наук, доцент кафедры стандартизации, метрологии и сертификации; Московский политехнический университет (Московский политех); 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38; РИНЦ ID: 988665, Scopus: 57866408900, ResearcherID: GQZ-5837-2022, ORCID: 0000-0003-4763-9891; ershov.metrolog@mail.ru;

Алексей Сергеевич Корнев — кандидат технических наук, начальник лаборатории, 12 отдел; Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации (ГНМЦ Минобороны России); 141006, г. Мытищи, ул. Комарова, д. 13; РИНЦ ID: 1036981, ORCID: 0000-0002-2445-6323; lexkcorban@yandex.ru;

Рустам Зиннатulloвич Хайруллин — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, 12 отдел; Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации (ГНМЦ Минобороны России); 141006, г. Мытищи, ул. Комарова, д. 13; РИНЦ ID: 4036, Scopus: 57192376351, ResearcherID: AVG-5589-2021, ORCID: 0000-0002-0596-4955; zrkzrk@list.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Glazkova V.V. Theoretical aspects of innovative development of unified heat supply organizations in the conditions of transition to a new energy system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(8):1073-1084. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1073-1084 (rus.).
2. Savoskina E.V., Solopova N.A., Akri E.P., Domnina S.V. Analysis of innovative mechanisms for solving housing problems in the Russian Federation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(8):1096-1112. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1096-1112 (rus.).
3. Bakrunov Yu.O., Vasilyeva E.Yu. Implementation of innovative technologies in control of the construction and special equipment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):813-822. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.813-822 (rus.).
4. Korol E.A., Shushunova N.S. Use of innovative technologies of wall covering devices with modular greening systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(7):912-925. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.912-925 (rus.).
5. Kumar R., Vilochani P.G.P., Kahnthinisha S., Patil O., Cerdas F., Sangwan K.S. et al. Live life cycle assessment implementation using cyber physical production system framework for 3D printed products. *Procedia CIRP*. 2022; 105:284-289. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.047
6. Vallero D.A., Brasier C. *Sustainable Design*. John Wiley & Sons, Inc, 2008. DOI: 10.1002/9780470259603
7. Gladkikh V.A., Korolev E.V., Khusid D.L. Resistance of sulphur-extended asphalt to rutting. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2016; 12:70-78. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.70-78 (rus.).
8. Mio A., Fermeglia M. Multiscale modelling techniques in Life Cycle Assessment: application to product design. *Procedia CIRP*. 2022; 105:688-693. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.115
9. Ruan S., Unluer C. Influence of mix design on the carbonation, mechanical properties and micro-structure of reactive MgO cement-based concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2017; 80:104-114. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.03.004
10. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 114:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
11. Luo X.J. Retrofitting existing office buildings towards life-cycle net-zero energy and carbon. *Sustainable Cities and Society*. 2022; 83:103956. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103956
12. Ekol S.O. A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; 127:306-320. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.056
13. Possan E., Thomaz W.A., Aleandri G.A., Felix E.F., C.P. dos Santos A. CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study. *Case Studies in Construction Materials*. 2017; 6:147-161. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.01.007
14. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 114:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
15. Ershov D.S., Malahov A.V., Levina T.A., Khayrullin R.Z. Model of operation of computer measuring system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022; 2388(1):012040. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012040
16. Ershov D.S., Malahov A.V., Levina T.A., Khayrullin R.Z. To simulating the functioning of workplace for the verification of measuring instruments. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022; 2388(1):012147. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012147
17. Buravlev A.I., Elantsev G.A. Probabilistic life cycle management models of weapon and military equipment. *Arms and Economy*. 2021; 3(57):45-65. (rus.).
18. Burenok V.M. Problems of the management system of the weapons entire lifecycle. *Arms and Economy*. 2014; 2(27):4-9. (rus.).
19. Klochkov V.V., Dutov A.V. Model of management of applied researches and workings out in the high technology industry. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2012; 35(290):9-17. (rus.).
20. Buravlev A.I. Model of high-tech product creation projects resource supply management. *Arms and Economy*. 2019; 4(50):62-71. (rus.).
21. Khayrullin R.Z. On optimizing operation and updating processes of measuring equipment fleet. *Measurement Techniques*. 2022; 8:28-34. DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-8-28-34 (rus.).
22. Koroljuk V.S. *Stochastic models of systems*. Kyiv, Naukova Dumka, 1989; 203. (rus.).
23. Wei W., Xu W., Liu J. Stochastic P-bifurcation analysis of a class of nonlinear Markov jump systems under combined harmonic and random excitations. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2021; 582:126246. DOI: 10.1016/j.physa.2021.126246
24. Temraz N.S.Y. Comparison of fuzzy semi-Markov models for one unit with mixed standby units with and without preventive maintenance using regenerative point method. *Heliyon*. 2021; 7(8):e07717. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07717

25. Brezgin V.S. et al. *Methodology of programmno-target planning of development of system of arms at the present stage*. Moscow, Border, 2013; 519. (rus.).
26. Ershov D.S., Levina T.A., Adylina A.P., Grozovsky G.I., Parfenyeva I.E. The simulation of the process of operation of installations of the highest accuracy for reproduction and transmission of units of physical quantities. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022; 2373(8):082003. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/8/082003
27. Ershov D.S., Khayrullin R.Z. Mathematical model of the workplace of measuring instruments verification as a non-stationary service system. *Journal of Instrument Engineering*. 2022; 65(10):701-711. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-701-711 (rus.).
28. Telizhenko A., Lukianykhin V., Kuzmenko S., Lukianykhina E., Shevchenko T., Vishnitskaya E. et al. Concept of integrated waste management as recoverable resources in product cycle. *Journal of Environmental Science & Engineering*. 2012; 1(3):312-323
29. Matokhina A.V., Kizim A.V., Skvaznikov D.E., Aleshkevich A.A., Malikov V.P., Kravchenko D.A. Development of the intelligent platform of technical systems modernization at different stages of the life cycle. *Procedia Computer Science*. 2017; 913-918. DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.118
30. Morsi D.M.A., Ismaeel W.S.E., Ehab A., Othman A.A.E. BIM-based life cycle assessment for different structural system scenarios of a residential building. *Ain Shams Engineering Journal*. 2022; 13(6):101802. DOI: 10.1016/j.asej.2022.101802
31. Rad M.A.H., Jalaei F., Golpour A., Varzande S.S.H., Guest G. BIM-based approach to conduct Life Cycle Cost Analysis of resilient buildings at the conceptual stage. *Automation in Construction*. 2021; 123:103480. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103480
32. Zamkov O.O., Tolstopiatenko A.V., Cheremnykh Yu.N. *Mathematical methods in economics : textbook*. Moscow, Business and service, 1998; 368. (rus.).

