

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 17 Выпуск 12/2022
Vol. 17 Issue 12/2022

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

Том 17. Выпуск 12
2022

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

Сквозной номер 169

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

Volume 17. Issue 12
2022

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. 23-93
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	26.12.2022.
Подписан в свет	28.12.2022.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 19,75. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 396

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

Йозеф Вичан, д-р (технические науки, железобетонные конструкции), проф., Университет Жилина, 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), 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 Емлоло, д-р техн. наук, проф., зав. каф. сопротивления материалов, теории упругости и пластичности,

Варшавский технологический университет, инженерно-строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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*

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Дизайн и верстка: *Ольга Григорьевна Горюнова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рашид 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, 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:	26.12.2022

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2022

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova* **Layout:** *Ol'ga G. Goryunova*

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, Professor, Leading research scientist, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Чан Нгок Тянь, Фам Куок Куан, Нгуен Тхи Кхань Фьонг

**Энергоэффективность солнцезащитных конструкций типа прямоугольника
в условиях г. Ханоя и г. Москвы. 1615**

А.Ю. Казарян

Особенности строительной техники арийских мастеров. Стены и точечные опоры 1627

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

Д.Н. Лазовский, А.М. Хаткевич

Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию армокаменных элементов 1638

С.А. Соловьев, Ю.А. Инькова, А.А. Соловьева

**Вероятностный анализ надежности деревянной стойки по критерию устойчивости
при центральном сжатии. 1653**

З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, Ю.В. Ванина

**Длительная осадка и несущая способность оснований и фундаментов вблизи вертикальной выемки
при разных параметрах вязкости грунта 1664**

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

В.А. Орлов, С.П. Зоткин, Д.А. Петербургский

**Моделирование изменения гидравлических характеристик напорных труб в зависимости
от температуры 1677**

А.А. Гебрехивот, Д.В. Козлов

**Гидрологические исследования бассейна реки Мерреб-Гаш в интересах управления
водными ресурсами Эритреи 1687**

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Н.Ю. Яськова, И.Г. Лукманова, Л.И. Зайцева

**Организационно-экономические подходы и методы развития строительной отрасли
в условиях санкционного давления. 1707**

В.Ю. Гуринович, С.Н. Леонович, Д.А. Поздняков

Наукометрический анализ направлений исследований в области индустриального домостроения 1716

А.И. Магина, М.Ю. Мишланова

Исследование потенциального спроса на некоммерческий найм жилья 1732

Т.С. Меццержакова, М.В. Черняев

Экосистема промышленного предприятия в условиях ESG-трансформации 1747

Е.Ю. Васильева

**Особенности проектирования инновационных строительных материалов
на современном этапе развития отрасли. 1757**

Требования к оформлению научной статьи 1766

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Tran Ngoc Chan, Pham Quoc Quan, Nguyen Thi Khanh Phuong

Energy efficiency of solar shading structures of the rectangle type in the climate conditions of Hanoi and Moscow 1615

Armen Yu. Kazaryan

Features of the construction techniques of Ani masters. Walls and point supports 1627

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

Dzmitry N. Lazouski, Aliaksandr M. Khatkevich

Deformation approach to the calculation of compression resistance of reinforced stone elements 1638

Sergey A. Solovev, Yulia A. Inkova, Anastasia A. Soloveva

Reliability analysis of compressed timber studs on the buckling criterion 1653

Zaven G. Ter-Martirosyan, Armen Z. Ter-Martirosyan, Yuliya V. Vanina

Long-term settlement and bearing capacity of foundations adjacent to vertical excavation at various parameters of soil viscosity 1664

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Vladimir A. Orlov, Sergey P. Zotkin, Dmitry A. Petersburgskiy

Simulation of changes in hydraulic characteristics of pressure pipes depending on temperature 1677

Anghesom A. Ghebrehiwot, Dmitry V. Kozlov

Hydrological and water resources investigations of the Mereb-Gash river basin in Eritrea 1687

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Natalya Yu. Yaskova, Inessa G. Lukmanova, Larisa I. Zaytseva

Organizational and economic approaches and methods of development of the construction industry in a climate of sanctions pressure 1707

Vitaliy Yu. Gurinovich, Sergey N. Leonovich, Dmitriy A. Pozdnyakov

Scientometric analysis of research in the field prefabricated construction 1716

Anastasia I. Magina, Marina Yu. Mishlanova

Research on the potential demand for non-commercial rental housing 1732

Tatiana S. Meshcheryakova, Maxim V. Chernyaev

Ecosystem of an industrial enterprise in the conditions of ESG-transformation 1747

Elena Yu. Vasilyeva

Features of the innovation construction materials design at the current stage of the industry development 1757

Requirements for research paper design 1766

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).

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

объявляет о возможности подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора наук на темы:

«Методология благоустройства исторических городов»
и «Научно-методические основы планирования многофункциональных общественных комплексов на территории города (на примере Москвы)».

Конкурсный отбор состоится на заседании Научно-технического совета
НИУ МГСУ 17.01.2023 г. в 14.00.

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 628.47:004.94
DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1615-1626

Энергоэффективность солнцезащитных конструкций типа прямоугольника в условиях г. Ханоя и г. Москвы

Чан Нгок Тьян¹, Фам Куок Куан², Нгуен Тхи Кхань Фьонг¹

¹ Ханойский инженерно-строительный университет; г. Ханой, Вьетнам;

² Научный исследовательский институт безопасности и гигиены труда; г. Ханой, Вьетнам

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены результаты расчетов энергоэффективности окон с использованием солнцезащитной конструкции (СЗК) типа прямоугольник для зданий, обращенных в юго-восточном направлении, в климатических условиях городов Ханоя и Москвы, применяя изложенную ранее оценку энергоэффективности оконной системы с солнцезащитным устройством П-образного типа. В условиях Вьетнама для зданий юго-восточной ориентации (юго-западной ориентации) использование СЗК типа прямоугольник считается наиболее целесообразным.

Материалы и методы. Расчеты основываются на проекции солнечного луча при расчете части площади окна в тени с учетом коэффициента снижения облученности рассеянной солнечной радиации солнцезащитным устройством. Наличие СЗК на поверхности окна способствует снижению интенсивности рассеянной солнечной радиации, которое представлено коэффициентом K_{br} . Этот коэффициент определен путем экспериментов и предложен регрессионными уравнениями. Компьютерная программа для расчета СЗК создана для облегчения оценки и практики проектирования.

Результаты. Анализируется эффективность СЗК типа прямоугольник, проводится сравнение с коробчатой конструкцией. Теплопоступление q через юго-восточное окно рассчитано для двух указанных выше типов СЗК по метеоданным Ханоя и Москвы.

Выводы. Результаты исследования показывают, что энергоэффективность СЗК П-образного типа незначительно выше, чем СЗК типа прямоугольник для обоих городов. Однако СЗК типа прямоугольник оказываются хорошим решением для окон зданий, ориентированных на восток и по юго-восточному направлениям благодаря своей простоте и малой материальной емкости. При помощи компьютерной программы расчета можно вести быстрое и точное проектирование СЗК с требуемой эффективностью для энергосбережения зданий в общем и систем кондиционирования воздуха, в частности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: энергоэффективность зданий, расчет солнцезащитной конструкции, солнцезащитные конструкции типа прямоугольник, теплопоступление, расчет солнечной радиации, коэффициент облученности, оконная система

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чан Нгок Тьян, Фам Куок Куан, Нгуен Тхи Кхань Фьонг. Энергоэффективность солнцезащитных конструкций типа прямоугольника в условиях г. Ханоя и г. Москвы // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1615–1626. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1615-1626

Автор, ответственный за переписку: Нгуен Тхи Кхань Фьонг, phuongntk@huce.edu.vn.

Energy efficiency of solar shading structures of the rectangle type in the climate conditions of Hanoi and Moscow

Tran Ngoc Chan¹, Pham Quoc Quan², Nguyen Thi Khanh Phuong¹

¹ Hanoi University of Civil Engineering (HUCE); Hanoi, Vietnam;

² National Institute for Occupational Safety and Health; Hanoi, Vietnam

ABSTRACT

Introduction. The article presents the results of calculating the energy efficiency of windows using a sun protection structure (SZK) of the rectangle type for buildings facing the southeast direction in the climatic conditions of the cities of Hanoi and Moscow, using the new proposed method described in Evaluation of the energy efficiency of a window system with a П-type sunshade. In the conditions of Vietnam, for buildings with a southeast orientation (southwest orientation), the use of a rectangular SZK is considered the most appropriate.

Materials and methods. The calculations are based on the projection of the sunbeam when calculating a part of the window area in the shade, considering the coefficient of reducing the irradiance of diffuse solar radiation by a shading device. In the presence of the shading device, there is a reduction in the intensity of diffuse solar radiation, which is represented by the coefficient K_{br} . This coefficient was determined by experiments and proposed by regression equations. A computer program for calculating SZK was created to facilitate evaluation and design practice.

Results. The article analyzes the effectiveness of rectangular sun protection device, compared with a egg-crate shaped structure. Solar heat gain q through the southeastern window was calculated for the two types of SZK mentioned above with solar radiation data from Hanoi and Moscow.

Conclusions. The results of the study show that the energy efficiency of the egg-crate shaped SZK is marginally better than the rectangle-type SZK for both cities. Rectangle-type SZK prove to be a good solution for building windows oriented to the east and south-east directions due to their simplicity.

KEYWORDS: energy efficiency of buildings, sun shading device calculations, rectangular sun protection, heat gain, calculation of solar radiation, irradiance coefficient, fenestration system

FOR CITATION: Tran Ngoc Chan, Pham Quoc Quan, Nguyen Thi Khanh Phuong. Energy efficiency of solar shading structures of the rectangle type in the climate conditions of Hanoi and Moscow. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(12):1615-1626. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1615-1626 (rus.).

Corresponding author: Nguyen Thi Khanh Phuong, phuongntk@huce.edu.vn.

ВВЕДЕНИЕ

В приложении «Расчет солнцезащитных конструкций», разработанном автором для дополнения к нормативному документу QCVN 09:2017 «Эффективно-экономическое использование энергии в строительных сооружениях», рассматриваются пять типов солнцезащитных конструкций (СЗК), в том числе СЗК П-образного типа, считавшиеся достаточно эффективными.

В регионах с жарким климатом со средней облачностью, таких как Вьетнам [1], Таиланд, Малайзия, Индонезия и Сингапур [2, 3], на характеристики общего солнечного излучения приходится большая доля рассеянного излучения, учет пониженного коэффициента рассеянного излучения за счет СЗК вносит важный вклад в расчет энергоэффективности зданий в летнее время [4–11].

В настоящем исследовании, используя изложенный в работах [12–14] метод расчета солнцезащитной конструкции, проводится расчет СЗК типа прямоугольник, которые состоят из верхнего и бокового ребер, причем боковое ребро может быть поставлено на левую ($tp = 1$) или на правую ($tp = 2$) сторону окна для конкретных условий, а именно здания юго-восточной ориентации в условиях г. Ханоя и г. Москвы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схема СЗК «прямоугольник»

На рис. 1 показаны СЗК типа прямоугольник с левой и правой боковыми ребрами.

Расчет всех типов СЗК основывается на проекции солнечного луча, проходящего через край солнцезащитного ребра и точки его прикосновения M на поверхности заполнения светового проема на определенной ориентации.

Как известно, координаты x y точки прикосновения M солнечного луча на поверхности окна рассчитываются следующими формулами [11]:

$$\tan \Omega = \frac{\tan h}{\cos \gamma}; \quad (1)$$

$$x = \frac{b}{\tan \gamma}; \quad (2)$$

$$y = b \tan \Omega, \quad (3)$$

где h , γ , Ω — высота солнца, азимут солнца-стены и угол боковой проекции солнечного луча в градусах; x , y — координаты точки прикосновения солнечного луча на поверхности окна M , м; b — ширина ребра солнечного затенения, м.

Подробнее о принципе расчета можно узнать из работ [12, 14, 15].

Определение коэффициента облученности G

При наличии инсоляции на поверхности стены и окна благодаря СЗК часть поверхности окна $A_{\text{обл}}$ подвергается облучению полной (прямой и рассеянной) радиации, остальная часть находится в тени (т.е. подвергается только рассеянной радиации), коэффициентом облученности G является соотношение:

$$G = \frac{A_{\text{обл}}}{A_{\text{ос}}} = 1 - \frac{A_{\text{т}}}{BH}, \quad (4)$$

где $A_{\text{обл}}$ — площадь солнечной облученности, м^2 ; $A_{\text{т}}$ — часть площади окна в тени (часть поверхности окна со штрихами на рис. 1), м^2 ; $A_{\text{ос}} = BH$ — площадь остекления, м^2 ; B , H — ширина и высота окна, м.

Вместо расчета коэффициента облученности G ниже даны формулы для расчета части площади окна в тени $A_{\text{т}}$ (табл. 1).

Коэффициент снижения облученности рассеянной солнечной радиации СЗК типа прямоугольник K_{br}

При наличии солнцезащитных устройств на поверхности окна $A_{\text{ос}}$ воздействует диффузное излучение I_D с коэффициентом снижения облученности рассеянной солнечной радиации K_{br} , который учитывается через углы небосвода δ и τ , образованные СЗК (рис. 2).

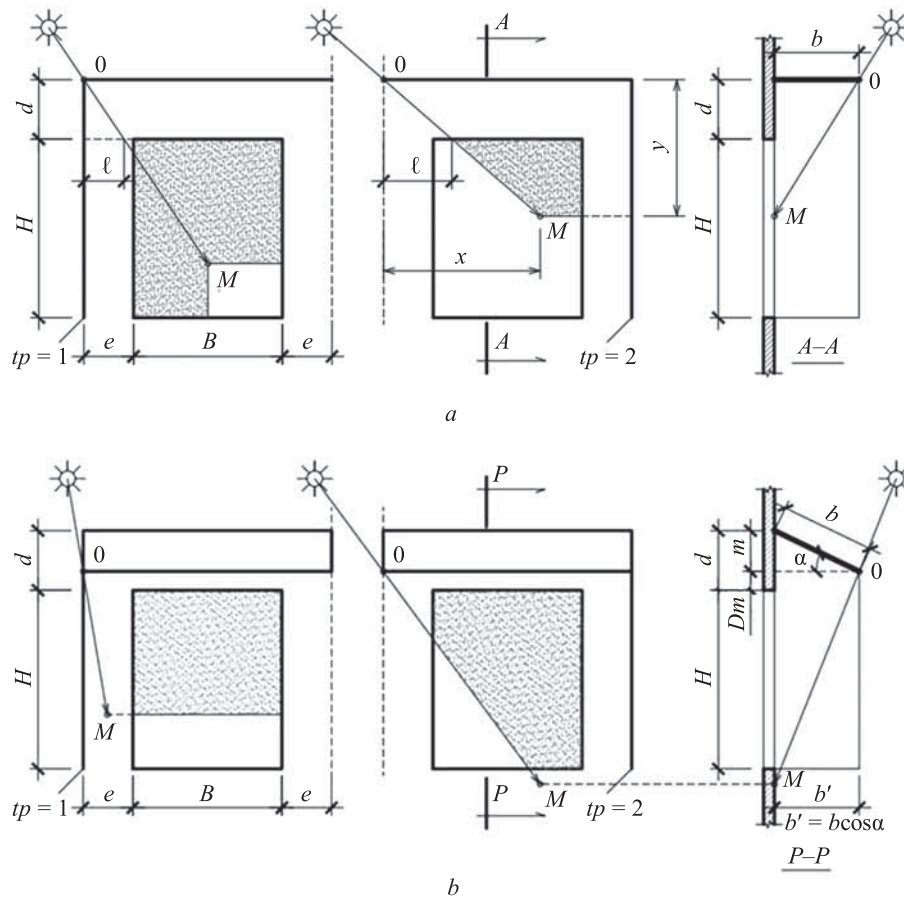


Рис. 1. Схема СЗК типа прямоугольник: *a* — верхнее ребро лежит на горизонтальной поверхности ($\alpha = 0$); *b* — верхнее ребро составляет с горизонтальной поверхностью угол $\alpha > 0$; *b'* — ширина верхнего солнцезащитного ребра, м; *d* — расстояние от верхнего края окна до верхнего солнцезащитного ребра, м; *e* — расстояние от бокового края окна до вертикальных солнцезащитных ребер, м

Fig. 1. The scheme of the rectangle type SPC: *a* — the upper edge lies on a horizontal surface ($\alpha = 0$); *b* — the upper edge is an angle $\alpha > 0$ with a horizontal surface; *b'* — the width of the upper sunshade edge, m; *d* — the distance from the upper edge of the window to the upper sunshade edge, m; *e* — the distance from side edge of the window to vertical sun protection ribs, m

Табл. 1. Формулы расчета части площади окна в тени A_{sh}

Table 1. Formulas for calculating the part of the window area in the shadow of A_{sh}

Случай 1 / Case 1 $y \leq D_m$		
<i>a) $x < e$</i>	$A_{sh} = 0$	(5)
<i>b) $e < x \leq B + e$</i>	$A_{sh} = 0$	(6)
<ul style="list-style-type: none"> • $tp = 1$ и $\gamma < 0$ или $tp = 2$ и $\gamma > 0$ $tp = 1$ и $\gamma < 0$ or $tp = 2$ and $\gamma > 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$ 	$A_{sh} = H(x - e)$	(7)
<i>c) $x \geq B + e$</i>	$A_{sh} = 0$	(8)
<ul style="list-style-type: none"> • $tp = 1$ и $\gamma < 0$ или $tp = 2$ и $\gamma > 0$ $tp = 1$ and $\gamma < 0$ or $tp = 2$ and $\gamma > 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$ 	$A_{sh} = BH$	(9)