Received January 30, 2023.

Adopted in revised form on March 27, 2023.

Approved for publication on April 19, 2023.

B I O N O T E S : **Galina L. Safina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Fundamental Education; **Branch of the Moscow State University of Civil Engineering in Mytishchi (Branch of the National Research University) (MGSU) in Mytishchi**; 50 Olimpiyskiy prospect, Mytishchi, 141006, Russian Federation; ID RSCI: 715001, Scopus: 57192380329, ResearcherID: AAC-4507-2022, ORCID: 0000-0001-9409-1174; safinagl@mgisu.ru;

Denis S. Ershov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Standardization, Metrology and Certification; **Moscow polytechnical university**; 38 Big Semyonovsky st., Moscow, 107023, Russian Federation; ID RSCI: 988665, Scopus: 57866408900, ResearcherID: GQZ-5837-2022, ORCID: 0000-0003-4763-9891; ershov.metrolog@mail.ru;

Aleksey S. Kornev — Candidate of Technical Sciences, Head of the laboratory, 12th Department; **Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation**; 13 Komarova st., Mytishchi, 141006, Russian Federation; ID RSCI: 1036981, ORCID: 0000-0002-2445-6323; lexkorban@yandex.ru;

Rustam Z. Khayrullin — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher, 12th Department; **Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation**; 13 Komarova st., Mytishchi, 141006, Russian Federation; ID RSCI: 4036, Scopus: 57192376351, ResearcherID: AVG-5589-2021, ORCID: 0000-0002-0596-4955; zrkzrk@list.ru.

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

Authors declare absence of the conflict of interests.

Развитие государственно-частного партнерства на основе концессий в сфере теплоснабжения

Валерия Викторовна Глазкова¹, Екатерина Геннадьевна Господарик²

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

² Белорусский государственный университет (БГУ); г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Снижение эффективности функционирования сферы теплоснабжения, вызванное высокой степенью износа основных производственных фондов, создает необходимость модернизации отрасли, что требует привлечения значительного объема инвестиционных ресурсов. Одним из эффективных инструментов, способствующих данному процессу, является государственно-частное партнерство (ГЧП), которое включает положительные моменты как для органов государственной и муниципальной власти, так и для представителей бизнеса.

Материалы и методы. Теоретической и методологической основой послужили работы отечественных авторов по вопросам осуществления капиталовложений в развитие теплоснабжения. Применялись методы теоретического исследования с целью анализа практики реализации проектов по модернизации теплоснабжения с использованием ГЧП, моделирования этапов осуществления концессионных соглашений, а также методы эмпирического исследования в части сравнения форм взаимодействия государства и бизнеса в вопросах совместной реализации проектов по развитию и модернизации теплоснабжения.

Результаты. Изучение профессиональных мнений российских исследователей по вопросу недостаточной эффективности реализации ГЧП в сфере жилищно-коммунального хозяйства и энергетики, включая теплоснабжение, дало возможность сформировать перечень проблемных областей с тем, чтобы выделить направления их решения.

Выводы. Представленные успешно реализованные кейсы по модернизации систем теплоснабжения в регионах России, которые были выполнены за счет концессионных соглашений между представителями власти и бизнеса, позволили подтвердить тезис о том, что концессия является одной из оптимальных форм реализации ГЧП в сфере теплоснабжения. Согласно перспективным оценкам Национального центра ГЧП, уже к 2024 г. может быть запущено около 130 ГЧП-проектов в сфере ЖКХ и теплоэнергетики, а в стоимостном выражении объем инвестиций может превысить 230 млрд руб.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: государственно-частное партнерство, концессия, концессионное соглашение, теплоснабжение, модернизация системы теплоснабжения, теплоэнергетика, жилищно-коммунальное хозяйство

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глазкова В.В., Господарик Е.Г. Развитие государственно-частного партнерства на основе концессий в сфере теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С. 798–807. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.798-807

Автор, ответственный за переписку: Валерия Викторовна Глазкова, leram86@mail.ru.

Development of public-private collaboration on the basis of heat supply concessions

Valeria V. Glazkova¹, Catherine G. Gospodarik²

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

² Belarusian State University (BSU); Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. The decrease in the efficiency of the heat supply industry, caused by a high degree of deterioration of the main production assets, creates the necessity to modernize the sphere, which requires the involvement of a significant amount of investment resources. One of the effective tools contributing to this process is public-private partnership (PPP), which includes positive aspects both for state and municipal authorities as well as for business representatives.

Materials and methods. Theoretical and methodological basis of the study was provided by the works of domestic researchers on the implementation of capital investments in the development of heat supply. Methods of theoretical research were used to analyze the practice of implementation of projects to modernize the heat supply using PPP, modeling stages of the concession agreements, as well as methods of empirical research in terms of comparing the forms of interaction between government and business in the joint implementation of projects for the development and modernization of the heat supply.

Results. The study of professional opinions of Russian researchers on the issue of insufficient effectiveness of the implementation of the public-private partnership instrument in the field of housing and communal services and energy, including heat supply, has enabled the formation of a list of problem areas in order to identify areas for their solutions.

Conclusions. The presented successfully implemented cases of modernization of heat supply systems in the Russian regions, which have been implemented through concession agreements between the authorities and business representatives, allowed to confirm the thesis that the concession is one of the best forms of PPP implementation in the field of heat supply. According to the prospective estimates of the National PPP Centre, about 130 PPP projects in the housing and utilities sector may be launched already by 2024, and the value of investments may exceed RUR 230 billion.

KEYWORDS: public-private partnership, concession, concession agreement, heating supply, modernization of the heat supply system, heat power engineering, housing and communal services

FOR CITATION: Glazkova V.V., Gospodarik C.G. Development of public-private collaboration on the basis of heat supply concessions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):798-807. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.798-807 (rus.).

Corresponding authors: Valeria V. Glazkova, leram86@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Многие исследователи отмечают, что снижение эффективности функционирования отрасли теплоснабжения России за последние два десятилетия связано с большими потерями в системах теплоснабжения, которые в первую очередь обусловлены физической и моральной изношенностью основных производственных фондов (рис. 1) [1, 2].

Высокий износ инфраструктуры теплоснабжения (рис. 2) определяет необходимость больших капиталовложений в отрасль, что в условиях ограниченности бюджетных средств невозможно осуществить без повышения ее инвестиционной привлекательности.

По данным Министерства энергетики Российской Федерации, для эффективного развития теплоснабжения в нашей стране в ближайшие 5–10 лет объем инвестиций в отрасль должен составлять не менее 7,5 трлн руб. [4]. На текущий момент недоинвестирование теплоснабжения приводит к низкой эффективности его производственной мощности, а также усугублению проблемы изношенности и ава-

рийности его инфраструктуры, кроме того, служит барьером для модернизации теплоснабжения [5].

Одним из эффективных инструментов, способствующих привлечению инвестиций для модернизации теплоснабжения, является государственно-частное партнерство (ГЧП). По мнению В.В. Казинцева и других исследователей (И.Г. Гавриленко, Т.М. Хакимов [3]), механизм ГЧП для органов государственной и муниципальной власти полезен в части преодоления ограниченных возможностей государственного и муниципального аппарата управления, включая экономию средств на проработку проекта в случае инициирования его частной стороной, а также использования управленческих навыков, компетенций и опыта частного сектора в решении проблемных вопросов [6, 7].

Реализация инвестиционных проектов (ИП) в рамках ГЧП имеет плюсы не только для государства, но и для бизнеса: это в первую очередь доступный способ получить государственное и муниципальное имущество, а также возможность выйти на новые рынки, традиционно занимаемые государством.

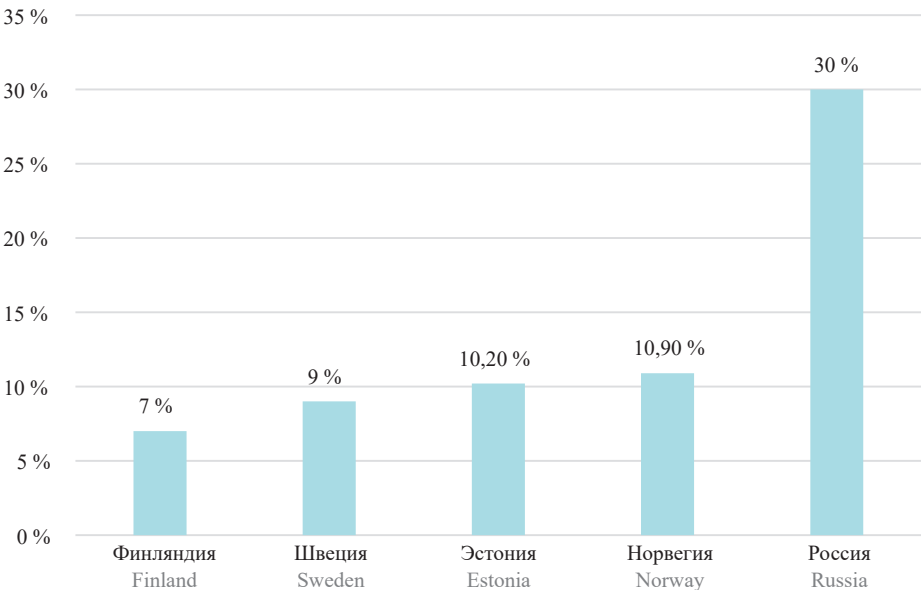


Рис. 1. Доля потерь в общем объеме произведенной тепловой энергии по состоянию на 2018 г. (рисунок составлен автором на основе работы И.Г. Гавриленко, Т.М. Хакимова [3])

Fig. 1. The share of losses in the total volume of thermal energy produced as of 2018 (compiled by the author based on the work of I.G. Gavrilenko, T.M. Khakimov [3])

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 5, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 5, 2023



Рис. 2. Доля тепловых и паровых сетей, нуждающихся в замене, а также ветхих и замененных сетей в РФ за период 2004–2020 гг., % (рисунок составлен автором на основе данных Росстата)

Fig. 2. The share of heat and steam networks in need of replacement, as well as dilapidated and replaced networks in the Russian Federation for the period 2004–2020, % (compiled by the author on the basis of Rosstat data)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящее время сложилась довольно обширная практика ГЧП, в соответствии с которой ГЧП может принимать различные формы: концессионного соглашения, соглашения о ГЧП, заключение контракта жизненного цикла, инвестиционного договора, энергосервисного контракта, договора офсетной закупки, специального инвестиционного контракта и др. [8]. Как отмечает в своей работе М.В. Ткаченко, из общего объема проектов ГЧП, принятых в последние годы, наибольшее количество реализуется

именно в сфере коммунальной инфраструктуры [9]. По результатам исследования Национального центра ГЧП на коммунальный сектор приходится около 80 % ГЧП-проектов, реализуемых на территории нашей страны, общий объем инвестиций в которые составляет почти 680 млрд руб., и более 90 % из которых (620 млрд руб.) — это частные средства (рис. 3). Наибольшую долю среди проектов ГЧП в коммунальном секторе занимают проекты теплоснабжения (45,74 % по объему инвестиций и 54,4 % по количеству реализуемых проектов в общем