Случай 2 / Case 2 $D_m < y \leq H + D_m$		
a) $x < e$	$A_{sh} = B(y - D_m)$	(10)
b) $e < x \leq B + e$ $\ell \leq e$ (ℓ — см. рис. 1, а) / (ℓ — see fig. 1, a) • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$	$A_{sh} = B(y - D_m) - \frac{(x - e)^2(y + m)}{2x}$	(11)
	$A_{sh} = B(y - D_m) + (H + D_m - y)(x - e)$	(12)
$\ell > e$ (ℓ — см. рис. 1, а) / (ℓ — see fig. 1, a) • $tp = 1$ и $\gamma < 0$ или $tp = 2$ и $\gamma > 0$ $tp = 1$ and $\gamma < 0$ or $tp = 2$ and $\gamma > 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$	$A_{sh} = (y - D_m) + \left(B + e - \frac{x}{2} + \frac{1}{2} \right)$	(13)
	$A_{sh} = B(y - D_m) + (H + D_m - y)(x - e)$	(14)
c) $x > B + e, \ell \leq e$ • $tp = 1$ и $\gamma < 0$ или $tp = 2$ и $\gamma > 0$ $tp = 1$ and $\gamma < 0$ or $tp = 2$ and $\gamma > 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$	$A_{sh} = B \left[\frac{(B + e)(y + m)}{x} - D_m - m - \frac{B(y + m)}{2x} \right]$	(15)
	$A_{sh} = BH$	(16)
$e < \ell < B + e$ • $tp = 1$ и $\gamma < 0$ или $tp = 2$ и $\gamma > 0$ $tp = 1$ and $\gamma < 0$ or $tp = 2$ and $\gamma > 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$	$A_{sh} = \frac{(B + e - 1)^2(y + m)}{2x}$	(17)
	$A_{sh} = BH$	(18)
$\ell \geq B + e$ • $tp = 1$ и $\gamma < 0$ или $tp = 2$ и $\gamma > 0$ $tp = 1$ and $\gamma < 0$ or $tp = 2$ and $\gamma > 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$	$A_{sh} = 0$	(19)
	$A_{sh} = BH$	(20)
Случай 3 / Case 3 $y > H + D_m$		
a) $x \leq e$	$A_{sh} = BH$	(21)
b) $e < x \leq B + e$ $\ell \leq e$ • $tp = 1; \gamma < 0$ и $P \leq Q$ или $tp = 2; \gamma > 0$ и $P \leq Q$ $tp = 1; \gamma < 0$ and $P \leq Q$ or $tp = 2; \gamma > 0$ and $P \leq Q$ • $tp = 1; \gamma < 0$ и $P > Q$ или $tp = 2; \gamma > 0$ и $P > Q$ $tp = 1; \gamma < 0$ and $P > Q$ or $tp = 2; \gamma > 0$ and $P > Q$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$	Нужно считать / You need to count $P = \frac{x}{(y + m)}, Q = \frac{e}{(H + D_m + m)}$	(22)
	$A_{sh} = BH - H \left[\frac{(H + D_m + m)x}{(y + m)} - e \right] \left[\frac{H + D_m + m - \frac{e(y + m)}{x}}{2} \right]$	(23)
	$A_{sh} = BH$	(24)
$\ell > e$ • $tp = 1$ и $\gamma < 0$ или $tp = 2$ и $\gamma > 0$ $tp = 1$ and $\gamma < 0$ or $tp = 2$ and $\gamma > 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$	$A_{sh} = BH - H \left[\frac{Hl}{2(D_m + m)} + l - e \right]$	(25)
	$A_{sh} = BH$	(26)
c) $x > B + e$ $\ell \leq e$ и $e < A_t \leq B + e$ $\ell \leq e$ and $e < A_t \leq B + e$	Нужно считать / You need to count $A_t = \frac{(H + D_m + m)}{(y + m)}$	

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

<ul style="list-style-type: none"> • $tp = 1$ и $\gamma < 0$ или $tp = 2$ и $\gamma > 0$ $tp = 1$ and $\gamma < 0$ or $tp = 2$ and $\gamma > 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$ 	$A_{sh} = BH - H \left[\frac{(H + D_m + m)x}{(y + m)} \right] \left[\frac{H + D_m + m - \frac{e(y + m)}{x}}{2} \right] \quad (27)$	$A_{sh} = BH \quad (28)$
<p>$e < \ell \leq B + e$ и $A_t \leq B + e$ $e < \ell \leq B + e$ and $A_t \leq B + e$</p> <ul style="list-style-type: none"> • $tp = 1$ и $\gamma < 0$ или $tp = 2$ и $\gamma > 0$ $tp = 1$ and $\gamma < 0$ or $tp = 2$ and $\gamma > 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$ 	$A_{sh} = BH - H \left[\frac{H\ell}{2(D_m + m)} + \ell - e \right] \quad (29)$	$A_{sh} = BH \quad (30)$
<p>$\ell \leq e$ и $A_t > B + e$ $\ell \leq e$ and $A_t > B + e$</p> <ul style="list-style-type: none"> • $tp = 1$ и $\gamma < 0$ или $tp = 2$ и $\gamma > 0$ $tp = 1$ and $\gamma < 0$ or $tp = 2$ and $\gamma > 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$ 	$A_{sh} = BH - B \frac{B(y + m)}{2x} - B \left[H + D_m + m - (B - e) \frac{y + m}{x} \right] \quad (31)$	$A_{sh} = BH \quad (32)$
<p>$e < \ell \leq B + e$ и $A_t > B + e$ $e < \ell \leq B + e$ and $A_t > B + e$</p> <ul style="list-style-type: none"> • $tp = 1$ и $\gamma < 0$ или $tp = 2$ и $\gamma > 0$ $tp = 1$ and $\gamma < 0$ or $tp = 2$ and $\gamma > 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$ 	$A_{sh} = \frac{y + m}{x} (B + e - 1)^2 \quad (33)$	$A_{sh} = BH \quad (34)$
<p>$\ell > B + e$</p> <ul style="list-style-type: none"> • $tp = 1$ и $\gamma < 0$ или $tp = 2$ и $\gamma > 0$ $tp = 1$ and $\gamma < 0$ or $tp = 2$ and $\gamma > 0$ • $tp = 1$ и $\gamma > 0$ или $tp = 2$ и $\gamma < 0$ $tp = 1$ and $\gamma > 0$ or $tp = 2$ and $\gamma < 0$ 	$A_{sh} = 0 \quad (35)$	$A_{sh} = BH \quad (36)$
<p>$A_t \leq B + e$</p>	$A_{sh} = BH \quad (37)$	

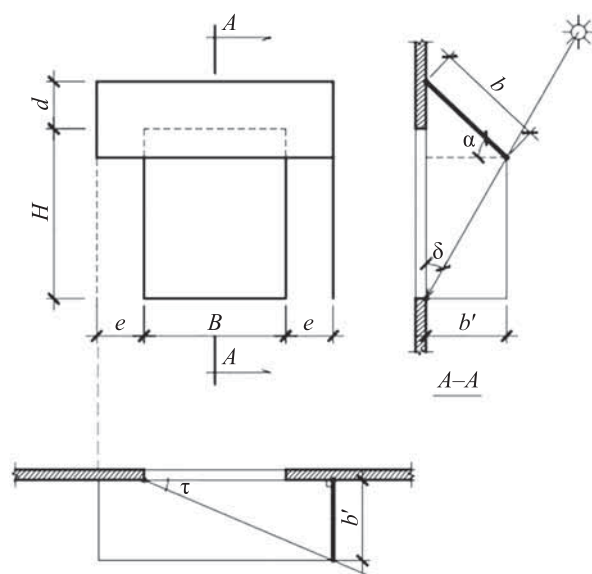


Рис. 2. Углы небосвода δ и τ , образованные СЗК

Fig. 2. The angles δ and τ formed by the Rectangle-type shading device

$$\delta = \arctan \left(\frac{b \cos \alpha}{H + D_m} \right), \text{ град.} \quad (38)$$

$$\tau = \arctan \left(\frac{b \cos \alpha}{B + e} \right), \text{ град.} \quad (39)$$

Можно привести данные табл. 4 Пособия 2.91 к СНиП 2.04.05-91¹ к следующим регрессивным уравнениям:

$$K_1 = 2,10^{-5} \delta^2 - 0,015 \delta + 0,983; \quad (40)$$

$$K_2 = 2,10^{-5} \tau^2 - 0,007 \tau + 0,992; \quad (41)$$

формула для расчета коэффициента K_{bt} будет иметь вид:

$$K_{bt} = K' K_1, \quad (42)$$

¹ Пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91. Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещения. М. : Стройиздат, 1993. 45 с.

где

$$K' = 1 - 0,5(1 - K_2) = \frac{1}{2}(1 + K_2). \quad (43)$$

Коэффициент уменьшения теплоступления солнечной радиации через заполнение светового проема благодаря СЗК

Количество тепла, поступающего в помещение через остекление светового проема солнечной радиации при отсутствии солнцезащитной конструкции, определяется следующей формулой [16, 17]:

$$Q_{K.o} = (q_n + q_p)SHGCA_{oc}, \text{ Вт}, \quad (44)$$

где q_n и q_p — интенсивность прямой и рассеянной солнечной радиации, поступающей на поверхность остекления светового проема, Вт/м²; $SHGC$ — коэффициент получения тепла солнечной радиации оконного стекла без размера; A_{oc} — площадь остекления, м².

При наличии СЗК количество тепла, поступающего в помещение через остекление светового проема солнечной радиации, будет Q_K , которое определяется так:

$$Q_K = SHGC(q_n A_{обл} + K_{br} q_p A_{oc}), \text{ Вт}. \quad (45)$$

Обозначая β , как отношение Q_K к $Q_{K.o}$, называем β — коэффициентом уменьшения теплоступления солнечной радиации через остекление и с учетом выражения (4) имеем:

$$\beta = \frac{Gq_n + K_{br}q_p}{q_n + q_p} = \frac{Gq_n + K_{br}q_p}{q_o}, \quad (46)$$

где $q_o = q_n + q_p$ — интенсивность полной солнечной радиации, Вт/м².

Все эти величины q_o , q_n , q_p были вычислены по методу ASHRAE для разных местностей Вьетнама [15, 18, 19].

С учетом коэффициента β выражение (44) может быть переписано следующим образом (не забывая, что при отсутствии СЗК $\beta = 1$):

$$Q_K = (q_n + q_p)SHGC\beta A_{oc}, \text{ Вт}. \quad (47)$$

Таким образом, сущность расчета СЗК заключается в определении их коэффициентов G и β .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Программа на компьютере для расчета СЗК типа прямоугольник

По вышеописанному методу расчета была разработана программа на компьютере для удовлетворения требованию проектирования энергоэффективных СЗК. Эта программа успешно применима в проектных расчетах.

Пример расчетов. Дано: СЗК типа прямоугольник устанавливается для окон шириной $B = 2,6$ м; высотой $H = 3,5$ м; ребра шириной $b = 1,2$ м; расстояние от верхнего края окна до верхнего ребра $d = 0,35$ м; расстояние от бокового края окна до бокового ребра $e = 0,4$ м; вертикальное ребро устанавливается на правую сторону окна ($tp = 2$); угол наклонения верхнего ребра к горизонтальной поверхности $\alpha = 25^\circ$; место строительства — г. Ханой и г. Москва, июль месяц; ориентация окон — юго-восток. Программа дает результат расчетов в виде рисунков с тенью на поверхности стены в каждый час дня и при всех необходимых данных расчета. Для вертикальных стен ориентации юго-востока в Ханое в июле солнечная инсоляция имеет место с 6 до 12 ч и в Москве с 6 до 14 ч. В качестве примера на рис. 3, 4 показаны результаты расчета в 7 ч и в 11 ч.

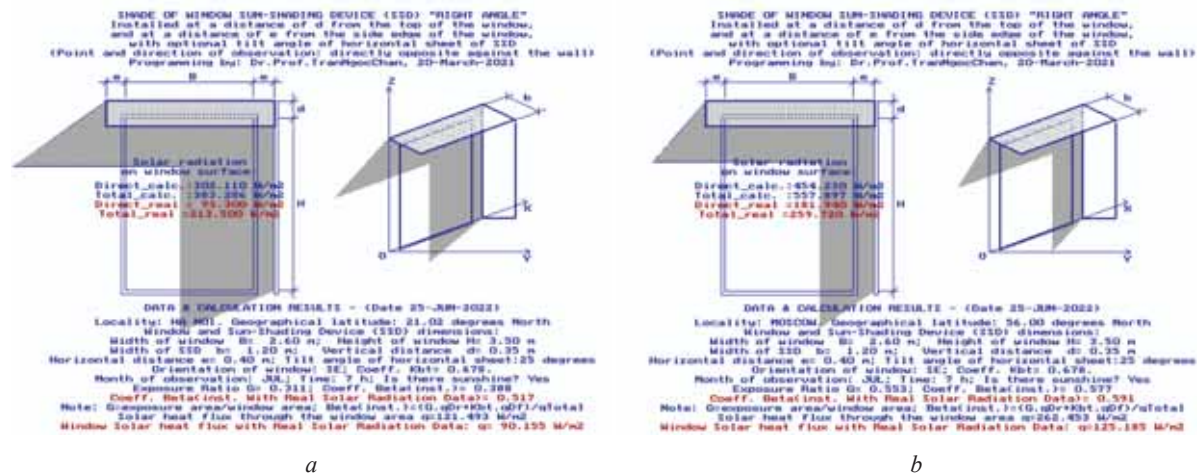


Рис. 3. Тень СЗК типа прямоугольник с $tp = 2$ на поверхности окна юго-восточной ориентации в 7 ч июля месяца: a — для Ханоя; b — для Москвы

Fig. 3. Rectangle-type shadow with $tp = 2$ on the surface of the south-east window at 7:00 July: a — for the locality of Hanoi; b — for the locality of Moscow

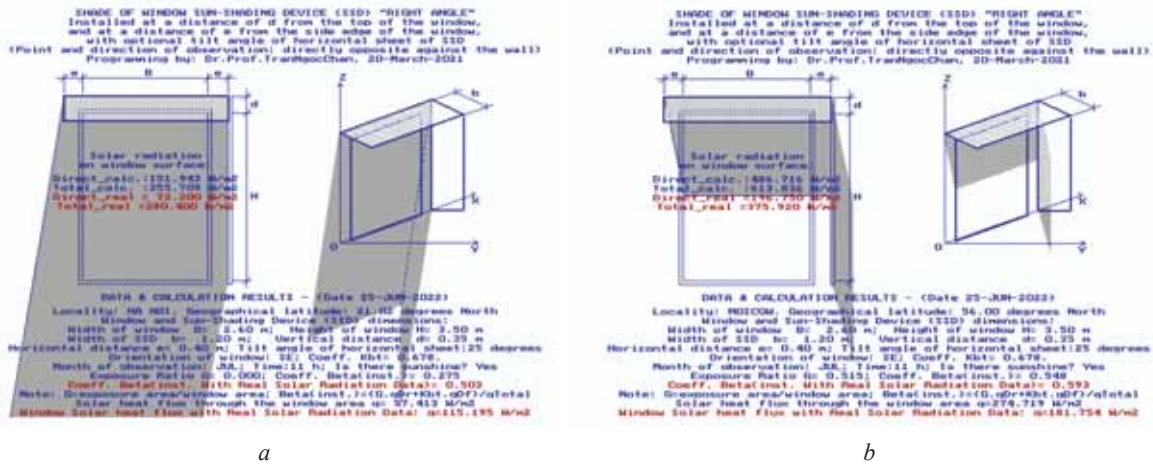


Рис. 4. Тень СЗК типа прямоугольника с $tp = 2$ на поверхности окна юго-восточной ориентации в 11 ч июля месяца: a — для Ханоя; b — для Москвы

Fig. 4. Rectangle-type shadow with $tp = 2$ on the surface of the south-east window at 11:00 July: a — for the locality of Hanoi; b — for the locality of Moscow

С целью сравнения и сопоставления энергоэф- типом полученные результаты расчетов для условий фективности СЗК типа прямоугольник и П-образного г. Ханоя и г. Москвы сведены в табл. 2–5.

Табл. 2. Для СЗК типа прямоугольник эффективность затенения выражается через коэффициенты G , β и q в дневном времени ориентации юго-восток в июле для г. Ханоя

Table 2. For rectangle type shading device the shading efficiency is expressed through the coefficients G , β and q in the daytime of south-east orientation in July for Hanoi

Время, ч Time, hour	Коэффициент облученности G Irradiance coefficient G	β при $q_{CP-расч}$ β if $q_{av.calc}$	β при $q_{CP-изм}$ β if $q_{av.meas}$	Наличие инсоляции Insolation	q_0 через 1 м ² окна при $q_{CP-расч}$, Вт/м ² q_w through one m ² of a window if $q_{av.calc}$, W/m ²	q_0 через 1 м ² окна при $q_{CP-изм}$, Вт/м ² q_w through one m ² of a window if $q_{av.meas}$, W/m ²
6	0,245	0,337	0,493	Да / Yes	37,604	32,207
7	0,311	0,388	0,517	Да / Yes	121,493	90,155
8	0,304	0,386	0,516	Да / Yes	146,164	130,337
9	0,230	0,339	0,495	Да / Yes	125,474	142,061
10	0,035	0,221	0,446	Да / Yes	68,431	123,606
11	0,000	0,275	0,503	Да / Yes	57,413	115,195
12	0,000	0,646	0,670	Да / Yes	52,558	104,074
13	0,000	0,678	0,678	Нет / No	47,139	90,353
14	0,000	0,678	0,678	Нет / No	42,930	79,176
15	0,000	0,678	0,678	Нет / No	39,640	69,549
16	0,000	0,678	0,678	Нет / No	34,613	55,827
17	0,000	0,678	0,678	Нет / No	26,528	37,679
18	0,000	0,678	0,678	Нет / No	9,516	14,773
Средние в день Daily average		0,512	0,593	—	62,269	83,461

Примечание: теплопоступление q_0 через 1 м² окна рассчитывается по формуле (47) с коэффициентом $SHGC = 0,816$ ($SHGC$ стекла толщиной 6 мм).

Note: the heat gain of a q_w through 1 m² of a window is calculated by the formula (47) with a coefficient of $SHGC = 0,816$ ($SHGC$ of glass 6 mm thick).

Табл. 3. Для СЗК типа прямоугольник эффективность затенения выражается через коэффициенты G , β и q в дневном времени ориентации юго-восток в июле для г. Москвы

Table 3. For rectangle type shading device the shading efficiency is expressed through the coefficients G , β and q in the daytime of south-east orientation in July for Moscow

Время, ч Time, hour	Коэффициент облученности G Irradiance coefficient G	β при $q_{CP-расч}$ β if $q_{av.calc}$	β при $q_{CP-изм}$ β if $q_{av.meas}$	Наличие инсоляции Insolation	q_o через 1 м^2 окна при $q_{CP-расч}$, Вт/м ² q_w through one m ² of a window if $q_{av.calc}$, W/m ²	q_o через 1 м^2 окна при $q_{CP-изм}$, Вт/м ² q_w through one m ² of a window if $q_{av.meas}$, W/m ²
6	0,401	0,456	0,490	Да / Yes	140,369	60,625
7	0,553	0,577	0,591	Да / Yes	262,453	125,185
8	0,638	0,645	0,650	Да / Yes	356,099	184,863
9	0,668	0,670	0,672	Да / Yes	396,318	222,021
10	0,608	0,621	0,636	Да / Yes	356,041	213,084
11	0,515	0,548	0,593	Да / Yes	274,719	181,754
12	0,401	0,468	0,562	Да / Yes	179,888	151,040
13	0,354	0,465	0,590	Да / Yes	109,777	126,650
14	0,556	0,672	0,677	Да / Yes	48,302	100,637
15	0,000	0,678	0,678	Нет / No	37,488	91,448
16	0,000	0,678	0,678	Нет / No	34,309	78,385
17	0,000	0,678	0,678	Нет / No	29,830	63,014
18	0,000	0,678	0,678	Нет / No	23,285	46,106
Средние в день Daily average		0,603	0,629	—	172,991	126,524

Табл. 4. Для СЗК П-образного типа эффективность затенения выражается через коэффициенты G , β и q в дневном времени ориентации юго-восток в июле для г. Ханой [12]

Table 4. For the П-shaped (egg-crate) type the shading efficiency is expressed through the coefficients G , β and q in the daytime of south-east orientation in July for Hanoi [12]

Время, ч Time, hour	Коэффициент облученности G Irradiance coefficient G	β при $q_{CP-расч}$ β if $q_{av.calc}$	β при $q_{CP-изм}$ β if $q_{av.meas}$	Наличие инсоляции Insolation	q_o через 1 м^2 окна при $q_{CP-расч}$, Вт/м ² q_w through one m ² of a window if $q_{av.calc}$, W/m ²	q_o через 1 м^2 окна при $q_{CP-изм}$, Вт/м ² q_w through one m ² of a window if $q_{av.meas}$, W/m ²
6	0,245	0,326	0,464	Да / Yes	36,39	30,30
7	0,311	0,378	0,489	Да / Yes	118,12	85,17
8	0,304	0,375	0,488	Да / Yes	141,92	123,04
9	0,230	0,327	0,465	Да / Yes	120,90	133,44
10	0,035	0,207	0,414	Да / Yes	63,88	114,60
11	0,000	0,255	0,466	Да / Yes	53,11	106,55
12	0,000	0,598	0,620	Да / Yes	48,62	96,27
13	0,000	0,627	0,627	Нет / No	43,60	83,58
14	0,000	0,627	0,627	Нет / No	39,71	73,24
15	0,000	0,627	0,627	Нет / No	36,67	64,33
16	0,000	0,627	0,627	Нет / No	32,02	51,64
17	0,000	0,627	0,627	Нет / No	24,54	34,85
18	0,000	0,627	0,627	Нет / No	8,80	13,66
Средние в день Daily average		0,479	0,551	—	59,10	77,74

Табл. 5. Для СЗК П-образного типа эффективность затенения выражается через коэффициенты G , β и q в дневном времени ориентации юго-восток в июле для г. Москва [12]

Table 5. For the П-shaped (egg-crate) type the shading efficiency is expressed through the coefficients G , β and q in the daytime of south-east orientation in July for Moscow [12]

Время, ч Time, hour	Коэффициент облученности G Irradiance coefficient G	β при $q_{\text{CP-расч}}$ β if $q_{\text{av.calc}}$	β при $q_{\text{CP-изм}}$ β if $q_{\text{av.meas}}$	Наличие инсоляции Insolation	q_o через 1 м ² окна при $q_{\text{CP-расч}}$, Вт/м ² q_w through one m ² of a window if $q_{\text{av.calc}}$, W/m ²	q_o через 1 м ² окна при $q_{\text{CP-изм}}$, Вт/м ² q_w through one m ² of a window if $q_{\text{av.meas}}$, W/m ²
6	0,401	0,446	0,473	Да / Yes	137,25	58,61
7	0,553	0,567	0,575	Да / Yes	258,15	121,96
8	0,638	0,636	0,634	Да / Yes	350,99	180,37
9	0,668	0,661	0,654	Да / Yes	390,79	216,20
10	0,608	0,612	0,616	Да / Yes	350,48	206,34
11	0,510	0,534	0,566	Да / Yes	267,43	173,50
12	0,248	0,340	0,469	Да / Yes	130,68	125,92
13	0,000	0,215	0,457	Да / Yes	50,78	98,10
14	0,000	0,596	0,622	Да / Yes	42,84	92,41
15	0,000	0,627	0,627	Нет / No	34,68	84,59
16	0,000	0,627	0,627	Нет / No	31,74	72,51
17	0,000	0,627	0,627	Нет / No	27,59	58,29
18	0,000	0,627	0,627	Нет / No	21,54	42,65
Средние в день Daily average		0,547	0,583	—	161,15	117,80

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Некоторые результаты, выведенные из примера расчета:

- в Ханое на вертикальной поверхности юго-восточной ориентации в 7 ч в июле тень СЗК типа прямоугольник падает налево (рис. 2, *a*) и дает $G > 0$, но коэффициент G в Ханое заметно ниже, чем в Москве ($G = 0,311$ против $G = 0,553$);

- в 11 ч (июль) в Ханое на вертикальной поверхности юго-восточной ориентации тень СЗК типа прямоугольник перемещается налево (рис. 4, *a*) таким образом, что вся поверхность окна лежит в тени ($G = 0$), в это время в Москве тень такой же СЗК падает направо (рис. 4, *b*) и вертикальное ребро СЗК не играет роли в затенении окна, в результате чего коэффициент G в Москве намного выше чем в Ханое ($G = 0,515$).

В итоге проделанной работы:

- разработана программа расчета различных СЗК для дополнения к нормативному документу QCVN 09:2017 «Эффективно-экономическое использование энергии в строительных сооружениях», в том числе СЗК типа прямоугольник, и показаны результаты расчета для условий г. Ханоя и г. Москвы;

- для условий Вьетнама СЗК типа прямоугольник с $tp = 2$ (вертикальное ребро лежит на правой

стороне окна) оказываются хорошим решением для окон зданий, ориентированных на восток, по южному и юго-восточному направлениям. Наоборот, при той же СЗК с $tp = 1$ (вертикальное ребро лежит на левой стороне окна) хорошим будет решение для окон зданий, ориентированных на запад, по южному и юго-западному направлениям. То есть решения ($tp = 2$ и $tp = 1$) принимаются симметрично через ось северного земного шара;

- исходя из количества тепла q_o , передаваемого через 1 м² окон в дом в среднем в день, соответствующего фактической интенсивности солнечной радиации, полученная энергетическая эффективность СЗК типа прямоугольник не сильно уступает эффективности СЗК П-образного типа (83,461 Вт/м² против 77,74 Вт/м², разница +7,35 % для Ханоя и 126,524 Вт/м² против 117,8 Вт/м², разница +7,4 % для Москвы).

Исходя из количества тепла q_o , переданного через 1 м² окон в здание в среднем в день, соответствующего теоретической интенсивности солнечной радиации, имеем также аналогичную картину с последовательными данными: 62 269 Вт/м² по сравнению с 59,1 Вт/м², разница +5,36 % для Ханоя и 172,991 Вт/м² против 161,15 Вт/м², разница +7,35 % для Москвы.

По сравнению с СЗК П-образного типа, простота и малые материальные затраты СЗК типа прямоугольник делают их применение в практике более целесообразным. При помощи программы расчета

на компьютере можно вести быстрое и точное проектирование СЗК с требуемой эффективностью для энергосбережения зданий в общем и систем кондиционирования воздуха в частности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Nguyen T.K.P., Solovyov A., Pham T.H.H., Dong K.H.* Confirmed method for definition of daylight climate for tropical Hanoi // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Pp. 35–47. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_4
2. *Mostafavi F., Tahsildoost M., Zomorodian Z.* Energy efficiency and carbon emission in high-rise buildings: A review (2005–2020) // *Building and Environment*. 2021. Vol. 206. P. 108329. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108329
3. *Heidari A., Taghipour M., Yarmahmoodi Z.* The effect of fixed external shading devices on daylighting and thermal comfort in residential building // *Journal of Daylighting*. 2021. Vol. 8. Issue 2. Pp. 165–180. DOI: 10.15627/jd.2021.15
4. *Atthallah, Mangkuto R.A., Koerniawan M.D., Yuliarto B.* On the interaction between the depth and elevation of external shading devices in tropical daylight classrooms with symmetrical bilateral openings // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 6. P. 818. DOI: 10.3390/buildings12060818
5. *Nguyen P.T.K., Pham H.T.H., Solovyev A.K., Tamrazyan A.G.* Improving the Accuracy of Daylight Calculation with Impact of Sun-shading Devices for the Russian Standard // *Engineering Journal*. 2021. Vol. 25(7). Pp. 109–120. DOI: <https://doi.org/10.4186/ej.2021.25.7.109>
6. *Rattanongphisat W.* Passive heat mitigation possibility using meteorological data analysis of Phitsanulok Province, Thailand for building application in the tropics // *ScienceAsia*. 2021. Vol. 47S. P. 96. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2021.S004
7. *Savero R.R., Antaryama I.G.N., Soemardiono B.* Review on design strategies of energy saving office building with evaporative cooling in tropical region // *IPTEK The Journal for Technology and Science*. 2020. Vol. 31. Issue 2. P. 236. DOI: 10.12962/j20882033.v31i2.5607
8. *Rana M.J., Hasan M.R., Sobuz M.H.R.* An investigation on the impact of shading devices on energy consumption of commercial buildings in the contexts of subtropical climate // *Smart and Sustainable Built Environment*. 2022. Vol. 11. Issue 3. Pp. 661–691. DOI: 10.1108/SASBE-09-2020-0131
9. *Alwetaishi M., Al-Khatiri H., Benjeddou O., Shamseldin A., Alsehli M., Alghamdi S. et al.* An investigation of shading devices in a hot region: A case study in a school building // *Ain Shams Engineering Journal*. 2021. Vol. 12. Issue 3. Pp. 3229–3239. DOI: 10.1016/j.asej.2021.02.008
10. *Yusoff W.F.M., Shaharil M.I., Mohamed M.F., Rasani M.R.M., Sopian A.R., Dahan N.D.* Review of openings with shading devices at naturally ventilated buildings // *Architectural Engineering and Design Management*. 2022. Pp. 1–17. DOI: 10.1080/17452007.2022.2095553
11. *Lim T., Yim W.S., Kim D.D.* Evaluation of daylight and cooling performance of shading devices in residential buildings in South Korea // *Energies*. 2020. Vol. 13. Issue 18. P. 4749. DOI: 10.3390/en13184749
12. *Чан Нгок Тьян, Нгуен Тхи Хань Фьонг, Горбаренко Е.В.* Оценка энергоэффективности оконной системы с солнцезащитным устройством П-образного типа // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 6. С. 655–665. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.655-665
13. *Chan T.N., Ha P.T.H., Van Luong P., Phuong N.T.K.* Method of assessing the reduction of solar heat on window surface shaded by continuous vertically slanted shading devices // *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) — NUCE*. 2021. Vol. 15. Issue 3. Pp. 185–198. DOI: 10.31814/stce.nuce2021-15(3)-15
14. *Чан Нгок Тьян, Фам Ван Лыонг, Нгуен Тхи Хань Фьонг.* Метод расчета солнцезащитных устройств // *Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : мат. XVII Междунар. науч. конф.* 2019. С. 100–109.
15. *Chan T.N., Thi Hai Ha P., Phuong N.T.K.* Method of calculating solar heat transmitted through shaded windows for ottv in consideration of diffuse radiation diminished // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2022. Pp. 1–16. DOI: 10.1080/13467581.2022.2064477
16. *Чан Н.Т., Буй К.Ч.* Влияние коэффициента поглощения солнечной радиации оконного стекла (SHGC) на индекс общего теплопоступления через наружную оболочку здания (OTTV) и расход электроэнергии для систем кондиционирования воздуха в здании // *Качество внутреннего воздуха и окружающей среды*. 2018. С. 176–182.
17. *Чан Нгок Тьян.* Снижение теплопоступлений через строительную оболочку здания с целью уменьшения энергопотребления систем кондиционирования воздуха // *Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : сб. тр. Хайфа*, 2014. С. 271–277.
18. *Чан Нгок Тьян, То Тхи Лой.* Методы определения расхода электроэнергии в жилых и общественных зданиях для разработки стандартов по

энергопотреблению во Вьетнаме // Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур (SAFETY2017) : сб. мат. Междунар. конф. 2017. С. 422–432.

19. Chan T.N., Trung B.Q. Technical indexes — building energy in tropical climate // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 481. P. 012032. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012032

Поступила в редакцию 5 июля 2022 г.

Принята в доработанном виде 9 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 10 ноября 2022 г.

О Б А В Т О Р А Х : **Чан Нгок Тьян** — кандидат технических наук, профессор, профессор департамента микроклимата и строительной окружающей среды, факультет строительной окружающей среды; **Ханойский инженерно-строительный университет**; Вьетнам, г. Ханой, ул. Зай Фонг, д. 55; ngocchan1937@gmail.com;

Фам Куок Куан — доктор технических наук, научный сотрудник; **Научный исследовательский институт безопасности и гигиены труда**; Вьетнам, г. Ханой, ул. Чан Куок Тоан, д. 99; pqquestec@gmail.com;

Нгуен Тхи Кхань Фьонг — кандидат технических наук; **Ханойский инженерно-строительный университет**; Вьетнам, г. Ханой, ул. Зай Фонг, д. 55; Scopus: 57212346606, ORCID: 0000-0001-8466-9067; phuongntk@huce.edu.vn.

Вклад авторов:

Чан Нгок Тьян — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии.

Фам Куок Куан — написание исходного текста, итоговые выводы.

Нгуен Тхи Кхань Фьонг — участие в разработке концепции исследования, доработка текста, оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Nguyen T.K.P., Solovyov A., Pham T.H.H., Dong K.H. Confirmed method for definition of daylight climate for tropical Hanoi. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 35-47. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_4
2. Mostafavi F., Tahsildoost M., Zomorodian Z. Energy efficiency and carbon emission in high-rise buildings: A review (2005–2020). *Building and Environment*. 2021; 206:108329. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108329
3. Heidari A., Taghipour M., Yarmahmoodi Z. The effect of fixed external shading devices on daylighting and thermal comfort in residential building. *Journal of Daylighting*. 2021; 8(2):165-180. DOI: 10.15627/jd.2021.15
4. Atthailah, Mangkuto R.A., Koerniawan M.D., Yulianto B. On the Interaction between the Depth and elevation of external shading devices in tropical daylit classrooms with symmetrical bilateral openings. *Buildings*. 2022; 12(6):818. DOI: 10.3390/buildings12060818
5. Nguyen P.T.K., Pham H.T.H., Solovyev A.K., Tamrazyan A.G. Improving the Accuracy of Daylight Calculation with Impact of Sun-shading Devices for the Russian Standard. *Engineering Journal*. 2021. Vol. 25(7): Pp. 109-120. DOI: <https://doi.org/10.4186/ej.2021.25.7.109>
6. Rattanongphisat W. Passive heat mitigation possibility using meteorological data analysis of Phitsanulok Province, Thailand for building application in the tropics. *ScienceAsia*. 2021; 47S:96. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2021.S004
7. Savero R.R., Antaryama I.G.N., Soemardiono B. Review on design strategies of energy saving office building with evaporative cooling in tropical region. *IPTEK the Journal for Technology and Science*. 2020; 31(2):236. DOI: 10.12962/j20882033.v31i2.5607
8. Rana M.J., Hasan M.R., Sobuz M.H.R. An investigation on the impact of shading devices on energy consumption of commercial buildings in the contexts of subtropical climate. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2022; 11(3):661-691. DOI: 10.1108/SASBE-09-2020-0131
9. Alwetaishi M., Al-Khatiri H., Benjeddou O., Shamseldin A., Alsehli M., Alghamdi S. et al. An investigation of shading devices in a hot region: A case study in a school building. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021; 12(3):3229-3239. DOI: 10.1016/j.asej.2021.02.008
10. Yusoff W.F.M., Shaharil M.I., Mohamed M.F., Rasani M.R.M., Sopian A.R., Dahlan N.D. Review of openings with shading devices at naturally ventilated buildings. *Architectural Engineering and Design Management*. 2022; 1-17. DOI: 10.1080/17452007.2022.2095553
11. Lim T., Yim W.S., Kim D.D. Evaluation of daylight and cooling performance of shading devices in residential buildings in South Korea. *Energies*. 2020; 13(18):4749. DOI: 10.3390/en13184749
12. Tran Ngoc Chan, Nguyen Thi Khanh Phuong, Gorbarenko E.V. Assessment of the energy effi-

ciency of a window system with a shading device of the egg-crate type. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture], 2021; 16(6):655-665. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.655-665 (rus.).

13. Chan T.N., Ha P.T.H., Van Luong P., Phuong N.T.K. Method of assessing the reduction of solar heat on window surface shaded by continuous vertically slanted shading devices. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) — NUCE*. 2021; 15(3):185-198. DOI: 10.31814/stce.nuce2021-15(3)-15

14. Tran Ngoc Chan, Pham Van Luong, Nguyen Thi Khanh Phuong. Method for calculating sun protection devices. *Quality of indoor air and environment : proceedings of the XVII International Scientific Conference*. 2019; 100-109. (rus.).

15. Chan T.N., Thi Hai Ha P., Phuong N.T.K. Method of calculating solar heat transmitted through shaded windows for ottv in consideration of diffuse radiation diminished. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2022; 1-16. DOI: 10.1080/13467581.2022.2064477

16. Chan T.N., Trung B.Q. Influence of window glass solar radiation absorption coefficient (SHGC) on the index of total heat through the building shell (OTTV) and electricity consumption for building air conditioning systems. *Indoor Air and Environment Quality*. 2018; 176-182. (rus.).

17. Tran Ngoc Chan. Reducing heat gain through the building envelope in order to reduce the energy consumption of air conditioning systems. *Quality of Indoor Air and Environment*. Khayfa, 2014; 271-277. (rus.).

18. Chan Ngoc Tian, To Tkhi Loi. Methods for determination of energy consumption in residential and public buildings for the development of standards for energy consumption in Vietnam. *Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures SAFETY2017*. 2017; 422-432. (rus.).

19. Chan T.N., Trung B.Q. Technical indexes — building energy in tropical climate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 481:012032. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012032

Received July 5, 2022.

Adopted in revised form on November 9, 2022.

Approved for publication on November 10, 2022.

B I O N O T E S : **Tran Ngoc Chan** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Microclimate and Building Environment, Faculty of Building Environment; **Hanoi University of Civil Engineering (HUCE)**; 55 Giai Phong st., Hanoi, Vietnam; ngocchan1937@gmail.com;

Pham Quoc Quan — Doctor of Technical Sciences, Researcher; **National Institute for Occupational Safety and Health**; 99 Tran Quoc Toan st., Hanoi, Vietnam; pqquestec@gmail.com;

Nguyen Thi Khanh Phuong — Candidate of Technical Sciences; **Hanoi University of Civil Engineering (HUCE)**; 55 Giai Phong st., Hanoi, Vietnam; Scopus: 57212346606, ORCID: 0000-0001-8466-9067; phuongntk@huce.edu.vn.

Contribution of the authors:

Tran Ngoc Chan — scientific guide, research concept, methodology development.