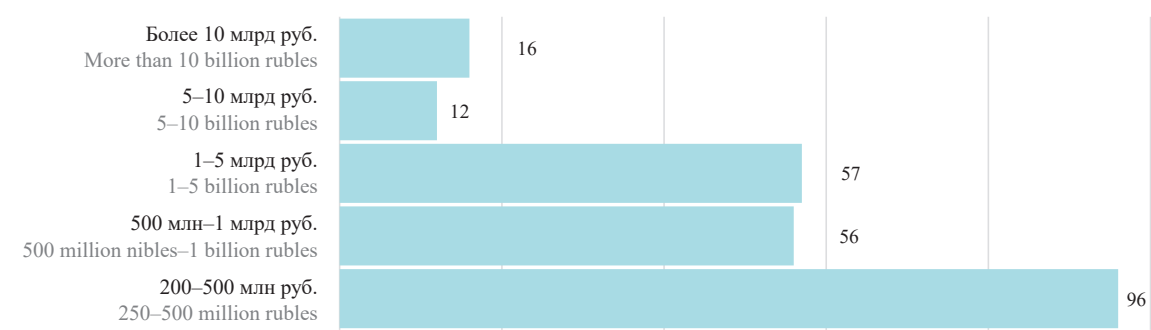


Рис. 3. Распределение крупных проектов ГЧП в коммунальной сфере по капиталоемкости по состоянию на 2022 г. (составлен автором по материалам исследования Национального центра ГЧП [10])

Fig. 3. Distribution of large PPP projects in the municipal sector of capital intensity as of 2022 (compiled by the author based on the research of the National PPP Center [10])

объеме инвестиций и проектов ГЧП соответственно), а также водоснабжения и водоотведения (49,36 % по объему инвестиций и 39,77 % по количеству реализуемых проектов в общем объеме инвестиций и проектов ГЧП соответственно), незначительная часть приходится на газоснабжение (0,04 % по объему инвестиций и 0,34 % по количеству реализуемых проектов в общем объеме инвестиций и проектов ГЧП соответственно) (рис. 4, 5).

Выбор формы сотрудничества в рамках реализации проектов ГЧП в сфере энергетики вызывает дискуссию: исследователь И. Блохина убеждена, что эффективным инструментом развития ГЧП в сфере энергетики являются инфраструктурные облигации, позволяющие в большем объеме привлекать инвестиционные средства консервативных инвесторов. По мнению П. Шевченко, при создании механизма ГЧП в области энергетики нужно учитывать тот факт,



Рис. 4. Объем инвестиций в реализуемые проекты по отраслям по состоянию на 2022 г. (составлен автором по материалам исследования Национального центра ГЧП [10])

Fig. 4. The volume of investments in ongoing projects by industry as of 2022 (compiled by the author based on the research of the National PPP Center [10])

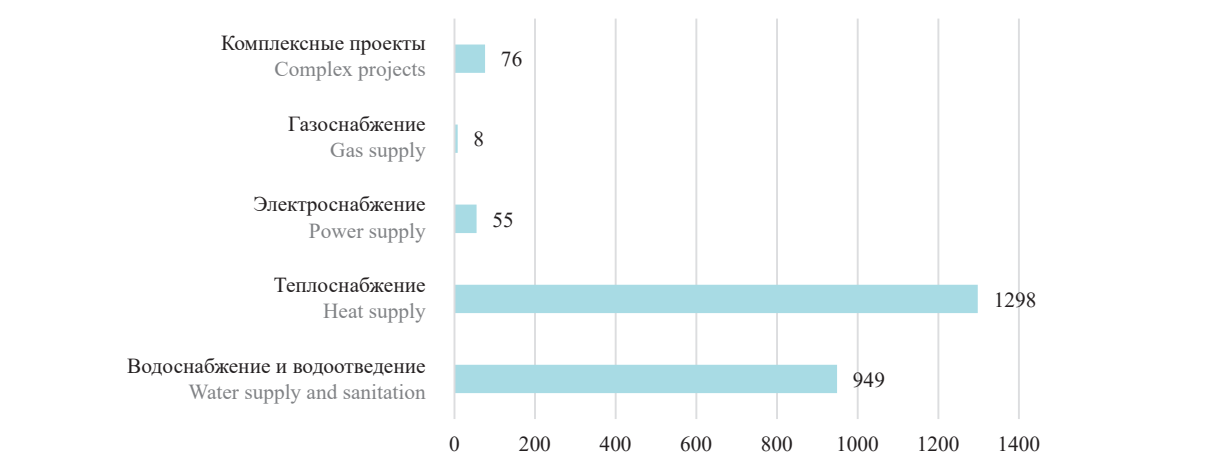


Рис. 5. Количество реализуемых проектов по отраслям по состоянию на 2022 г. (составлен автором по материалам исследования Национального центра ГЧП [10])

Fig. 5. Number of implemented projects by industry as of 2022 (compiled by the author based on the research of the National PPP Center [10])

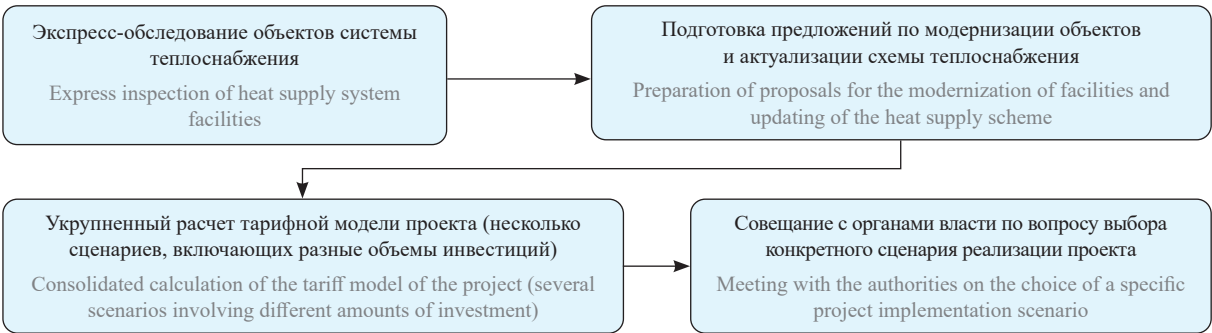


Рис. 6. Последовательность шагов предварительного этапа проекта модернизации теплоснабжения в соответствии с концессионным соглашением (составлен автором по материалам О.В. Устинова [13])

Fig. 6. The sequence of steps of the preliminary stage of the heat supply modernization project in accordance with the concession agreement (compiled by the author based on the materials of O.V. Ustinov [13])

что большая часть активов в этой сфере приватизирована. Д. Селькин, с чьим мнением сходятся многие эксперты, считает, что концессионные механизмы в энергетике были бы наиболее удачными [11, 12]. О.В. Устинова утверждает [13], что наибольшую популярность среди методов ГЧП приобрели концессионные соглашения, содержание которых целесообразно раскрыть далее в работе. И.Г. Гавриленко и Т.М. Хакимов также отмечают, что мировой опыт показал, что концессия, как одна из форм ГЧП, получила наибольшую популярность для привлечения инвестиций в ЖКХ, она дает возможность с большей вероятностью согласовать интересы всех участников проекта, а кроме того, потребителей жилищно-коммунальных

услуг (ЖКУ), позволяет привлекать частные инвестиции в ЖКХ и развивать соответствующие отрасли [3].