Pham Quoc Quan — writing the original text, final conclusions.

Nguyen Thi Khanh Phuong — participation in the development of research concept, text revision, design of the article according to the requirements of the editorial board.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 72.032

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1627-1637

Особенности строительной техники анийских мастеров. Стены и точечные опоры

Армен Юрьевич Казарян

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Малоизученной составляющей архитектурного наследия средневековой армянской столицы Ани (961–945) является строительная техника мастеров. Предпринята попытка ответить на ряд вопросов, связанных с изменениями кладки стен, пилонов и столбов, устройства колонн, с появлением новых форм цоколя на столичных памятниках эпохи Багратидов.

Материалы и методы. Сведения из публикаций историков архитектуры и собственные наблюдения позволяют проследить зависимость между изменениями строительной техники и архитектурными решениями. Ограничение материала конструкциями стен и опор не исключает обращений к взаимосвязи этих элементов с перекрытиями, особенности которых будут раскрыты в последующих публикациях.

Результаты. Анийские мастера развивали традиционную технику кладки с неразрывно связанными тремя слоями: внешними каменными и внутренним бутобетонным. Главный анийский зодчий Трдат применял совмещение стеновой структуры с каркасной системой, при этом сохранялась целостность бетонной сердцевины кладки по всему периметру здания, с утолщениями в местах концентрации нагрузок. Каменные блоки к концу X в. становятся глубиной до 0,3 м, одновременно повышаются ряды кладки стен и столбов до 1,5–2 м, что привело к использованию вертикально ориентированных блоков. В русле развития аркатурного ордера такими плитами выложены фасады церквей 20–30-х гг. XI в., причем зодчим каждой постройки вводилось определенное количество рядов кладки для достижения высоты ордерной пилястры. Резкое повышение круглых колонн в церкви Святого Григория (Гакгашен) по сравнению с ее образцом — храмом VII в. Звартноц, характер цоколей стен и другие особенности анийских памятников не были связаны с решением утилитарных экономических или технических задач.

Выводы. Большинство изменений характера кладки стен, столбов и устройства колонн в Ани эпохи Багратидов свидетельствуют об их прямой зависимости от архитектурного замысла и нацелены на достижение определенного архитектурного образа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Ани, армянская архитектура, строительная техника, кладка стен, пилоны, столбы, цоколь, X–XI вв.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-18-00354 (URL: <https://rscf.ru/project/22-18-00354/>) в Национальном исследовательском Московском государственном строительном университете (НИУ МГСУ).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Казарян А.Ю. Особенности строительной техники анийских мастеров. Стены и точечные опоры // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1627–1637. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1627-1637

Автор, ответственный за переписку: Армен Юрьевич Казарян, KazaryanAYU@mgsu.ru.

Features of the construction techniques of Ani masters. Walls and point supports

Armen Yu. Kazaryan

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

ABSTRACT

Introduction. The construction technique of the master-builders is a little-studied aspect of the architectural heritage of the medieval Armenian capital of Ani (961–945). The author of the article proposes to answer a number of questions related to changes in masonry of the walls, pylons and pillars and the device of the columns, with the advent of new forms of socles on the monuments of the metropolitan school of architecture in the Bagratid era.

Materials and methods. The information from publications and from own observations allows for the testing between changes in building technique and architectural decisions. The limitation of the material to the structures of walls and supports does not exclude references to the relationship of these elements with coverings, which peculiarities will be disclosed in subsequent publications.

Results. Ani masters have developed a traditional masonry with inextricably connected three layers: outside stone and internal rubble concrete. The main Ani architect Trdat used the combination of the wall structure with the frame system, while the internal design of the concrete core has been preserved around the entire perimeter of the building, with enlargements in places of epy weighting's concentration. Stone blocks by the end of the 10th century became narrower, up to 0.3 m deep,

but the rows of laying walls and pillars alternated, up to 1.5–2 m, which led to the use of vertically oriented blocks. In line with the development of the blind arcade order, facades of the churches of the 1020–1030s were laid out on this kind of slabs. Depending on the architect of each building, the achievements in the number of laying rows for the height of the order pilaster was introduced. A sharp rise in the round columns in the church of St. Gregory Gagkashen in comparison with its prototype, the VII century church of Zvartnots, the nature of the wall socles and other features of the Ani monuments were not covered with the help of useful economic or technical problems.

Conclusions. Most of the changes of features of the masonry of the walls and pillars, as well as of the columns in Ani of the Bagratid era correspond to their direct dependence on the architectural design and lead to the achievement of a certain architectural image.

KEYWORDS: Ani, Armenian architecture, construction technique, wall's masonry, pylars, pillons, columns, X–XI century

Acknowledgment. The study has been realized by the grant of the Russian Science Foundation, project No. 22-18-00354 (URL: <https://rscf.ru/project/22-18-00354/>), in the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU).

FOR CITATION: Kazaryan A.Yu. Features of the construction techniques of Ani masters. Walls and point supports. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(12):1627-1637. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1627-1637 (rus.).

Corresponding author: Armen Yu. Kazaryan, KazaryanAYU@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Архитектурное наследие средневековой армянской столицы Ани на протяжении всей истории изучения восточнохристианского зодчества находилось в сфере особого внимания. Оно занимает центральное место в архитектуре эпохи Багратидов (IX–XI вв.) и по своему значению едва ли уступает как архитектуре раннехристианского периода, с выделяемым внутри него «золотым веком» армянского зодчества (VII в.), так и архитектуре эпохи Закаридов — времени беспрецедентного развития монастырских ансамблей (XII–XIV вв.). Археологическое городище Ани с 1920 г. находится на территории провинции Карс Турции. Ведущая роль в его изучении принадлежит Анийскому археологическому институту под руководством Н.Я. Марра (1892–1893, 1904–1917) в период, когда Карская область принадлежала Российской империи [1]. После десятилетий забвения и враждебного отношения к христианскому наследию на востоке Турции исследования были продолжены местными археологами и западными учеными, а в начале XXI в. начались исследования и консервационные работы при поддержке Всемирного фонда памятников (WMF), в которых автор статьи более 10 лет принимает участие [2, 3].

В Ани, основанном в 961 г. на месте древней крепости, почти сразу стала складываться особая архитектурная школа, называемая анийской или столичной [4, 5]. Ее главным достижением по праву считаются результаты стилистического развития, придававшего монументальным постройкам изысканную элегантность и величие. Понимание путей совершенствования строительной техники, особенностей конструктивных и технологических разработок средневековыми мастерами позволяют по-новому оценить каждое произведение монументальной архитектуры, в том числе выявить взаимосвязь между конструктивными решениями и развитием стиля. Исследования в этом направлении необходимы с учетом наших знаний о неординарных способностях аний-

ских строителей, решавших самые сложные проблемы. Именно анийский архитектор Трдат в конце X в. был приглашен в Константинополь для восстановления купола собора Святой Софии и с честью справился с этой конструктивной задачей. Известно, что через глубокое ущелье рядом с Ани было наведено не менее трех мостов, центральный пролет одного из которых составлял более 31 м (устои его сохранились).

Ученые XIX в. отмечали лишь самые общие особенности кладки средневековых армянских построек. Й. Стржиговский в разделе «Материалы и работа» своего двухтомника «Архитектура армян и Европа» [6, с. 207–220] и Т. Тораманян в монографии «Строительные материалы и их применение в древней Армении», вышедшей в переработанном виде в сборнике трудов ученого [7, с. 134–146], обстоятельно анализировали особенности использовавшихся природных материалов — камня различных вулканических пород и извести как основы бутобетона, об обработке которой и способе применения в сочетании с определенными фракциями песка подробно писал Т. Тораманян. Указанными авторами, а также Н.М. Токарским высказаны принципиальные соображения о комбинированной, каменно-бутобетонной структуре стен, приемах обработки камня и подгонки блоков друг к другу, обеспечивающих прочность и долговечную эстетическую привлекательность конструкции. Истоки своеобразной техники кладки армянских мастеров уходят в глубокую древность, но окончательно она сформировалась в позднеантичную эпоху. Уже в то время стены выкладывались с двух сторон рядами камней, идеально обработанных с лицевой стороны и по краям, но при этом грубо отесанных с тыльных (внутристенных) сторон. Незначительное пространство между рядами заполнялось известковым бетоном. Эволюция строительной техники, принципиальные изменения которой происходили в V в., затем в VII в. и, наконец, во второй половине X в., приводила к неуклонному уменьшению глубины залегания каменных блоков за счет

расширения зоны бутобетона, «тяжесть здания переносится в значительной мере на заполняющий толщину стены известковый бетон. Камень становится облицовкой и служит при постройке своеобразной опалубкой, в которую забрасывают крупный плоский щебень, заливаемый известковым раствором, причем притеска и пригонка на место облицовочных плит производится настолько тщательно, что раствор не просачивается наружу» [8, с. 172].

Впоследствии историки архитектуры обращали незначительное внимание на особенности строительной техники столичных мастеров второй половины X – первой половины XI вв. Их выводы также ограничивались констатацией общего характера эволюции системы кладки стен и развития технологии тески и установки камней, создания бетонной сердцевины [9, с. 239–242]. Но специальное обращение к этой проблеме до сих пор отсутствует, как и нет должного внимания к изучению строительной техники главной в стране анийской школы зодчества. Вместе с тем планомерное исследование произведений анийских мастеров в последние годы выдвигает необходимость такого обращения, с решением целого ряда вопросов уже в настоящей статье, рассматривающей только изменения особенностей конструкций стен и пристенных и точечных опор. Среди них:

- каковы были пределы эволюции стеновой кладки?
- какими были изменения кладки столбов и технические нововведения анийских мастеров при создании и установке колонн?
- как изменялись формы цоколя и карниза, которые являлись составной частью стен?
- насколько изменение способа кладки зависело от решения архитектурных задач?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование основывается на традиционной комплексной методике натурного обследования памятников архитектуры, сочетающей наблюдения, зарисовки, обмеры (при возможности их производства) и подробную фотофиксацию. Памятники обследовались в ходе научных экспедиций в Ани при участии и под руководством автора статьи на протяжении более 20 лет, что позволило уточнять результаты наблюдений и выдвигаемые предположения. Апробацию многие из них проходили в ходе дискуссий с реставраторами средневековых построек и экспертами Всемирного фонда памятников на площадке музея-городища Ани, во время докладов автора на международных конференциях [10].

Новизна исследования обусловлена не инновационностью технических методов изучения конструкций (этот не менее перспективный путь возможен при кооперации со специалистами строительных наук), а взглядом на средневековое архитектурное творчество, которое в своих проявлениях разно-

образно выстраивало приоритеты заботы о прочности и красоте. Анализ сведенной фактологической информации из публикаций историков архитектуры и собственных наблюдений позволяет проследить существование или отсутствие зависимости между техническими возможностями и архитектурными решениями.

Ограничивая материал данного исследования стенами и опорами, автор осознает затруднения в понимании конструктивной работы всего здания и поэтому частично старается проследить взаимосвязь этих элементов с перекрытиями, особенности которых будут раскрыты в последующих публикациях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первое, что следует отметить, это переориентация столичных зодчих от стеновой конструкции к совмещению ее особенностей с каркасной системой. В последней значительна роль подпружных и пристенных арок, и нагрузка сводов передается на мощные пилоны, а не на стены. Соответственно, стена может превратиться в ограждающую мембрану, в которой расширяются возможности распределения проемов. Однако, как и во второй половине VII в., когда каркасная идея была воспринята армянскими мастерами из Константинополя, так и в последней трети X в. при возрождении этой идеи, пристенные опоры сохранили органичную связь со стенами: те и другие выкладывались одновременно, порядно вдоль изрезанного периметра, а их связанность в единую конструктивную систему обеспечивалась неразрывностью бутобетонной сердцевины стен и примыкающих к ним опор. Более того, пластичность и неразрывность системы достигалась не только целостностью оболочки по всему периметру здания, с ее утолщениями в местах концентрации нагрузок, но и бетонным заполнением над выкладывавшимися камнем арками и сводами. Каменные блоки даже при изменении их пропорций за счет не только уменьшения глубины до 0,2–0,3 м, но и повышения рядов кладки до 1–1,5 м, когда соотношение внешних размеров блока к глубине его залегания достигает пяти и более, вопреки оценке Н.М. Токарского, не уподобляются облицовочным плитам. Потому что одновременно на рубеже X–XI вв. идет тенденция к сужению стены. Как и ранее, анийские мастера продолжают создавать стены с неразрывно связанными слоями: внешними каменными и внутренним бутобетонным. Несомненно, повысилось качество бетона, благодаря чему он способен сохранять свою стабильность даже в тех постройках X–XI вв., в которых с целью разрушения памятника стены в нижней зоне были подорваны, а каменные блоки с двух сторон вырваны. Ярким примером устойчивости служит церковь Сурб Саргис монастыря Хцконк, единственная сохранившаяся после уничтожения его построек в 1960 г. (рис. 1) [11, 12].



Рис. 1. Церковь Сурб Саргис монастыря Хцконк. Общий вид с северо-востока (фотография автора, 2013 г.)

Fig. 1. Church of Surb Sargis in Khtskonk Monastery. View from the Nord-East (photograph by A. Kazaryan)

Некоторые особенности развития стеновой кладки невозможно объяснить традиционно приписываемым армянским мастерам рационализмом: экономи-

ей материалов и трудовых затрат. Например, имевшее место в эпоху Багратидов повышение рядов кладки должно было усложнить работу в карьере, подбор блоков нужной величины, теску больших внешних поверхностей каждого из них (1–2 м²). Что заставляло вытесывать и устанавливать в кладке особо высокие блоки? Не усматривая преимуществ такого изменения ни в экономии средств, ни в повышении качества конструкций, приходится обратиться к области эстетики и архитектурной образности. Очевидно, что благодаря переходу от мелко- и среднеразмерного камня (о применении его до середины X в. свидетельствуют многочисленные датированные памятники, в том числе собор святых апостолов в Карсе 930-х гг., с высотой рядов 0,5–0,7 м) к большим плитам, часто имеющим по фасаду не горизонтально, а вертикально вытянутые пропорции, кладке придан новый масштаб, монументальность, перекликающаяся с сооружениями далекой античности. Сравнение это неслучайно, если учитывать увлечение анийскими заказчиками и мастерами античными формами как композициями храмов, так и отдельными деталями и орнаментацией [13–15].

Скорее всего, решительный переход к новому масштабу кладки произошел в связи со строительством Анийского кафедрального собора (980–1000 гг.) — сооружения огромной величины, сопоставимого с самыми большими храмами VII в. и генетически восходящего к ним своей композицией. Строитель собора придворный архитектор Трдат тонко чувствовал возможности местного туфа, преимущества развития каркасной конструктивной системы и обращал их во благо формирования нового образа храма — необыкновенно величественного, в меру «легкого» и обладающего вертикальной устремленностью пространственных зон и членящихся форм (рис. 2).



Рис. 2. Ани. Кафедральный собор. Интерьер с видом на восток (фотография автора, 2013 г.)

Fig. 2. Ani. Cathedral. Interior, view to the East (photograph by A. Kazaryan)

Приближение к эффектам, сопоставимым с теми, которые знакомы нам по архитектуре готики или, по крайней мере, поздней романики, причем задолго до их распространения в Европе, достигнуто применением Трдатом 5-ступенчатого цоколя с высокими и неглубокими ступенями, перспективных порталов и окон, изящной аркатуры, вертикальным членением внутренних опор, приобретших изрезанный контур, а также введением высокорядной кладки. Последнее обстоятельство не отмечалось в научной литературе, но оно представляется существенным. По фасадам особо высокими являются нижние ряды кладки, с середины аркатуры ряды становятся короче, а над ее архивольтами мельчают, что усиливает эффект визуального сокращения. Аналогично и в интерьере, где особая выразительность кладки проявлена в структуре подкупольных столбов и пристенных пилонов. Достигая в плане размеров в 2,70; 2,90 м, столбы изрезаны уступами с гранями в 0,25–0,37 м. Несмотря на то что зачастую пара соседних уступов создана в рамках одного каменного блока, глаз сопоставляет его высоту с шириной уступа. Таким образом, создается впечатление, что столбы выполнены из собранных в пучок гротескно вытянутых блоков, высотой в 1,37–1,62 м (в нижнем ряду: 2,02–2,17 м). С технологической точки зрения было бы легче выложить эти формы из камней средней величины, как делалось многими предшественниками Трдата. Однако он пошел на такое преобразование кладки, подчеркнув его значение вводом на верхних уровнях несравненно более узких рядов кладки. Вся эта инновационность, призванная удовлетворить искомому образу, на редкость гармонично соседствует в этом соборе с представлениями о классической архитектуре.

Родственность армянской средневековой архитектуры с греко-римской античной, впрочем, никогда не прерывалась. Сохранение на протяжении веков таких особенностей, как ступенчатые подиумы, цоколи, кладка из чисто отесанных блоков с плотной подгонкой краев камней и созданием по этим границам, преимущественно горизонтальным, фасок, широкое применение бетона и разнообразных сводчатых конструкций — часть тех форм и приемов, которые наследовала от античности армянская средневековая традиция. В период расцвета Анийского царства Багратидов имела место новая волна обращения к античности. Ее результатом явилось, к примеру, соединение ротонды с традиционной типологией центричных купольных церквей, воссоздание порталов эллинистического типа, применение наряду со ступенчатыми цоколями формы подиума, завершенного карнизом, и, наконец, преобразование аркатуры, которая еще в VII в. выглядела организующим фасад своеобразным ордером, но теперь была совершенствована анийскими зодчими. Высота пилеастр анийской аркатуры, как и высота соединяющих их архивольтов, была увязана с отметками внутренней структуры здания. Высоте пилеастр стала соответ-

ствовать и кладка, точнее число рядов в ней. Так, уже в главной церкви Мармашена (1029) и церкви Сурб Саргис Хцконка (1024) высота пилеастр соответствует пяти рядам стеновой кладки, высота пилеастр их барабанов, соответственно, двум и трем рядам, в церкви Спасителя (Сурб Пркич) в Ани (1035) пилеастры основного ротондального объема созданы в пределах всего лишь трех рядов кладки. Последний пример наиболее показателен с точки зрения нарочитого достижения зодчим монументальности ордера, в том числе средствами каменной кладки. Необходимо понимать, что не высота ордера здесь подогнана под определенное число рядов фасадной кладки, а наоборот, принято решение о достижении нужной, выверенной пропорциональным соотношением, высоты пилеастр именно тремя рядами. В результате каждый из данных исполинских блоков, высотой в человеческий рост (1,75; 1,42; 1,52 м), приобрел строго вертикальные пропорции, что усиливает эффект абсолютной центричности композиционного замысла (рис. 3) [16].