Процесс подготовки и реализации ИП в сфере теплоснабжения в соответствии с концессионным соглашением представлен тремя основными этапами — предварительным, подготовительным и реализационным.

Предварительный этап, детализация которого представлена на рис. 6, необходим для подготовки предложений по модернизации и развитию объекта теплоснабжения, которые будут приняты за основу ИП.

Подготовительный этап, детализация которого показана на рис. 7, предусматривает конкретную разработку шагов по предстоящей реализации про-



Рис. 7. Последовательность шагов подготовительного этапа проекта модернизации теплоснабжения в соответствии с концессионным соглашением (составлен автором по материалам О.В. Устинова [13])

Fig. 7. The sequence of steps of the preparatory stage of the heat supply modernization project in accordance with the concession agreement (compiled by the author based on the materials of O.V. Ustinov [13])

екта и согласование каждого из них с государственным партнером.

Реализационный этап концессионного соглашения по развитию и модернизации теплоснабжения предусматривает подачу частной инициативы, подготовленную на предыдущем этапе, и переход к непосредственной реализации проекта, особенности которой зависят от специфики и содержания проекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стоит заметить, что на практике рынок коммунальных ГЧП-проектов сталкивается с рядом трудностей. Изучение экономической и управленческой литературы в этом аспекте позволило сформировать перечень проблемных областей, сопровождающих реализацию проектов ГЧП в сфере ЖКХ и теплоэнергетики (табл.).

Перечень проблемных областей при реализации ГЧП в сфере ЖКХ и теплоэнергетики (составлена автором)

List of problem areas in the implementation of PPP in the field of housing and communal services and heat power (compiled by the author)

Источник информации Source of information	Перечень проблемных областей List of problem areas
Национальный центр ГЧП [10] National PPP Center [10]	<ul style="list-style-type: none">• отсутствие законодательных критериев отбора потенциальных концессионеров, что создает низкие входные барьеры для участников;• в случае отсутствия на момент принятия инвестиционной программы утвержденных в установленном порядке схем теплоснабжения на территории невозможно включить их в инвестиционную программу;• низкое качество технического обследования со стороны частной стороны ввиду того, что затраты на него в рамках концессионного соглашения не возмещаются• lack of legislative criteria for the selection of potential concessionaires, which creates low entry barriers for participants;• if there are no heat supply schemes approved in accordance with the established procedure in the territory at the time of adoption of the investment program, it is impossible to include them in the investment program;• poor quality of technical inspection by the private party due to the fact that the costs of it under the concession agreement are not reimbursed
О.В. Устинов [13] O.V. Ustinov [13]	<p>Со стороны концессионера возникают следующие проблемы:</p> <ul style="list-style-type: none">• частые проблемы с оформлением муниципального имущества, так как объекты оказываются незарегистрированными в реестре муниципального имущества, а фактически существуют;• в ходе передачи муниципального имущества приходится решать вопросы с просроченной задолженностью хозяйствующих субъектов, расположенных на данной территории, что увеличивает затраты частной стороны;• необходимость повышения тарифа в рамках концессионного соглашения приводит к тарифным последствиям для концессионера;• не существует базы потенциально привлекательных и надежных инвесторов, которых можно привлечь как потенциальных концессионеров, что осложняет процесс выбора;• уровень собираемости платежей за ЖКУ существенно влияет на финансовую модель проекта — зачастую уровень неплатежей населения создает большой риск для ее успешной реализации;• отсутствие органа муниципальной власти, работающего с концессионерами по принципу «единого окна» <p>The following problems arise on the part of the concessionaire:</p> <ul style="list-style-type: none">• frequent problems with registration of municipal property, as objects are unregistered in the register of municipal property, but actually exist;• during the transfer of municipal property, it is necessary to resolve issues with overdue debts of economic entities located in this territory, which increases the costs of the private party;• the need to increase the tariff within the framework of the concession agreement leads to tariff consequences for the concessionaire;• there is no base of potentially attractive and reliable investors who can be attracted as potential concessionaires, which complicates the selection process;• the level of collection of payments for housing and communal services significantly affects the financial model of the project — often the level of non-payments of the population creates a great risk for its successful implementation;• the absence of a municipal authority working with concessionaires on the principle of a “single window”

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 5, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 5, 2023

И.Г. Гавриленко и Т.М. Хакимов [3] I.G. Gavrilenko and T.M. Khakimov [3]	<ul style="list-style-type: none">• проблемные области в определении объекта концессионного соглашения, его состава и описания;• высокие инвестиционные риски, вызванные уровнем собираемости платежей, а также жесткой тарифной политикой со стороны государства;• отсутствие в ряде случаев необходимых для реализации концессионных соглашений компетенций у муниципалитетов;• ограниченный доступ к инвестициям• problem areas in determining the object of the concession agreement, its composition and description;• high investment risks caused by the level of collection of payments, as well as a strict tariff policy on the part of the state;• in some cases, municipalities lack the competencies necessary for the implementation of concession agreements;• limited access to investments
---	--

Помимо перечисленных в таблице проблемных областей при реализации ГЧП в сфере ЖКХ и теплоэнергетики, стоит добавить вопросы, связанные с санкционными рисками, удорожанием строительных материалов и необходимостью замены импортного оборудования и технологий [14–16]. Однако основные проблемные моменты сосредоточились в области регулирования концессионных соглашений, так как большая часть правовых ограничений развития сферы связана с пробелами в Законе о концессионных соглашениях¹ (далее — Закон), мероприятиями по утверждению и реализации инвестиционной программы. Для их решения с 1 января 2022 г. вступили в силу поправки в данный Закон, которые должны способствовать повышению эффективности рассматриваемой формы ГЧП.

Кроме поправок в Закон в качестве направлений решения, перечисленных в таблице проблемных областей, целесообразно рассмотреть следующие:

1. Сформировать механизм справедливого распределения рисками между участниками соглашения и закрепить гарантии окупаемости инвестиционных вложений для инвестора.
2. Частной стороне необходимо обращать внимание на проекты, в рамках которых сформирован и опубликован перечень муниципальных объектов, которые планируются к передаче в концессию, следует изучить опыт заключенных в регионе или муниципалитете концессионных соглашений, действующие программы налоговых льгот, уровень текущего тарифа, рейтинг активности региона в сфере ГЧП, учитывать текущий уровень собираемости платежей и закладывать в финансовую модель кассовые разрывы, связанные со стартом проекта [17, 18].

Несмотря на указанные проблемы, возникающие в ходе реализации проектов ГЧП, практика осуществления данных проектов в сфере ЖКХ и теплоэнергетики показывает, что вопросы совершенствования этой формы взаимодействия бизнеса

и государства решаются. Одним из примеров крупного проекта ГЧП по модернизации системы теплоснабжения является модернизация системы теплоснабжения в Можайском районе Московской области, которая была совместно реализована Правительством Московской области и ПАО «Ростелеком» в 2017–2018 гг.: общий объем инвестиций в проект составил 0,76 млрд руб., в ходе выполнения работ было модернизировано и построено в общей сложности 42 котельные. Администрация г. Перми в рамках трехстороннего концессионного соглашения с органом исполнительной власти Пермской области и частной энергетической компанией заключила договор на развитие системы теплоснабжения города на 25 лет. Положительный опыт в этом вопросе, в рамках которого с 2019 г. по концессии модернизированы 16 котельных в г. Перми, на втором этапе с 2022 г. позволил заключить концессионный контракт на сумму 28 млрд руб., по которому планируется реконструировать и модернизировать более 50 % тепловых сетей города. В Ханты-Мансийском автономном округе — Югра также более 10 лет успешно реализуются проекты на базе концессионного соглашения в теплоснабжении. Для реализации данной инициативы в регионе был создан центр компетенций по инвестициям и управлению проектами в сфере энергосбережения и повышения энергоэффективности в жилищно-коммунальном секторе — АО «Сберэнергосервис-ЮГРА». Одним из значимых результатов реализации концессионных соглашений в рамках рассматриваемого примера служит сокращение на 25 % затрат на производство тепловой энергии из-за возможности использования современного оборудования в модернизированных и вновь построенных котельных [19, 20].

Рассмотрение практических кейсов реализации концессионных соглашений для развития и модернизации теплоснабжения позволяет сформулировать общую схему реализации концессии в теплоснабжении (рис. 8).

¹ О концессионных соглашениях : Федеральный закон от 21.07.2005 № 115-ФЗ (в последней редакции).

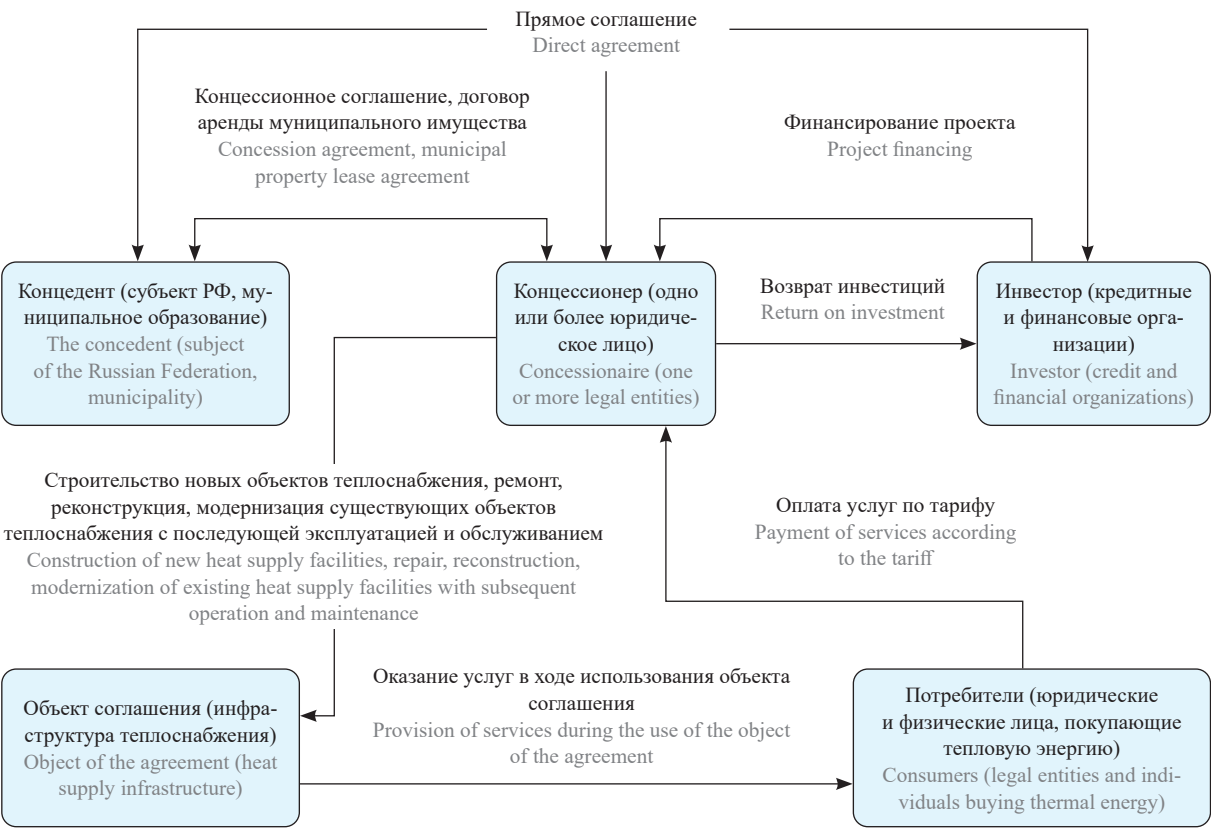


Рис. 8. Общая схема реализации концессии в теплоснабжении (составлен автором на основе открытой информации о реализованных концессионных соглашениях в теплоснабжении в субъектах и муниципалитетах РФ)