Рис. 3. Ани. Церковь Сурб Пркич (Спасителя). Общий вид с запада (фотография автора, 2022 г.)

Fig. 3. Ani. Church of Surb Prkich (Redeemer). View from the West (photograph by A. Kazaryan)

Цоколь церкви, поставленный на ступень, соответствующую уровню внутреннего настила, представляет собой кольцо высотой 0,63 м, увенчанное простым карнизом высотой 0,5 м. С этого карниза

начинается внешний 19-гранник стены восьмиэкседрового храма. С карниза начинаются и пилястры ордера в виде спаренных полуколонок, причем их базы слегка выдвинуты по отношению к внешней границе карниза. Аналогичное решение при более высоком и профилированном цоколе чуть ранее реализовано в ротондах Хцконка и Мармашена. В контексте рассматриваемой в статье проблематики можно отметить, что цоколь, воспринятый от форм подиумов античных храмов (в Армении нам хорошо известен периптер римского типа в Гарни, вероятно, II в. н. э.), служит для визуального обозначения основания церкви Спасителя, но на самом деле является нижней частью стены.

Более ранний пример кольцеобразного цоколя с карнизом — руинированная церковь Святой Рипсиме у юго-восточного угла кафедрального собора при католикосе Саргисе (992–1019), предположительно после завершения собора в 1000 г. [17]. Ранее такая архитектурная идея воплощена в церкви Зоравад близ Егварда (670-е гг.).

Нам мало известно о фундаментах анийских церквей. Шурф у церкви Спасителя показал, что нижняя ступень цоколя была установлена на бутобетонный фундамент глубиной около 1 м, результаты исследования не опубликованы. Изучение фундаментов, связанное с археологической деятельностью, — дело будущего. Предстоит также выяснить, как устроены они внутри больших храмов, например Анийского собора. Соединяли ли они основания столбов со стенами? С большой долей уверенности можно предполагать наличие бутобетонного фундамента размерами в плане 3×3 м под каждым столбом собора¹.

Двухступенчатый стереобат, надо полагать, устроен на этом фундаменте. Это редкий случай устройства столь мощной конструкции в основе столба. Базы присутствовали под столбами церквей IV–VI вв., но в дальнейшем исчезли, за исключением профилированных баз храма Звартноц (641–661). Четырехстолпные крестово-купольные храмы VII в., к которым генетически восходит Анийский собор, не имеют никаких баз, и столбы как бы вырастают из земли. Возможно, масштаб произведения Трдата заставил его прибегнуть к отмеченному решению, подсказку которого зодчий мог почерпнуть из Эчмиадзинского собора. Именно там строительная история способствовала сложению необычной формы крестообразного двухступенчатого основания: нижняя ступень, вероятно, являлась базой столбов церкви IV в., а ступень, присутствующая над ней, была создана во время реконструкции здания в 480-х гг.

Сразу после возведения кафедрального собора или одновременно с последней стадией его заверше-



Рис. 4. Ани. Церковь Сурб Григор или Гагкашен. Подкупольный пилон и колонны (фотография автора, 2011 г.)

Fig. 4. Ani. Church of Surb Grigor or Gagkashen. Underdome pillar and the columns. Photograph by A. Kazaryan

ния в Ани Трдатом по образцу храма Звартноц основана церковь Святого Григория (Гагкашен), т.е. «построенная Гагиком» — следующим царем из рода Багратуни. В развалинах церкви при раскопках экспедиции Н.Я. Марра в 1905 и 1906 гг. обнаружен кольцевой ступенчатый цоколь с такими же высокими и неглубокого выступа ступенями, как в кафедрале. Унаследованная от Звартноца вся внутренняя ячейка в виде тетраконха, созданного четырьмя мощными подкупольными столбами и экседрами на аркадах, здесь приобрела подчеркнута вытянутые ввысь пропорции (рис. 4) [18].

Особо удлинены фусты колонн, что привело к критическому ослаблению тетраконха по направлениям его осей. Видимо, еще в период строительства или вскоре после его завершения вершины полукруглых были укреплены вводом новых пилонов, созданных в той же стилистике, но нарушивших изначаль-

¹ Сейчас на памятнике начинаются реставрационные работы. Будут ли произведены археологические шурфы, в том числе с целью изучения параметров фундамента, остается неизвестным, но автор, сотрудничающий с турецкими реставраторами по работам в Ани более 10 лет, надеется на то, что полученная в дальнейшем информация будет способствовать уточнению наших представлений.

ную композицию и почти перекрывавших кольцевой обход вокруг тетраконха. Идя на смелый эксперимент, Трдат осознавал степень опасности потери зданием устойчивости. Однако соблазн создания нигде доселе не встречавшегося невероятно возвышенного пространства был велик и, возможно, стимулировался заказчиком, который мог ставить перед зодчим цель превзойти величие кафедрального собора. Анализ показывает, что опытный архитектор Трдат, осознавая опасность потери устойчивости из-за придания интерьеру храма такой образности, компенсировал риски превращением внешней кольцевой стены из обычной ограждающей конструкции (в Звартноце толщиной 0,83 м), несущей нагрузку от свода обхода, в жесткий кожух, который должен был удерживать всю внутреннюю структуру от крайне опасных для нее горизонтальных подвижек. Только этим можно объяснить резкое утолщение стены Гагкашена по сравнению с сооружениями как своей эпохи, так и доарабского времени. Если в больших храмах VII в. толщина стен различается в пределах от 0,9 до 1,20 м, а в Анийском соборе равна около 1 м, то в Гагкашене она создана толщиной 1,31 м. Если к ней прибавить выступы пилястр внешней и внутренней аркатур, по 0,22 м, в сумме получим солидную величину конструкции в 1,75 м². Расширение стены по сравнению с храмом-образцом Звартноцем (диаметры этих ротонд почти совпадают — 32,65 м в Гагкашене и 33,9 м в Звартноце) осуществлено

за счет сужения пространства кольцевого обхода вокруг ядра тетраконха [19].

Руины храма царя Гагика позволяют детально исследовать элементы круглых колонн: 24 применены в аркадах основания экседры, по 6 в каждой, 4 — за подкупольными столбами, ориентированными в диагональных направлениях. Они были обмерены Т. Тораманяном сразу после раскопок храма. Их изучение на месте раскрывает некоторые особенности, полезные для понимания специфики анийской архитектурной школы посредством сравнения как с колоннами Звартноца, что неоднократно проводилось, так и с теми постройками первой половины XI в., в которых нашли применение круглые колонны. Это, прежде всего, жаматун (притвор) в монастыре Оромос (1038 г.) и церковь Спасителя в Ани (1035/6 г.). Как в Звартноце, так и в церкви Гагкашен воплощена восходящая к античности техника крепежа колонн к базам и капителям. Разрушенность этих колонн в обоих памятниках позволяет изучать поверхности, которыми элементы колонн примыкали друг к другу (в отличие от Оромоса, где сохранность колонн не позволяет заглянуть в соединения между элементами). На данных поверхностях, а именно тех, которые обращены кверху, присутствуют не только центральная выемка, куда вставлялся металлический штырь, но и канавки, по которым подавался расплавленный свинец, затекающий в выемку и закрепляющий штырь (рис. 5, а).



a



b

Рис. 5. Ани. Церковь Сурб Григор или Гагкашен. База колонны экседры тетраконха (а) и база диагональной колонны (b) (фотографии автора, 2015 г.)

Fig. 5. Ani. Church of Surb Grigor or Gagkashen. The column's base of the exedra of tetraconch (a) and the base of diagonal column (b) (photographs by A. Kazaryan)

² По результатам обмеров во время научной экспедиции 15–20 октября 2022 г. по программе гранта Российского научного фонда № 22-18-00354.

В нижней поверхности базы одной из диагонально направленной колонны, выходящей в пространство кольцевого обхода, имеются аналогичные пазы, но более широкие (около 5 см) и глубокие, в которых местами сохранился известково-песчаный раствор (рис. 5, б). Очевидно, что ставили базу на ровную поверхность, покрытую раствором, который проник в эти пазы, обеспечивая сцепку между поверхностями. Поскольку в остальных местах не найдено кусочков свинца, можно предположить, что вместо него в Гагкашене применялся жидкий раствор на основе извести. Не исключено, что именно поэтому центральные выемки для штырей значительно шире их. Вряд ли для заливки свинцом мастера вытаскивали выемки диаметром более 10 см. Поднятый впервые этот вопрос требует специального исследования с дополнительной проверкой и уточнением размеров элементов колонн на месте.

Если в Звартноце фуст колонны экседр тетраконха создавался из одного блока (диаметр 59 см), то при большей высоте колонн в Гагкашене, достигающих 7 м, мастера прибегали к соединению двух-трех цилиндрических блоков. Колонны в диагональных направлениях были еще выше, и их фусты состояли, вероятно, из четырех блоков, в отличие от двухблочных звартноцевских, диаметром 81,5 см. Это обстоятельство свидетельствует не в пользу заботы о надежной устойчивости постройки Трдата. Ненадежность архитектурной композиции храма и слабость его некоторых узлов ученые отмечают уже более века [20; 21, с. 64–66]. В последний раз на это указывал Р. Оустерхаут, подчеркивая, что, успешно восстановив купол Святой Софии, Трдат не проявил себя умелым конструктором при строительстве Гагкашена, поскольку вскоре после завершения строительства начались вынужденные мероприятия по укреплению церкви [22, с. 462; 23].

На некоторых фустах Гагкашена сохранились выступы для ухватки и переноса блока. Их не стесали строители по завершении работ. Эти детали представляют интерес с точки зрения технологии подъема и установки колонны.

Внимания заслуживают и пристенные колонны. Традиционно в Армении развивался тип пристенных полуколоннок, одиночных или спаренных, выступающих наполовину или на три четверти круглого сечения. Они скульптурно вытесывались в блоках стеновой кладки, каждый фрагмент находился в пределах ряда кладки. В церкви Спасителя в Ани, как и в жаматуне Оромоса колонны созданы независимо от структуры стеновой кладки. Высокие, почти в полный цилиндр фусты содержат на тыльной стороне узкие и глубокие отростки, которые заходят в кладку стены, зажимаясь с двух сторон блоками и заходя в зону бутобетона. Если в Оромосе приземистые колонны созданы из одного блока, то в церкви Спасителя колонны высотой 6,80 содержали по два блока около 3 м каждый (рис. 6).



Рис. 6. Ани. Церковь Сурб Пркич (Спасителя). Колонны, примыкающие к пилонам между экседрами (фотография автора, 2012 г.)

Fig. 6. Ani. Church of Surb Prkich (Redeemer). Columns attaching to the pillars between exedrae (photograph by A. Kazaryan)

Опора на капители этих колонн подкупольных арок иллюзорна, поскольку арки, завершающие конхи этой восьмиекседровой церкви, не выдвинуты так далеко, и капители остаются свободным. Конструктивная роль колонн представляется иной: они продолжают со стороны интерьера ребра жесткости, формируемые кладкой и забутовкой между экседрами. В целом эти ребра вместе с мощным поясом кладки и двумя кольцами карнизов (внутреннего карниза и внешнего) составляют каркас основного объема здания. На высоте более 11 м композицию этого восьмиконха, по всем параметрам соответствующей ротонде, венчает купольная глава с высоким барабаном и пролетом 10,51 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анийские мастера избрали особый путь развития: 1) традиционной техники кладки стены и столбов с неразрывно связанными тремя слоями: внешними каменными и внутренним бутобетонным; 2) круглых свободно стоящих и пристенных колонн.

Наряду с общей поэтапной, с IV в. тенденцией сужения стены, уменьшения глубины блоков и относительного расширения зоны бутобетона в постройках анийских мастеров с последней четверти X в. происходит повышение рядов кладки стен до 1–1,5 м и кладки столбов более 2 м (Анийский кафедральный собор). В русле развития аркатурного ордера высокими вертикально ориентированными плитами выложены фасадные поверхности церквей 20–30-х гг. XI в., причем зодчим каждой постройки вводилось определенное количество рядов кладки для достижения высоты ордерной пилястры. Резкое повышение круглых колонн в церкви Святого Григория (Гагкашен) по сравнению с ее образцом — храмом VII в. Звартноц, приставленные к подкуполным пилонам

церкви Спасителя цилиндрические колонны высотой 6,80 м, в большей мере декоративный характер цоколей стен и другие особенности анийских памятников приводят к заключению о зависимости развития кладки, пропорций блоков и конструктивных элементов, главным образом, от архитектурного замысла, в основе которого лежит достижение определенного архитектурного образа.

Исследование состава известковой заливки сердцевины стен, качества туфа/туфовой лавы, используемой при изготовлении блоков, как и расчетные характеристики конструкций, не рассматривались в настоящей статье и требуют совместного изучения со специалистами по строительным материалам и каменно-бетонным конструкциям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Март Н.Я.* Ани. Книжная история города и раскопки на месте городища. Л. ; М. : Государственное социально-экономическое издательство, 1934. 133 с.
2. *Penoni F.* The Armenian architectural heritage in Turkey: The state of research // *Eurasiatica*. 2020. DOI: 10.30687/978-88-6969-469-1/008
3. *Watenpaugh H.Z.* Preserving the medieval city of Ani // *Journal of the Society of Architectural Historians*. 2014. Vol. 73. Issue 4. Pp. 528–555. DOI: 10.1525/jshah.2014.73.4.528
4. *Cuneo P.* L'architettura della scuola regionale di Ani nell'Armenia medievale. Roma : Accademia Nazionale dei Lincei, 1977. 80 p.
5. *Казарян А.Ю.* Столичная школа армянской архитектуры эпохи Багратидов. Новый обзор развития // *Вопросы всеобщей истории архитектуры*. 2017. № 1 (8). С. 87–116.
6. *Strzygowski J.* Die Baukunst der Armenier und Europa. Bd. 1. Wien : Schroll, 1918.
7. *Թորանանյան Թ.* Նյութեր հայկական ճարտարապետության պատմության (Тораманян Т. Материалы по истории армянской архитектуры. Т. 1. Ереван : Армфан, 1942).
8. *Токарский Н.М.* Архитектура Армении IV–XIV вв. Ереван : Армгосиздат, 1961. 486 с.
9. *Հարությունյան Վ., Նաիրանյան Գ., Գրիգորյան Ա.* Ճարտարապետական հուշարձանների վերականգնումը: Ուսումնական ձեռնարկ (Арутюнян В., Налбандян Г., Григорян А. Восстановление архитектурных памятников : учебное пособие. Ереван : Дар, 2003).
10. *Kazaryan A.* Architectural ideas and metamorphoses of technique in Ani school of Armenian architecture of Bagratid era // *Against Gravity: Building Practices in the Pre-Industrial World*. International conference. Philadelphia : University of Pennsylvania, 2015. URL: <https://www.sas.upenn.edu/ancient/masons/abstracts/Agudo/A-Kazaryan.html>
11. *Akçayöz V.* New Discoveries in Ani. Istanbul, 2018. Pp. 352–355.
12. *Donabédian P.* L'éclatante couronne de Saint-Serge : Le monastère de Xckōnk' [Khätzkonq] et le dôme en ombrelle dans l'architecture médiévale // *Revue des études Arméniennes*. 2018. Vol. 38. Pp. 195–355. DOI: 10.2143/REA.38.0.3285783
13. *Азатян Ш.* Армянские порталы с элементами античной декорации // *Вестник общественных наук*. 1972. № 4. С. 39–43.
14. *Kazaryan A.* The “Classical” trend of the Armenian Architectural School of Ani // *A Handbook to Classical Reception in Eastern and Central Europe*. 2017. Pp. 528–540. DOI: 10.1002/9781118832813.ch44
15. *Kazaryan A.* The Theme of a Domed Rotunda in Ani School of Armenian Architecture during the Bagratids' Era: Interpretation of the Classical Image // *DISEGNARECON*. 2020. Vol. 13. Issue 25.
16. *Kazaryan A., Özkaya İ.Y., Pontioğlu A.* The Church of Surb Prkich in Ani (1035). Part 1 : History and Historiography – Architectural Plan – Excavations of 2012 and Starting of Conservation // *RIHA Journal*. 2016.
17. *Akçayöz V.* New discoveries in Ani. Istanbul, 2018. Pp. 46–57.
18. *Թորանանյան Թ.* Չվարթնոց, Գազկաշեն (Тораманян Т. Звартноц, Гагкашен. Ереван : Советакан грох, 1984).
19. *Kazaryan A.* Architectural Image and Structural System: Two Churches of Ani in the Epoch of the Bagratids // *Proceedings of the 2nd International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations (AHTI 2020)*. 2020. DOI: 10.2991/assehr.k.200923.018
20. *Մարություն Տ.* Չվարթնոց և զվարթնոցատիպ տաճարներ (Марутян Т. Звартноц и храмы типа Звартноца. Ереван : Армгосиздат, 1963).

21. Թորամանյան Թ. Անիի Ս. Գրիգոր (Գազկաշեն) եկեղեցին (Тораманян Т. Ани. Церковь Св. Григория (Гагкашен). Ереван, 2014).

22. Ousterhout R.G. Eastern medieval architecture. Oxford University Press, 2019. DOI: 10.1093/oso/9780190272739.001.0001

23. Kazaryan A. Armenian architecture through the Pages of Robert G. Ousterhout's Book "Eastern Medieval Architecture: The Building Traditions of Byzantium and Neighboring Lands" // Actual Problems of Theory and History of Art. 2019. Vol. 9. Pp. 790–795. DOI: 10.18688/aa199-7-70

Поступила в редакцию 15 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 21 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 29 ноября 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: **Армен Юрьевич Казарян** — доктор искусствоведения, и. о. заведующего кафедрой основ архитектуры и художественных коммуникаций, академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 334677, Scopus: 57194429313, ResearcherID: T-7572-2017, ORCID: 0000-0002-8039-207X; KazaryanAYU@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Marr N.Ya. *Ani. Bookish History of the City, and the Excavations on the site*. Leningrad; Moscow, State Social-Economic Publ., 1934; 133. (rus.).

2. Penoni F. The Armenian architectural heritage in Turkey: The state of research. *Eurasiatica*. 2020. DOI: 10.30687/978-88-6969-469-1/008

3. Watenpaugh H.Z. Preserving the medieval city of Ani. *Journal of the Society of Architectural Historians*. 2014; 73(4):528-555. DOI: 10.1525/jsah.2014.73.4.528

4. Cuneo P. *L'architettura della scuola regionale di Ani nell'Armenia medievale*. Roma, Accademia Nazionale dei Lincei, 1977; 80.

5. Kazaryan A. Metropolitan school of Armenian architecture of the Bagratid period. A new surway of the development. *Questions of the History of World Architecture*. 2017; 1(8):87-116 (rus.).

6. Strzygowski J. *Die Baukunst der Armenier und Europa*. Bd. 1. Wien, Schroll, 1918.

7. Թորամանյան Թ. Նյութեր հայկական ճարտարապետության պատմության [Toramanian T. *Niuter haikakan tcartarapetutian patmutian. Materials on the history of Armenian architecture*. Vol. 1. Yerevan, Armfan Publ., 1942]. (arm.).

8. Tokarskii N.M. *Architecture of Armenia IV–XIV centuries*. Yerevan, Armgosizdat Publ., 1961; 486. (rus.).

9. Հարությունյան Վ., Նալբանդյան Գ., Գրիգորյան Ա. Ճարտարապետական հուշարձանների վերականգնումը: Ուսումնական ձեռնարկ [Harutyunyan V., Nalbandyan G., Grigoryan A. *Restoration of Architectural Monuments. A Handbook*. Yerevan, Dar Publ., 2003]. (arm.).

10. Kazaryan A. Architectural ideas and metamorphoses of technique in Ani school of Armenian architecture of Bagratid era. *Against Gravity: Building Practices in the Pre-Industrial World. International conference*. Philadelphia, University of Pennsylvania, 2015. URL:

<https://www.sas.upenn.edu/ancient/masons/abstracts/Agudo/A-Kazaryan.html>

11. Akçayöz V. *New Discoveries in Ani*. Istanbul, 2018; 352-355.

12. Donabédian P. L'éclatante couronne de Saint-Serge : Le monastère de Xckōnk' [Khätzkonq] et le dôme en ombrelle dans l'architecture médiévale. *Revue des études Arméniennes*. 2018 ; 38:195-355. DOI: 10.2143/REA.38.0.3285783

13. Azatian Sh. Armenian Portals with the Elements of Classical Decoration. *Lraber Hasarakakan Gituryanneri*. 1972; 4:39-43. (rus.).

14. Kazaryan A. The "Classical" Trend of the Armenian Architectural School of Ani. *A Handbook to Classical Reception in Eastern and Central Europe*. 2017; 528-540. DOI: 10.1002/9781118832813.ch44

15. Kazaryan A. The theme of a domed rotunda in Ani school of Armenian architecture during the Bagratids' Era: Interpretation of the Classical Image. *DISEGNARECON*. 2020; 13(25).

16. Kazaryan A., Özkaya İ.Y., Pontioğlu A. The Church of Surb Prkich in Ani (1035). Part 1: History and Historiography – Architectural Plan – Excavations of 2012 and Starting of Conservation. *RIHA Journal*. 2016.

17. Akçayöz V. *New Discoveries in Ani*. Istanbul, 2018; 46-57.

18. Թորամանյան Թ. Չվարթնոց, Գազկաշեն [Toramanian T. *Zvartnots, Gagkashen*. Yerevan, Sovetakan Grogh Publ., 1984]. (arm.).

19. Kazaryan A. Architectural Image and Structural System: Two Churches of Ani in the Epoch of the Bagratids. *Proceedings of the 2nd International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations (AHTI 2020)*. 2020. DOI: 10.2991/assehr.k.200923.018

20. Մարտիանյան Ս. Չվարթնոց և զվարթնոցատիպ սառարներ [Marutian T. *Zvartnots ev zvartnotsatip tatcharner (Zvartnots and Zvartnots-type churches)*. Yerevan, Haipethrat Publ., 1963]. (arm.).

21. Քորամանյան Թ. Անիի Ս. Գրիգոր (Գագկաշեն) եկեղեցին [Toramanian T. *St. Grigor (Gagkashen) Church of Ani*. Yerevan, 2014]. (arm.).

22. Ousterhout R.G. *Eastern Medieval Architecture*. Oxford University Press, 2019. DOI: 10.1093/oso/9780190272739.001.0001

23. Kazaryan A. Armenian architecture through the pages of Robert G. Ousterhout’s Book “Eastern Medieval Architecture: The Building Traditions of Byzantium and Neighboring Lands”. *Actual Problems of Theory and History of Art*. 2019; 9:790-795. DOI: 10.18688/aa199-7-70

Received October 15, 2022.

Adopted in revised form on November 21, 2022.

Approved for publication on November 29, 2022.

BIONOTES: **Armen Yu. Kazaryan** — Doctor in Art Study, Acting Head of the Department of Fundamentals of Architecture and Artistic Communications, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 334677, Scopus: 57194429313, ResearcherID: T-7572-2017, ORCID: 0000-0002-8039-207X; KazaryanAYU@mgsu.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 624.012.15:624.012.25
DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1638-1652

Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию армокаменных элементов

Дмитрий Николаевич Лазовский, Александр Михайлович Хаткевич

*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой
(ПГУ имени Евфросинии Полоцкой); г. Новополоцк, Республика Беларусь*

АННОТАЦИЯ

Введение. При расчетах каменных и армокаменных элементов рассматривают лишь предельную стадию перед разрушением, не учитывая нелинейность деформирования материалов и соответственно перераспределение усилий между кладкой и продольной арматурой в поперечных сечениях. Исследуется деформационный подход к расчету сопротивления сжатию армокаменных элементов. Он позволяет учитывать физическую нелинейность деформирования материалов армокаменных элементов.

Материалы и методы. Учет физической нелинейности базируется на использовании диаграмм деформирования при «сжатии – растяжении». Заданы аппроксимации диаграмм. Составлена выборка экспериментальных исследований наиболее характерных армокаменных элементов по данным, опубликованным в открытых источниках.

Результаты. Сформулированы предпосылки использования деформационного подхода к расчету армокаменных элементов. В качестве критерия расчета сопротивления сжатию в предельной стадии по прочности предложено принимать максимальное усилие, вычисляемое из условия совместности деформаций кладки и продольной стальной арматуры. Составлены алгоритмы расчета сопротивления сжатию и параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) армокаменных элементов на любом уровне нагружения.

Выводы. Предложенная методика расчета дает возможность на всех уровнях нагружения получать параметры НДС элементов произвольной формы поперечного сечения с любыми параметрами армирования и различными эксцентриситетами приложения продольных усилий. Предложен критерий расчета, позволяющий учесть перераспределение усилий в поперечном сечении армокаменных элементов. На выборке экспериментальных данных выполнена верификация методики расчета, показавшая хорошую сходимость теоретических и экспериментальных значений несущей способности и деформативности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: армокаменный элемент, деформационный подход, разрешающие уравнения, сопротивление сжатию, методика расчета, каменная кладка, нелинейность деформирования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лазовский Д.Н., Хаткевич А.М. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию армокаменных элементов // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1638–1652. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1638-1652

Автор, ответственный за переписку: Александр Михайлович Хаткевич, haalex83@yandex.ru.

Deformation approach to the calculation of compression resistance of reinforced stone elements

Dzmitry N. Lazouski, Aliaksandr M. Khatkevich

Saint Euphrosyne Polotsk State University; Novopolotsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. When calculating stone and reinforced stone elements, only the limiting stage before destruction is considered, the nonlinearity of deformation of materials and, accordingly, the redistribution of forces between masonry and longitudinal reinforcement in cross sections are not taken into account. A deformation approach to the calculation of compression resistance of reinforced stone elements is considered. It allows us to take into account the physical nonlinearity of deformation of materials of reinforced stone elements.

Materials and methods. Accounting for physical nonlinearity is based on using deformation diagrams under “compression – tension”. Approximations of diagrams are given. A sample of experimental studies of the most characteristic armoured stone elements has been compiled according to the data of studies published in open sources.

Results. The prerequisites for using a deformation approach to the calculation of reinforced stone elements are formulated. As a criterion for calculating the compression resistance at the ultimate strength stage, it is proposed to take the maximum force calculated from the condition of compatibility of deformations of masonry and longitudinal steel reinforcement. Algorithms for calculating the compression resistance and parameters of the stress-strain state of reinforced stone elements at any level of loading are compiled.

Conclusions. The proposed calculation method makes it possible to obtain the parameters of the stress-strain state of elements of arbitrary cross-section shape with any reinforcement parameters and various eccentricities of longitudinal force application at all loading levels. A calculation criterion is proposed to take into account the redistribution of forces in the cross-section of armoured stone elements. Verification of the calculation method was performed on a sample of experimental data, which showed good convergence of theoretical and experimental values of load-bearing capacity and deformability.

KEYWORDS: armoured stone element, deformation approach, resolving equations, compression resistance, calculation method, masonry, nonlinearity of deformation

FOR CITATION: Lazouski D.N., Khatkevich A.M. Deformation approach to the calculation of compression resistance of reinforced stone elements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(12):1638-1652. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1638-1652 (rus.).

Corresponding author: Aliaksandr M. Khatkevich, haalex83@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Использование арматуры в сочетании с каменной кладкой в элементах зданий и сооружений диктуется преимущественным желанием повысить их сопротивление сжатию и изгибу. Важная роль армирования заключается также в дополнительных связях и защите от прогрессирующего обрушения¹, поскольку дает возможность создать конструктивные системы с необходимым уровнем живучести за счет неразрезности и пластической деформативности.

Каменная кладка представляет собой монолитный композитный материал с гетерогенной структурой, состоящий из кладочных элементов, уложенных в заданном перевязкой порядке на растворе. Резко отличающиеся свойства кладочных изделий и раствора и их сложное взаимодействие в швах, локальные неравномерные деформации растворной постели, изгиб и срез кладочных изделий, наличие вертикальных швов определяют анизотропию прочностных и деформационных свойств кладки.

В направлении моделирования кладки как дискретного материала из физически нелинейных разномодульных составляющих достигнут определенный результат [1–8]. В то же время такое моделирование является достаточно сложной процедурой, не позволяет учесть многие, в том числе случайные, факторы, такие как изменчивость геометрии кладочных изделий и толщины швов, неплотность заполнения швов и усадка раствора и т.д.

Каменные и армокаменные элементы зданий и сооружений — это «массивные» тела, в которых чередующиеся объемы однородного вещества в виде кладочных изделий и растворных швов значительно меньше размеров их поперечных сечений. Под воздействием внешней нагрузки они испытывают, как

правило, сжатие (центральное) или сжатие с изгибом (внецентренное). При данных условиях моделирование кладки как гетерогенной структуры становится не всегда целесообразным [9].

Такая предпосылка позволяет применить идеализацию каменной кладки в виде замены ее гетерогенной структуры на однородную гомогенную среду с осредненными физико-механическими характеристиками, которые описываются нелинейными диаграммами деформирования. В направлении разработки критериев разрушения кладки как гомогенного материала известны работы [10, 11]. Общим вопросам учета физической нелинейности при расчете конструкций посвящены публикации [12–15]. Как однородная гомогенная среда каменная кладка исследуется также в ряде нормативно-технических документов^{2, 3, 4, 5} на протяжении многих десятилетий. Такая идеализация с точки зрения инженерных расчетов является оправданной, поскольку позволяет существенно упростить расчетные модели.

Известные методики расчета армокаменных элементов рассматривают лишь предельную стадию перед разрушением, не учитывают нелинейность деформирования материалов и соответственно перераспределение усилий между кладкой и продольной арматурой в поперечных сечениях. В общем случае

² ТКП 45-5.02-308-2017 (33020). Каменные и армокаменные конструкции. Строительные нормы проектирования. Взамен СНиП II-22-81 : введен 01.01.18. Минск : Минстрой-архитектуры, 2018. VIII, 111 с.

³ СП 5.02.01-2021. Каменные и армокаменные конструкции. Взамен ТКП 45-5.02-308-2017 (33020) : введен 01.04.2021. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2021. 116 с.

⁴ СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81* : введен 01.07.2021. М. : Стройинформ, 2021. 84 с.

⁵ ENV 1996-1-1: 1995. Eurocode 6: Design of masonry structures — Part 1-1: Rules for reinforced and unreinforced masonry. ENV 1996-1-1: 1995.

¹ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения : введен 06.01.2019. М. : Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018. 20 с.

сопротивление сжатию внецентренно нагруженного армокаменного элемента, соответствующее его несущей способности, определяется из уравнений равновесия внутренних и внешних усилий в предельной стадии. При этом фактически криволинейная эпюра нормальных напряжений кладки σ в сжатой зоне поперечного сечения в предельной стадии моделируется укороченной прямоугольной эпюрой без учета работы каменной кладки на растяжение или трапециевидной [16] с учетом работы каменной кладки на растяжение. Принимается гипотеза одновременного достижения расчетных значений прочности каменной кладкой и продольной арматурой в предельном состоянии по несущей способности. Поперечное армирование учитывается путем повышения прочности кладки при сжатии.

Замена криволинейной эпюры нормальных напряжений σ в сжатой зоне на прямоугольную либо трапециевидную, предположение о достижении продольной стальной арматурой расчетной прочности, повышение расчетной прочности каменной кладки при наличии поперечного армирования в предельной стадии дают положительные результаты оценки точности методики расчета для вычисления значений сопротивления сжатию армокаменных элементов для простых случаев армирования (расположение продольной стальной арматуры у сжатой и растянутой граней). Но такой *прочностной подход* не дает возможность оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) на эксплуатационной стадии работы армокаменного элемента, учесть реальное перераспределение усилий в поперечном сечении между каменной кладкой и продольной арматурой, в том числе распределенной по поперечному сечению, изменение деформационных свойств каменной кладки с поперечным армированием.

Цель данного исследования — попытка применения *деформационного подхода* для аналитического расчета сопротивления сжатию армокаменных элементов, учитывающего физическую нелинейность деформирования материалов в виде неармированной каменной кладки, кладки с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах и продольной стальной арматурой и позволяющего получать параметры НДС сжатых элементов на любой стадии работы под нагрузкой. Учет физической нелинейности в расчетах каменных кладок объективно является важным шагом в повышении точности расчетных моделей, что отмечалось в трудах [12–15, 17–19].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретической основой применения деформационного подхода к расчету сопротивления сжатию армокаменных элементов приняты метод сечений и общая деформационная модель, базирующаяся на использовании нелинейных диаграмм деформирования при «сжатии – растяжении» в совокупности

с законом распределения относительных деформаций по поперечному сечению рассчитываемых элементов.

Верификация методики расчета сопротивления сжатию армокаменных элементов выполнялась путем сопоставления:

- теоретических $N_{u,t}$, вычисленных по предлагаемой методике, значений сопротивления сжатию коротких армокаменных элементов в предельной стадии и соответствующих экспериментальных значений $N_{u,exp}$ из сформированной выборки исследований с учетом процедур, изложенных в приложении D ТКП EN 1990⁶;
- теоретических и экспериментальных параметров НДС в виде диаграмм деформирования продольной стальной арматуры, кладки наиболее сжатой и растянутой зон поперечного сечения коротких армокаменных элементов из сформированной выборки исследований.

Выборка экспериментальных исследований для верификации методики составлена по данным испытаний армокаменных элементов:

- с продольным и поперечным армированием в горизонтальных растворных швах и комбинированным армированием, проведенных В.А. Камейко [20, 21] на опытных образцах сечением $1,5 \times 2$ и 2×2 кирпича (серии обозначены II–X) из искусственных кладочных изделий (силикатного и керамического кирпича с прочностью при изгибе 2,23–3,59 МПа и при сжатии 11,58–14,0 МПа, определенной по методике⁷). В опытах использовался кладочный раствор заданного состава 1 : 0,15 : 4 (портландцемент : известковое тесто : песок, средняя прочность составила 6,38 МПа на кубиках с ребром 70,7 мм по методике⁸) и 1 : 3 (портландцемент : песок, средняя прочность — 18,6 МПа). Для заполнения ниш, в которых размещалась продольная арматура, и ее бетонирования применялся цементно-песчаный раствор состава 1 : 3 и тяжелый бетон с прочностью при сжатии 12,3 МПа. Продольное армирование выполнялось стержневой арматурой $\varnothing 12$ мм с пределом текучести $f_y = 300$ МПа, $\varnothing 16$ мм с $f_y = 228$ МПа, $\varnothing 9,7$ мм из стали с $f_y = 245$ МПа, определенным по методике⁹; сетки поперечного армирования изготавливались из про-

⁶ ТКП EN 1990-2011* (02250). Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций. Введен 01.04.15. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2015. VIII, 86 с.

⁷ ГОСТ 8462-85. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. Взамен ГОСТ 8462-75 : введен 01.07.1985. М. : Изд-во стандартов, 1985. 8 с.

⁸ ГОСТ 5802-1986. Растворы строительные. Методы испытаний. Взамен ГОСТ 5802-78 : введен 01.07.1986. М. : Изд-во стандартов, 1992. 22 с.

⁹ ГОСТ 12004-81. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение.