Fig. 8. The general scheme of the implementation of the concession in heat supply (compiled by the author on the basis of open information about the implemented concession agreements in heat supply in the subjects and municipalities of the Russian Federation)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в рамках исследования успешные кейсы реализации концессионных соглашений подтверждают тезис о том, что это функционирующая на практике форма реализации государственно-частного партнерства в сфере теплоснабжения. Несмотря на сдерживающие развитие ГЧП в коммунальной сфере проблемные области, следует отметить, что работа по их устранению ведется. Согласно перспективным оценкам Национального центра ГЧП, уже к 2024 г. может быть запущено около 130 ГЧП-проектов в сфере ЖКХ и теплоэнергетики, а в стоимостном выражении объем

инвестиций может превысить 230 млрд руб. На текущий момент государство также активно стимулирует развитие ГЧП в коммунальной сфере, обеспечивая работу основных инструментов финансовой поддержки, включая субсидии Фонда ЖКХ, займы Фонда ЖКХ из средств Фонда национального благосостояния, инфраструктурные облигации с поручительством ДОМ.РФ, инфраструктурные бюджетные кредиты субъектам РФ и др. [10]. Эти инструменты должны способствовать развитию ГЧП в сфере коммунального хозяйства, в том числе содействовать модернизации отечественной сферы теплоснабжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Verstina N., Evseev E., Tsuverkalova O., Kulachinskaya A. The technical state of engineering systems as an important factor of heat supply organizations management in modern conditions // Energies. 2022. Vol. 15. Issue 3. P. 1015. DOI: 10.3390/en15031015
2. Verstina N., Evseev E., Tsuverkalova O. Strategic planning of construction and reconstruction of the facilities of the heat supply systems with the use

of scenario approach // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. Issue 2. P. 05028. DOI: 10.1051/e3s-conf/202126305028
3. Гавриленко И.Г., Хакимов Т.М. Государственно-частное партнерство как инструмент повышения инвестиционной привлекательности жилищно-коммунального хозяйства // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: экономика.

2019. № 4 (30). С. 116–127. DOI: 10.17122/2541-8904-2019-4-30-116-127

4. Кравченко В.М. О реформе теплоснабжения в Российской Федерации // Презентация Министерства энергетики Российской Федерации. 2017.

5. Цуверкалова О.Ф. Анализ современного состояния и тенденций развития отрасли теплоснабжения в РФ // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2020. № 11–3. С. 554–559. DOI: 10.17513/vaael.1462

6. Astratova G.V., Rutkauskas T.K., Rutkauskas K.V., Klimuk V.V. Creating an environmentally safe and reliable heat supply system through the introduction of energy-saving technologies in housing and common utilities services // E3S Web of Conferences. 2021. P. 04020. DOI: 10.1051/e3sconf/202126504020

7. Казинцев В.В. Модернизация объектов теплоснабжения путем создания государственно-частного партнерства // Новости теплоснабжения. 2012. № 10 (146).

8. Yurieva T.V., Beliakova Y.M. Public-private partnership projects as a tool for the development of social infrastructure // Project Management Development — Practice and Perspectives : conference proceedings. 2020. Pp. 7–20.

9. Ткаченко М.В. Рынок проектов ГЧП сегодня. Российская неделя ГЧП : VI Инфраструктурный конгресс. М., 2019.

10. Развитие коммунальной инфраструктуры городов. Партнерство государства и бизнеса // Национальный центр ГЧП. М., 2022. 44 с.

11. Panteleeva M., Surnov D., Senchukov D. Conceptual model assessing complex the public-private partnership projects effectiveness // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 05026. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305026

12. Beliakova M.Y., Yurieva T.V. Public-private partnership projects as a tool for developing social infrastructure // PM World Journal. 2020. Vol. 9. Issue 10.

13. Устинов О.В. Практика реализации и перспективы развития проектов государственно-частного партнерства в сфере теплоснабжения // СОК. 2019. № 8. С. 48–55.

14. Kuchkovskaya N.V., Zabaikin Yu.V., Baisaeva M.U., Kosareva I.A., Calesci M. Risk assessment regarding the implementation of public-private partnership projects in the world practice // Space and Culture, India. 2019. Vol. 7. Issue 2. Pp. 89–100. DOI: 10.20896/saci.v7i2.458

15. Moiseenko N. Specifics of applying mechanisms of public-private partnership when selecting investment projects // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 239. P. 08022. DOI: 10.1051/mateconf/201823908022

16. Терентьева А.С. Анализ основных проблем централизованного теплоснабжения в России на современном этапе // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2020. № 18. С. 253–273. DOI: 10.47711/2076-318-2020-253-273

17. Dolla T., Laishram B. Enhancing sustainability in public-private partnership projects through bid selection model // Transportation Research Procedia. 2020. Vol. 48. Pp. 3896–3907. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.031

18. Elwakil E., Hegab M. Priority model for public-private partnership investment in energy projects // 2018 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). 2018. DOI: 10.1109/SusTech.2018.8671372

19. Erastov A., Novikova O. Practical application of integrated assessment methods as a tool for business analysis in the development of innovative energy saving // Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019: Education Excellence and Innovation Management through Vision. 2019. Pp. 8753–8761.

20. Усиевич В.А., Каменюк Л.И. Государственно-частное партнерство в теплоснабжении // Новости теплоснабжения. 2016. № 4 (188).

Поступила в редакцию 11 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 12 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2023 г.