волокни Ø5 мм с $f_y = 594$ МПа. Стержни продольной арматуры изготавливались с отгибами, заходящими в сжатую зону на 15–30 см и размещаемыми в слое бетона. Для предотвращения возможной потери устойчивости сжатой арматурой и обеспечения ее совместной работы с каменной кладкой через каждые два ряда кирпича по высоте устраивались хомуты. Процент продольного армирования варьировался от 0 до 0,92 %, поперечного — от 0 до 1,04 %. Схемы армирования показаны на рис. 1;

• с продольным и поперечным армированием в горизонтальных растворных швах на опытных образцах из пиленого камня, проведенных А.Г. Фигуровым [22, 23] (серии обозначены Ф1–Ф7). Для из-

готовления образцов применялись кладочные изделия размером $20 \times 20 \times 40$ см с прочностью при сжатии⁷ 4,71 МПа на сложном растворе состава 1 : 0,3 : 4 (цемент : известь : песок). Для продольного армирования использовалась стальная арматура Ø11 мм с $f_y = 320$ МПа, Ø12 мм с $f_y = 283$ МПа, Ø16 мм с $f_y = 246$ МПа, Ø26 мм с $f_y = 360$ МПа. Совместная работа кладки и продольной арматуры обеспечивалась устройством хомутов через один ряд камней. Сетки поперечного армирования изготавливались из проволоки Ø6,45 мм с $f_y = 237$ МПа. Процент продольного армирования варьировался от 0 до 0,495 %, поперечного — от 0 до 1,09 %. Схемы армирования показаны на рис. 2;

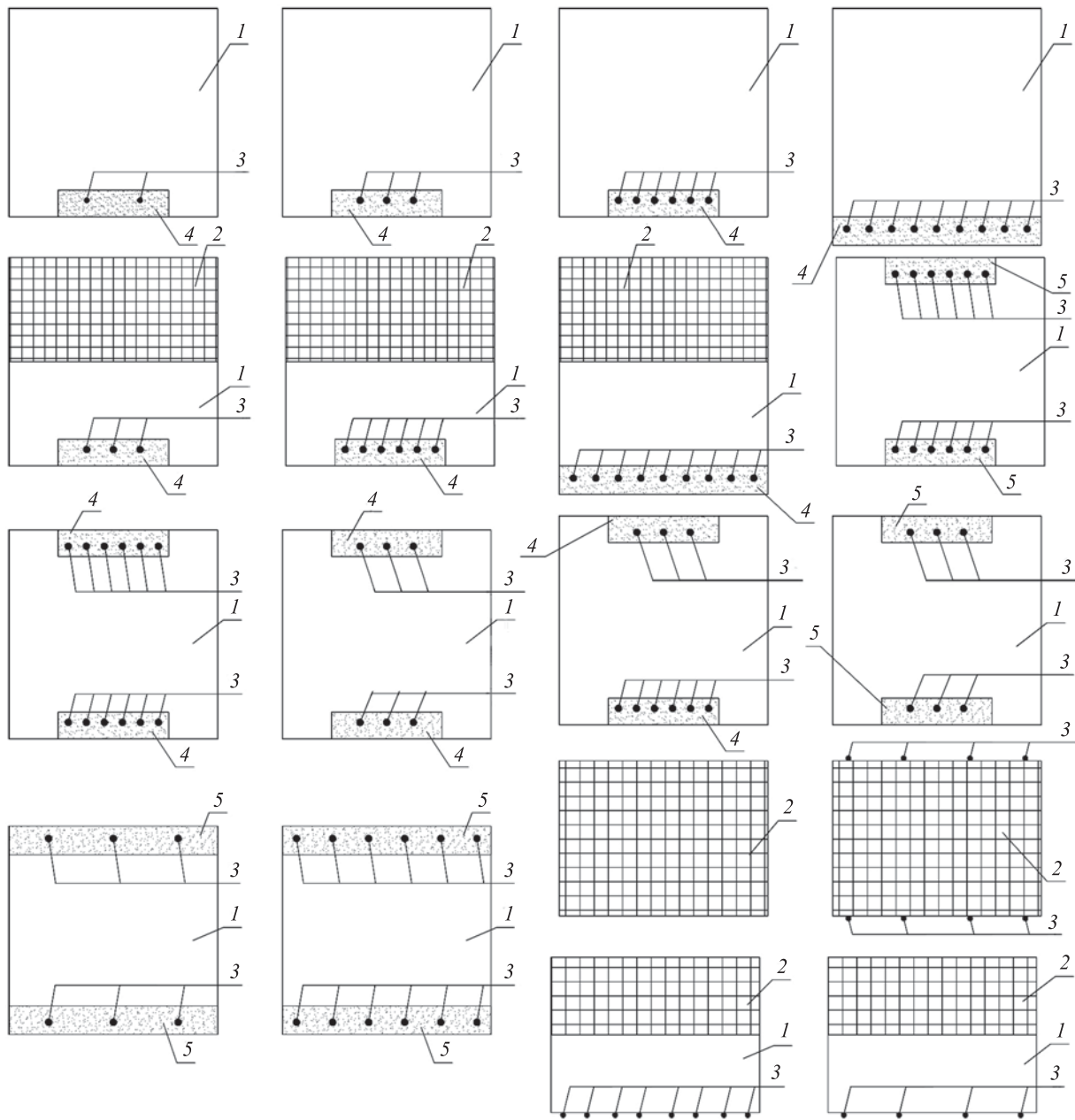


Рис. 1. Схемы армирования опытных образцов, опыты В.А. Камейко: 1 — каменная кладка; 2 — кладка с поперечным армированием; 3 — продольная арматура; 4 — раствор; 5 — бетон [20, 21]

Fig. 1. Reinforcement schemes of prototypes, experiments by V.A. Kameyko: 1 — masonry; 2 — masonry with transverse reinforcement; 3 — longitudinal reinforcement; 4 — mortar; 5 — concrete [20, 21]

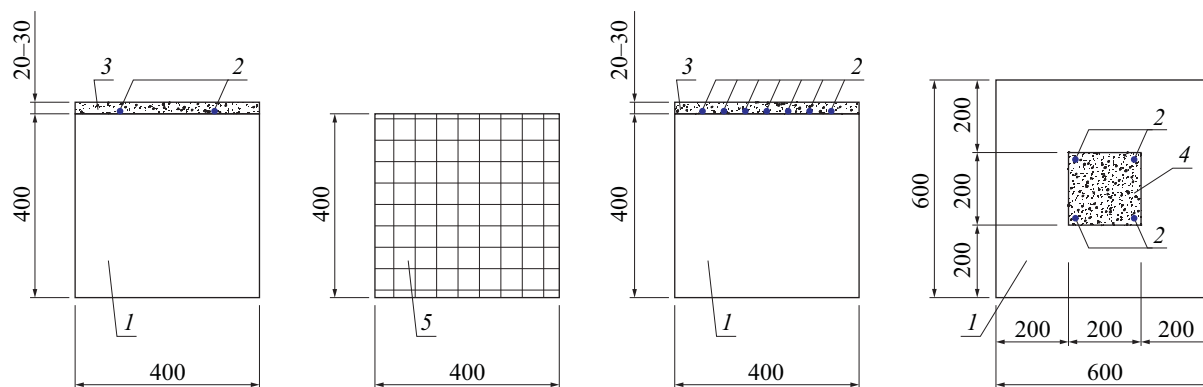


Рис. 2. Схема армирования образцов, опыты А.Г. Фигарова: 1 — каменная кладка; 2 — продольная арматура; 3 — раствор; 4 — бетон; 5 — кладка с поперечным армированием [22, 23]

Fig. 2. Scheme of reinforcement of samples, experiments of A.G. Figarov: 1 — masonry; 2 — longitudinal reinforcement; 3 — mortar; 4 — concrete; 5 — masonry with transverse reinforcement [22, 23]

• с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах на опытных образцах из искусственных кладочных изделий (керамического кирпича), проведенных Л. Drobies [24] (серии обозначены D, E, F) и авторами статьи (серии обозначены СII, СIII, CV, CVI, CVIII) [25]. Прочностные характеристики кладочных изделий, раствора и арматуры в исследованиях Л. Drobies принимались по результатам испытаний в соответствии с национальными стандартами^{10, 11, 12, 13, 14}. Процент поперечного армирования варьировался от 0,034 до 0,1 %. Для армирования использовались сетки и отдельные стержни из стали $\varnothing 1,2$; $\varnothing 3,75$; $\varnothing 5$ и $\varnothing 6$ мм. Опытные образцы в исследованиях, проведенных авторами, были изготовлены с помощью раствора заданного состава с прочностью при сжатии⁷ от 6,85 до 8,95 МПа и полнотелого кирпича: для серий СII, СIII средний предел прочности при сжатии составлял 16,7 МПа, при изгибе 4,21 МПа; для серий CV, CVI, CVIII средний предел прочности при сжатии — 24,1 МПа, при изгибе — 3,9 МПа. Испытания образцов кладочных изделий и раствора выполнялись на гидравлических прессах по^{7, 8}. Поперечное армирование выполнялось сетками из проволоки диаметром 4 мм с пределом текучести 509 МПа⁹. Процент поперечного армиро-

вания образцов серий СII, СIII составлял 0,4 %, серий CV, CVI, CVIII — 0,2 %.

Диаграмма деформирования σ - ϵ неармированной каменной кладки при одноосном напряженном состоянии и действии продольных сжимающих (растягивающих) усилий перпендикулярно горизонтальным растворным швам представляет криволинейную зависимость [9, 26–28]. Для удобства аналитического описания диаграмма деформирования характеризуется базовыми точками при сжатии ($\epsilon_{m1}; f_m$) и растяжении ($\epsilon_{t1}; f_t$), разделяющими восходящую и нисходящую ветви, углом наклона φ диаграммы к оси ϵ , зависящим от упругих свойств кладки (модуля упругости E_m) (рис. 3).

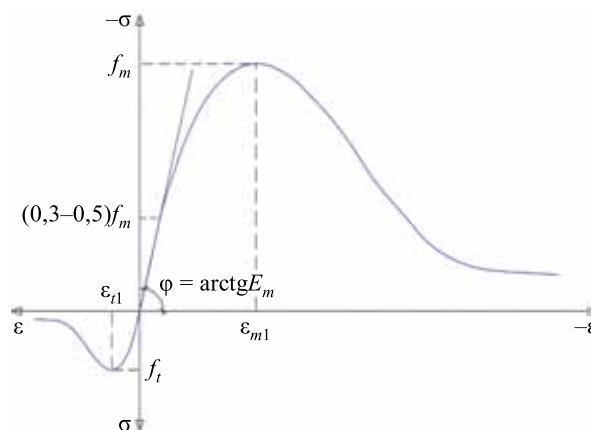


Рис. 3. Диаграмма деформирования каменной кладки при действии кратковременной статической нагрузки

Fig. 3. Diagram of masonry deformation under the action of short-term static load

Известны различные аппроксимации диаграмм деформирования кладки при сжатии. Логарифмические зависимости хорошо согласуются с экспериментальными данными, но не позволяют описать нисходящую ветвь. Во многих работах [14, 26, 28, 29]

¹⁰ PN-70/B-12016: Wyroby ceramiki budowlanej. Badania techniczne. PKN, Warszawa, 1970.

¹¹ PN-EN 772-1: Metody badań elementów murowych. Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie. PKN, Warszawa, 2003.

¹² PN-71/B-04500: Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych. PKN, Warszawa, 1971.

¹³ PN-EN 1015-11:2001: Metody badań zapraw do murów. Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy. PKN, Warszawa, 2001.

¹⁴ PN-91/H-04310. Próba statyczna rozciągania metali. PKN, Warszawa, 1991.

отмечается возможность аппроксимации диаграммы деформирования неармированной каменной кладки параболической зависимостью, традиционно используемой для описания диаграммы деформирования бетона. Использование одинаковых аппроксимаций диаграмм деформирования σ – ε для бетона и каменной кладки достаточно распространено [28–30], поскольку свойства этих материалов близки.

Нормы проектирования^{2, 3, 4, 5} не содержат аналитического описания диаграммы деформирования неармированной каменной кладки при сжатии, представляя лишь ее графическое изображение. Распространение ниспадающей ветви параболической диаграммы (позиция 1 на рис. 4) и горизонтального участка идеализированной параболически-линейной диаграммы (2 на рис. 4) ограничено значением ε_{mu} . Таким образом, нормы проектирования содержат деформационный критерий прочности (разрушения) кладки в виде предельной сжимаемости ε_{mu} , достижение которого свидетельствует о наступлении предельной стадии по прочности при сжатии. Аппроксимации диаграмм кладки с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах в нормативно-технической литературе отсутствуют.

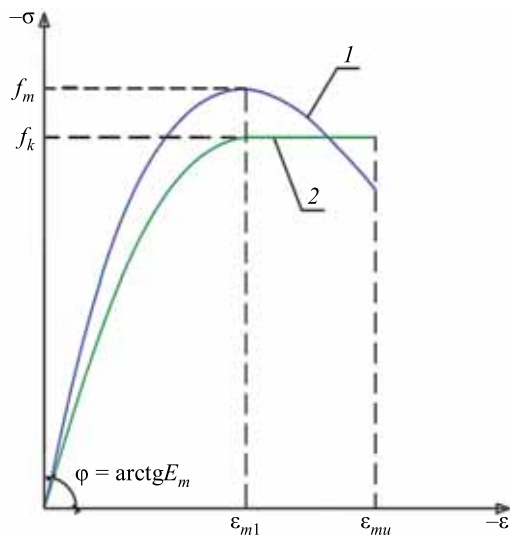


Рис. 4. Аппроксимации диаграммы деформирования каменной кладки при осевом кратковременном сжатии: 1 — параболическая; 2 — идеализированная параболически-линейная^{2, 3, 5}

Fig. 4. Approximations of the masonry deformation diagram under axial short-term compression according: 1 — parabolic; 2 — idealized parabolic-linear^{2, 3, 5}

Данные о диаграмме деформирования кладки при растяжении, а также о соответствующей прочности f_t содержатся в нормативно-технической литературе в крайне ограниченном объеме ввиду отсутствия единой стандартизированной методики получения характеристик каменной кладки при растяжении. В работах [31, 32] имеется информация о диаграммах деформирования кладки при растяже-

нии в виде билинейного графика и экспоненциальной функции.

Для учета физической нелинейности материалов неармированной каменной кладки и кладки с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах в виде сеток на основании анализа литературных источников в рамках выполненной попытки применения деформационного подхода предлагается использовать аппроксимации диаграмм деформирования σ – ε при сжатии и растяжении нелинейными параболическими функциями (рис. 5):

$$\begin{cases} \sigma = \left(2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{m1}} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{m1}} \right)^2 \right) f_m; \\ \sigma = \left(2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{mr1}} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{mr1}} \right)^2 \right) f_{mr}; \\ \sigma = \left(2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t1}} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t1}} \right)^2 \right) f_t, \end{cases} \quad (1)$$

где ε_{m1} (ε_{mr1}) и ε_{t1} — относительные деформации, соответствующие напряжениям f_m (f_{mr}) и f_t ; f_m и f_t — ординаты максимальных по абсолютной величине напряжений на диаграммах деформирования неармированной каменной кладки соответственно при осевом сжатии и растяжении; f_{mr} — ордината максимальных напряжений на диаграмме деформирования кладки с поперечным армированием.

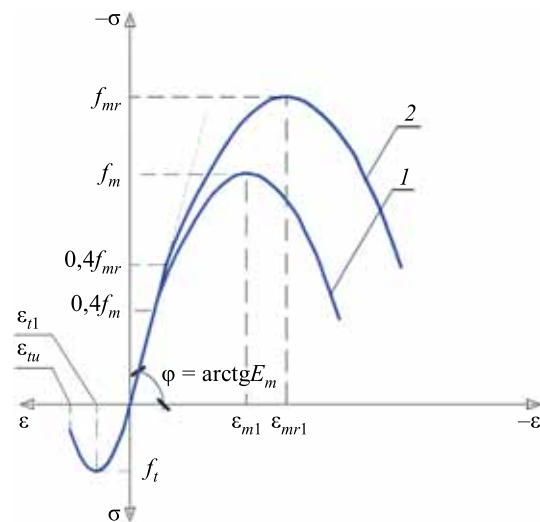


Рис. 5. Расчетные диаграммы деформирования неармированной каменной кладки 1 и кладки с поперечным армированием 2

Fig. 5. Calculated deformation diagrams of non-reinforced masonry 1 and masonry with transverse reinforcement 2

При верификации методики расчета значения напряжений f_m (f_{mr}) и деформаций ε_{m1} (ε_{mr1}) модуля упругости кладки E_m принимались по экспериментальным данным из соответствующей выборки испытаний значения f_t и ε_{t1} — по работам [31, 32].

Диаграмма деформирования арматуры $\sigma_s-\epsilon_s$ также представляет собой криволинейную зависимость. Участки диаграммы деформирования при сжатии и растяжении в расчетах элементов строительных конструкций традиционно принимаются одинаковыми.

Ввиду наличия упругой, упругопластической и пластической стадий деформирования математическое описание экспериментальных кривых $\sigma_s-\epsilon_s$ является достаточно сложной задачей. Тем не менее для аппроксимаций криволинейных диаграмм деформирования арматуры предложены различные математические зависимости [33, 34].

Опыт расчета железобетонных элементов¹⁵ показал, что в рамках применения общей деформационной модели использование точных аналитических зависимостей диаграмм деформирования арматуры $\sigma_s-\epsilon_s$ приводит к сильному усложнению процесса вычисления параметров НДС, не влияя существенным образом на точность расчетов для большинства инженерных задач. В связи с этим для аппроксимации диаграммы деформирования продольной стальной арматуры целесообразно использовать упрощенные кусочно-линейные зависимости, проходящие через основные базовые точки.

Для учета физической нелинейности продольной стальной арматуры в рамках выполненной попытки применения деформационного подхода к расчету сопротивления сжатию коротких армокаменных элементов диаграмма деформирования продольной стальной арматуры принималась как для упругопластического тела с ограниченной относительной деформацией при растяжении и сжатии (рис. 6).

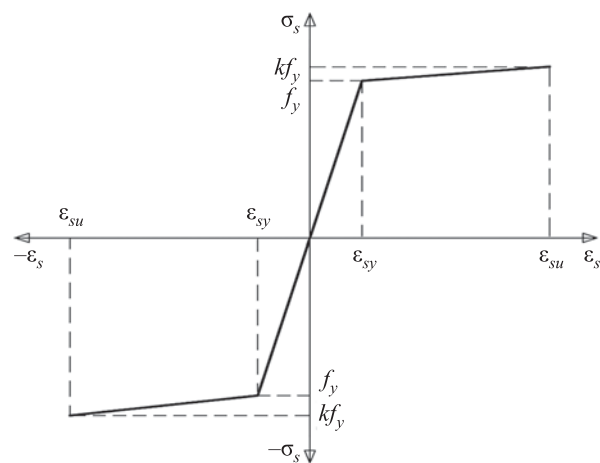


Рис. 6. Расчетная диаграмма деформирования продольной стальной арматуры

Fig. 6. Calculation diagram of deformation of longitudinal steel reinforcement

Деформационный критерий прочности (разрушения) в виде ограничения относительных деформаций арматуры ϵ_{su} широко применяется при расчетах строительных конструкций. Нормативами^{2, 3} при расчете сжатых армокаменных элементов предписывается принимать характеристики продольной стальной арматуры по нормам проектирования железобетонных конструкций, ограничивая при этом относительные деформации $\epsilon_{su} = \pm 10\%$.

При верификации методики для расчета теоретических значений $N_{u,t}$ сопротивления сжатию коротких армокаменных элементов:

- напряжения f_y принимались как средние значения напряжений, соответствующих пределу текучести, используемой для изготовления образцов стальной стержневой арматуры, по экспериментальным данным из выборки испытаний [20–23], МПа;
- относительные деформации ϵ_{sy} арматуры вычислялись как отношение предела текучести арматуры f_y к ее начальному модулю упругости E_s , определенному по экспериментальным данным из выборки испытаний [20–23].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчетная модель сопротивления сжатию армокаменных элементов разработана с использованием следующих предпосылок.

1. Короткий (несущая способность определяется его прочностью) армокаменный элемент может состоять из различных материалов в произвольной комбинации. В его поперечном сечении может быть неармированная каменная кладка, кладка с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах, продольная стальная арматура, которая в свою очередь может размещаться в бетоне, в растворе или снаружи кладки, либо в специальных нишах (бороздах). Поперечное сечение армокаменного элемента разбивается на элементарные слои (рис. 7, a) или площадки (рис. 7, b) площадью A_{mi} . В поперечном сечении расположено n стержней продольной стальной арматуры с площадью поперечного сечения A_{sj} .

2. Неармированная каменная кладка и кладка с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах рассматривается как однородный континуальный материал с осредненными физико-механическими характеристиками, описываемыми диаграммами деформирования.