Об авторах: Валерия Викторовна Глазкова — 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: 888163, Scopus: 57194442650, ResearcherID: ABI-2788-2020, ORCID: 0000-0002-5995-8585; leram86@mail.ru;

Екатерина Геннадьевна Господарик — кандидат экономических наук, доцент, заведующая кафедрой аналитической экономики и эконометрики; Белорусский государственный университет (БГУ); 220030, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, д. 4; РИНЦ ID: 952376, ORCID: 0000-0002-5593-7728; eggospodarik@fa.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Verstina N., Evseev E., Tsuverkalova O., Kulachinskaya A. The technical state of engineering systems as an important factor of heat supply organizations management in modern conditions. *Energies*. 2022; 15(3):1015. DOI: 10.3390/en15031015
2. Verstina N., Evseev E., Tsuverkalova O. Strategic planning of construction and reconstruction of the facilities of the heat supply systems with the use of scenario approach. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263(2):05028. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305028
3. Gavrilenko I.G., Khakimov T.M. State-private partnership as a tool for increasing investment attractiveness of housing and communal services. *USNTU Bulletin. Science, education, economics. Economics series*. 2019; 4(30):116-127. DOI: 10.17122/2541-8904-2019-4-30-116-127 (rus.).
4. Kravchenko V.M. On the reform of heat supply in the Russian Federation. *Presentation of the Ministry of Energy of the Russian Federation*. 2017. (rus.).
5. Tsuverkalova O.F. Analysis of the current state and trends of development of the heat supply industry in the Russian Federation. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2020; 11-3:554-559. DOI: 10.17513/vael.1462 (rus.).
6. Astratova G.V., Rutkauskas T.K., Rutkauskas K.V., Klimuk V.V. Creating an environmentally safe and reliable heat supply system through the introduction of energy-saving technologies in housing and common utilities services. *E3S Web of Conferences*. 2021; 04020. DOI: 10.1051/e3sconf/202126504020
7. Kazintsev V.V. Modernization of heat supply facilities by creating a public-private partnership. *Heat Supply News*. 2012; 10(146). (rus.).
8. Yurieva T.V., Beliakova Y.M. Public-private partnership projects as a tool for the development of social infrastructure. *Project Management Development — Practice and Perspectives : conference proceedings*. 2020; 7-20.
9. Tkachenko M.V. *The market of PPP projects today*. Russian PPP Week: VI Infrastructure Congress. Moscow, 2019. (rus.).
10. Development of municipal infrastructure of cities. Partnership of the state and business. *National Center for Public-Private Partnerships*. Moscow, 2022; 44. (rus.).
11. Panteleeva M., Surnov D., Senchukov D. Conceptual model assessing complex the public-private partnership projects effectiveness. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:05026. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305026
12. Beliakova M.Y., Yurieva T.V. Public-private partnership projects as a tool for developing social infrastructure. *PM World Journal*. 2020; 9(10).
13. Ustinov O.V. The practice of implementation and prospects for the development of public-private partnership projects in the field of heat supply. *Plumbing, Heating and Air Conditioning*. 2019; 8:48-55. (rus.).
14. Kuchkovskaya N.V., Zabaikin Yu.V., Baisaeva M.U., Kosareva I.A., Calesci M. Risk assessment regarding the implementation of public-private partnership projects in the world practice. *Space and Culture, India*. 2019; 7(2):89-100. DOI: 10.20896/saci.v7i2.458
15. Moiseenko N. Specifics of applying mechanisms of public-private partnership when selecting investment projects. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 239:08022. DOI: 10.1051/matecconf/201823908022
16. Terentyeva A.S. Analysis of the main problems of district heating in Russia at the present stage. *Scientific papers: Institute of National Economic Forecasting RAS*. 2020; 18:253-273. DOI: 10.47711/2076-318-2020-253-273 (rus.).
17. Dolla T., Laishram B. Enhancing sustainability in public-private partnership projects through bid selection model. *Transportation Research Procedia*. 2020; 48:3896-3907. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.031
18. Elwakil E., Hegab M. Priority model for public-private partnership investment in energy projects. *2018 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (Sus-Tech)*. 2018. DOI: 10.1109/SusTech.2018.8671372
19. Erastov A., Novikova O. Practical application of integrated assessment methods as a tool for business analysis in the development of innovative energy saving. *Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019: Education Excellence and Innovation Management through Vision*. 2019; 8753-8761.
20. Usievich V.A., Kamenyuk L.I. Public-private partnership in heat supply. *News of Heat Supply*. 2016; 4(188). (rus.).

Received April 11, 2023.

Adopted in revised form on May 12, 2023.

Approved for publication on May 18, 2023.

Bionotes: **Valeria V. Glazkova** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 888163, Scopus: 57194442650, ResearcherID: ABI-2788-2020, ORCID: 0000-0002-5995-8585; leram86@mail.ru;

Catherine G. Gospodarik — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Analytical Economics and Econometrics; **Belarusian State University (BSU)**; 4 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220030, Republic of Belarus; ID RSCI: 952376, ORCID: 0000-0002-5593-7728; eggospodarik@fa.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициал*

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов. Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом **IMRaD** и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

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.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже

известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс *Citethisforme.com*.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип Статьи

Тип статьи - научная статья, обзорная статьи, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т. п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указы-

вают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Вклад авторов:

Фамилия И.О. - описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемова 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

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

77161033910321464300000000017300

(ИНН получателя платежа)

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК 004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 0000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2022 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О
плательщика

Адрес
плательщика

Сумма
платежа

3 822 руб. 00 коп.

Сумма
платежа

за услуги

руб. коп.

Итого руб. коп.

« » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги
банка, ознакомлен и согласен.

Подпись
плательщика

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

77161033910321464300000000017300

(ИНН получателя платежа)

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК 004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 0000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2022 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О
плательщика

Адрес
плательщика

Сумма
платежа

3 822 руб. 00 коп.

Сумма
платежа

за услуги

руб. коп.

Итого руб. коп.

« » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги
банка, ознакомлен и согласен.

Подпись
плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

77161033910321464300000000017300

(ИНН получателя платежа)

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК 004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 0000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2022 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О
плательщика

Адрес
плательщика

Сумма
платежа

6 880 руб. 00 коп.

за услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

« » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги
банка, ознакомлен и согласен.

Подпись
плательщика

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

77161033910321464300000000017300

(ИНН получателя платежа)

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК 004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 0000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2022 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О
плательщика

Адрес
плательщика

Сумма
платежа

6 880 руб. 00 коп.

за услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

« » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги
банка, ознакомлен и согласен.

Подпись
плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).
ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