3. Продольная стальная арматура армокаменного элемента работает совместно с ним на всех стадиях деформирования под нагрузкой, что обеспечивается специальными конструктивными мероприятиями на стадии возведения (устройство хомутов, заделываемых в горизонтальные швы, устройство отгибов в горизонтальные швы, заделка продольной арматуры в бетонных подушках оголовка и основания сжатого элемента). Физико-механические характеристики продольной стальной арматуры описываются диаграммами деформирования.

¹⁵ Блещик Н.П. и др. Железобетонные конструкции: основы теории, расчета и конструирования : учеб. пособие / под ред. Т.М. Пецольда, В.В. Тура. Брест : Брест. гос. техн. ун-т, 2003. 379 с.

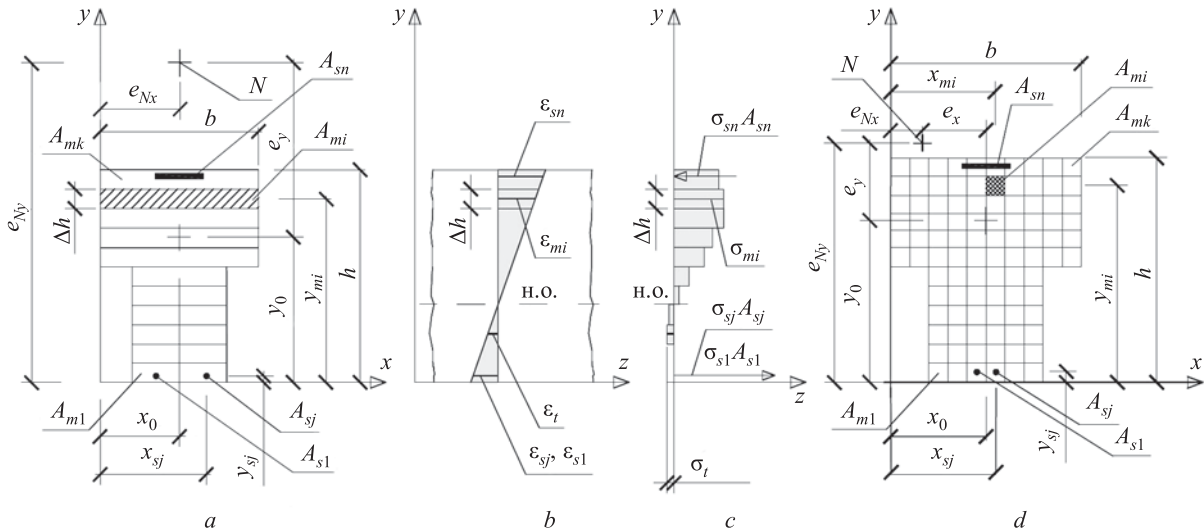


Рис. 7. Расчетная схема поперечного сечения армокаменного элемента: *a* — расчетное поперечное сечение при внецентренном сжатии ($e_y > 0$ и $e_x = 0$); *b* — распределение относительных деформаций; *c* — распределение нормальных напряжений; *d* — расчетное поперечное сечение при косом внецентренном сжатии ($e_y > 0$, $e_x > 0$)

Fig. 7. Design scheme of the cross section of the armoured stone element: *a* — calculated cross-section for off-center compression ($e_y > 0$ and $e_x = 0$); *b* — distribution of relative deformations; *c* — distribution of normal stresses; *d* — calculated cross-section for oblique off-center compression ($e_y > 0$, $e_x > 0$)

4. Расчетное поперечное сечение армокаменного элемента рассматривается как совокупность элементарных площадок (слоев), в пределах которых напряжения считаются равномерно распределенными, равными среднему значению напряжений на границах площадок (слоев).

5. Каждая элементарная площадка (слой) поперечного сечения элемента испытывает сжатие или растяжение.

6. Распределение относительных деформаций ϵ_z по поперечному сечению армокаменного элемента принимается линейным исходя из гипотезы плоских сечений. Строгое соблюдение гипотезы плоских сечений для конкретного поперечного сечения возможно для линейно-деформируемых материалов. Для каменных и армокаменных элементов аналогично железобетонным [35] подразумевается соблюдение

гипотезы плоских сечений для осредненных продольных деформаций ϵ_z на длине, включающей несколько рядов кладочных изделий. В данной постановке соблюдение гипотезы плоских сечений с достаточной для практики точностью подтверждено рядом экспериментальных исследований [22, 23, 36, 37] со сжатыми каменными и армокаменными элементами прямоугольного и таврового поперечных сечений. Нормы проектирования^{2,3,5} рассматривают гипотезу плоских сечений в качестве общего положения расчета сжатых и изгибаемых каменных и армокаменных элементов на всех уровнях нагружения.

Используя уравнения равновесия, условия распределения относительных деформаций по поперечному сечению, связь между напряжениями и деформациями, разрешающие уравнения для общего случая внецентренного сжатия имеют вид:

$$\epsilon_N \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} \right) + \frac{1}{r_x} \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0) \right) + \frac{1}{r_y} \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0) \right) - N = 0; \quad (2)$$

$$\epsilon_N \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0) \right) + \frac{1}{r_x} \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0)^2 + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0)^2 \right) + \frac{1}{r_y} \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)(x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0)(x_{sj} - x_0) \right) - N e_x = 0; \quad (3)$$

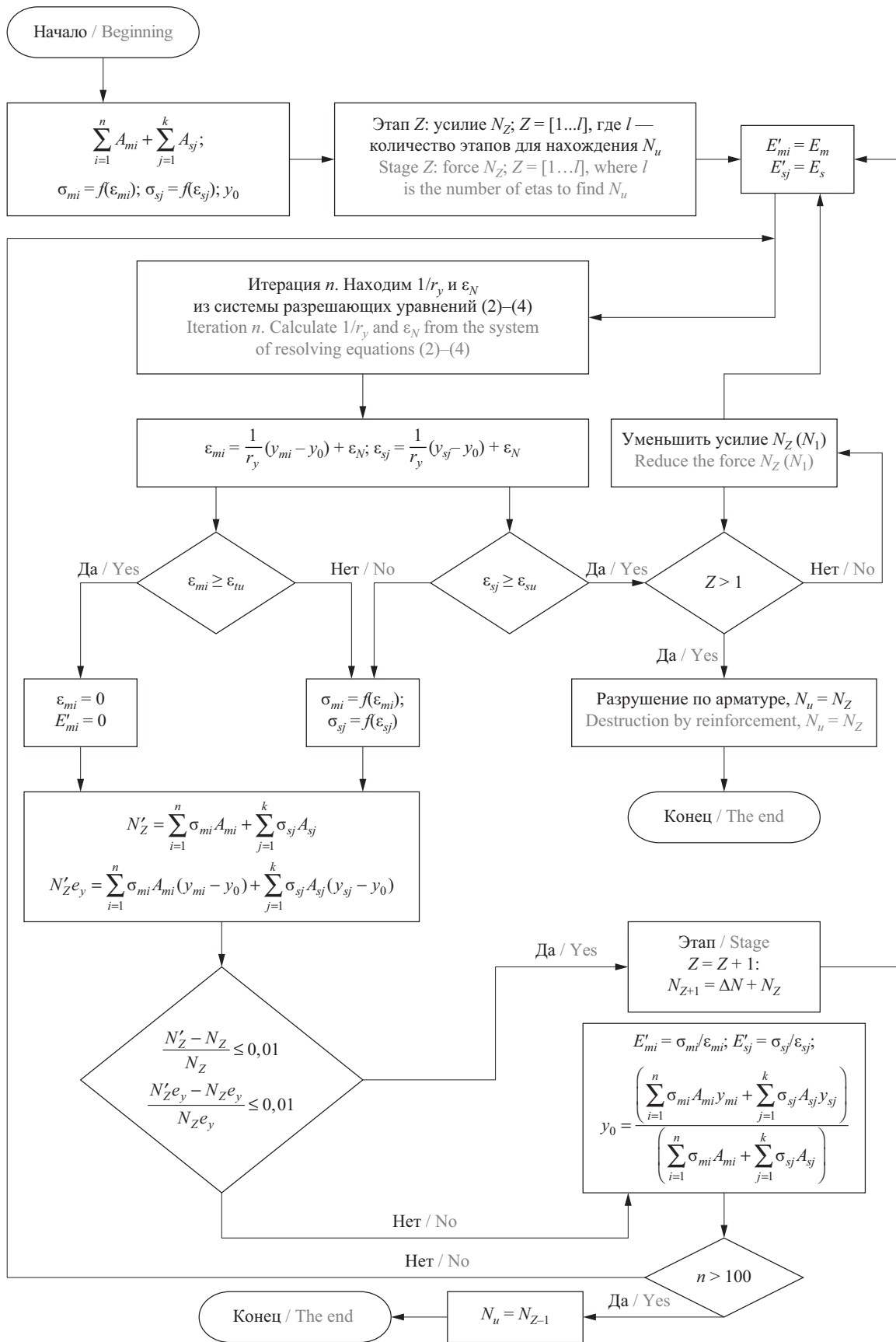


Рис. 8. Алгоритм расчета сопротивления сжатию короткого армокаменного элемента при простом внецентренном сжатии ($e_y > 0, e_x = 0$)

Fig. 8. Algorithm for calculating the compression resistance of a short armoured stone element with simple off-center compression ($e_y > 0, e_x = 0$)

$$\varepsilon_N \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0) \right) + \frac{1}{r_x} \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0) (y_{sj} - y_0) \right) + \frac{1}{r_y} \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)^2 + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0)^2 \right) - N e_y = 0, \quad (4)$$

где продольные относительные деформации на уровне центра тяжести поперечного сечения армокаменного элемента равны:

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj}}. \quad (5)$$

Для армокаменного элемента в качестве критерия расчета сопротивления сжатию N_u в предельной стадии по прочности *предложено* принимать максимальное усилие, воспринимаемое из условия совместности деформаций каменной кладки и продоль-

ной стальной арматуры, при котором объем эпюры нормальных напряжений достигнет своего максимального значения. При выполнении вычислений методом последовательных нагружений это выражается в максимальном значении продольного усилия N , при котором выполняются условия равновесия (2)–(4). Такой критерий позволит максимально учесть перераспределение усилий в поперечном сечении армокаменных элементов, состоящих из материалов с различными физико-механическими характеристиками, и расчетным путем определить предельные деформации сжатия $\varepsilon_{ми}$ материала кладки, как правило, превышающие нормируемые значения ее предельной сжимаемости.

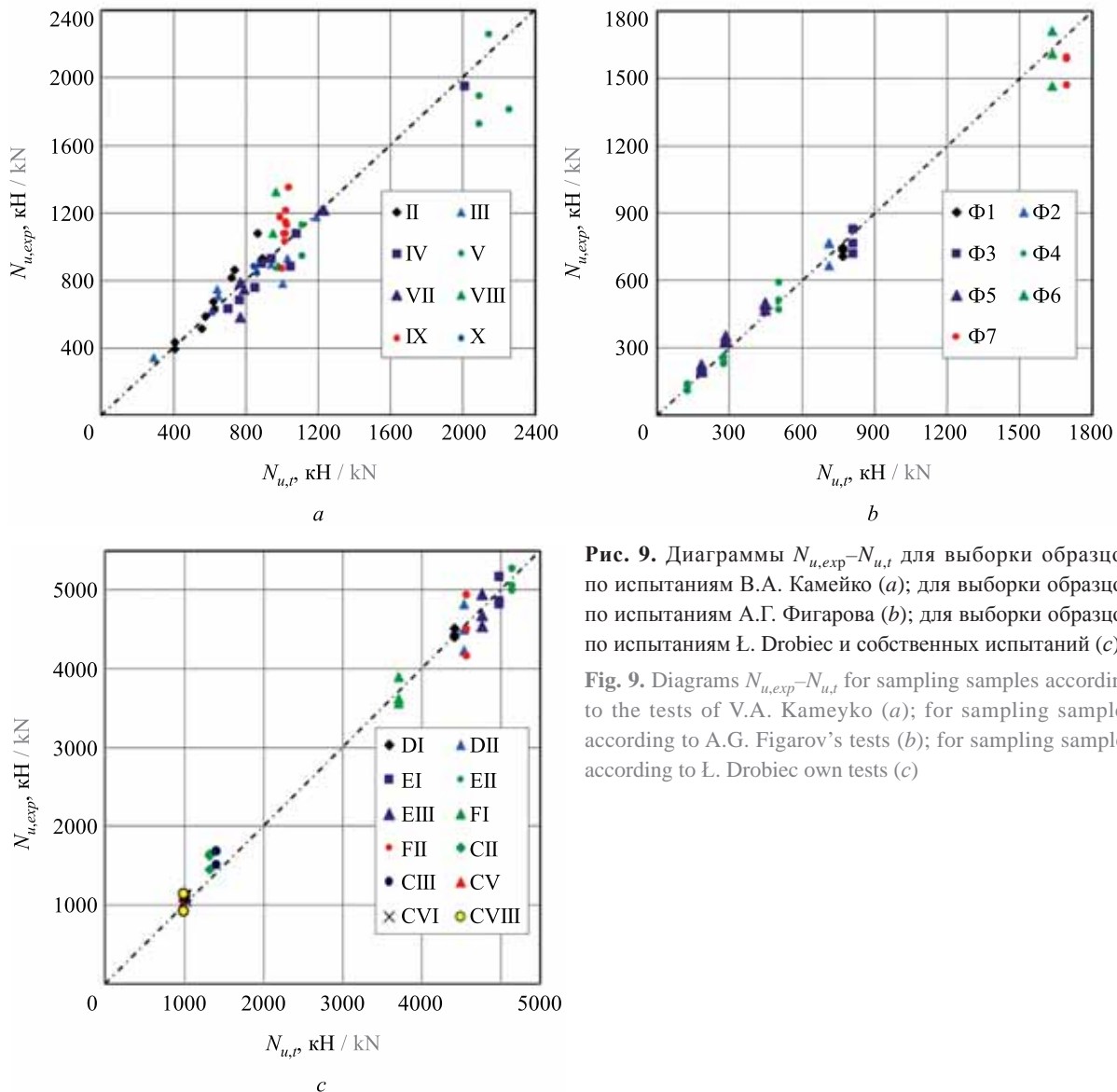


Рис. 9. Диаграммы $N_{u,exp}-N_{u,t}$ для выборки образцов по испытаниям В.А. Камейко (а); для выборки образцов по испытаниям А.Г. Фигарова (б); для выборки образцов по испытаниям Л. Drobiec и собственных испытаний (с)

Fig. 9. Diagrams $N_{u,exp}-N_{u,t}$ for sampling samples according to the tests of V.A. Kameyko (a); for sampling samples according to A.G. Figarov's tests (b); for sampling samples according to L. Drobiec own tests (c)

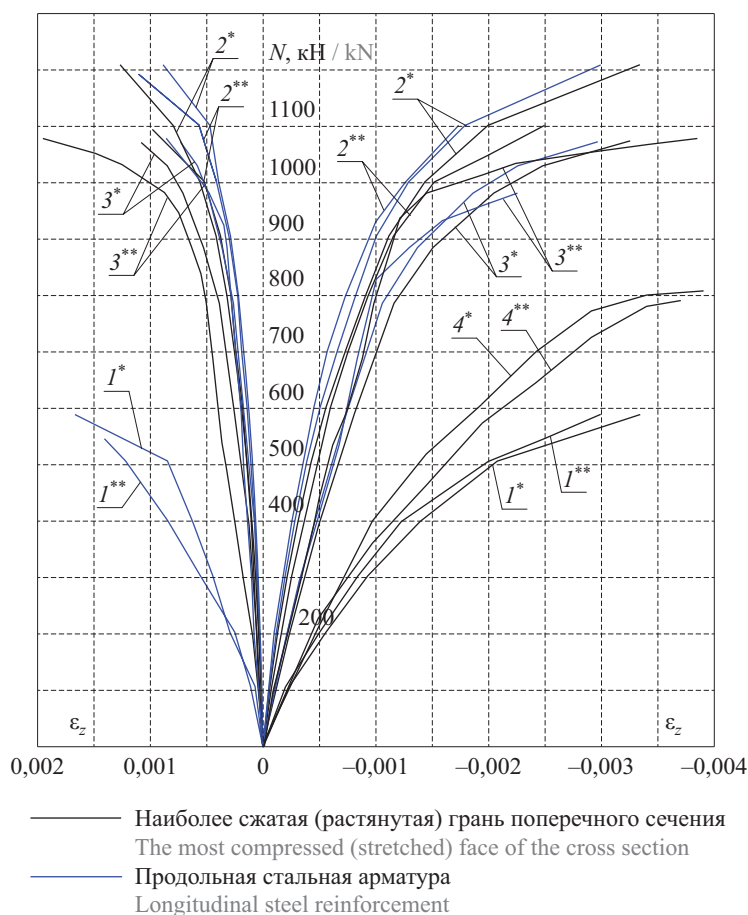


Рис. 10. Графики деформирования $N-\varepsilon_z$ продольной стальной арматуры, наиболее сжатой и растянутой граней наиболее характерных опытных образцов из сформированной выборки исследований: 1 — образец с одиночным продольным армированием; 2, 3 — образцы с двойным продольным армированием; 4 — образец со смешанным армированием; * — по предлагаемой методике расчета; ** — по экспериментальным значениям

Fig. 10. Graphs of deformation of $N-\varepsilon_z$ longitudinal steel reinforcement, the most compressed and stretched faces of the most characteristic prototypes from the formed sample of studies: 1 — sample with single longitudinal reinforcement; 2, 3 — samples with double longitudinal reinforcement; 4 — sample with mixed reinforcement; * — according to the proposed calculation method; ** — by experimental values

Алгоритмы расчета сопротивления сжатию армокаменных элементов, включая параметры их НДС на любом уровне нагружения, реализованы в программе Beta_K совместно с Д.О. Глуховым [38]. Алгоритм методики расчета сопротивления сжатию короткого армокаменного элемента на примере простого внецентренного сжатия показан на рис. 8.

Анализ результатов расчета показал хорошую сходимость, оценка которой выполнялась по методике⁶, теоретических $N_{u,t}$ и экспериментальных $N_{u,exp}$ значений сопротивления сжатию в предельной стадии коротких армокаменных элементов (рис. 9):

- по выборке опытных образцов испытаний В.А. Камейко величина коэффициента вариации вектора ошибок составила $V_b = 0,13$ при величине уклона прямой вероятностной модели сопротивления $b = 0,98$;
- по выборке опытных образцов испытаний А.Г. Фигарова величина $V_b = 0,11$ при $b = 0,96$;

- по выборке опытных образцов испытаний Ё. Drobies и собственных испытаний величина $V_b = 0,10$ при $b = 1,02$.

Сопоставление теоретически полученных по разработанной методике расчета графиков деформирования продольной стальной арматуры и кладки наиболее сжатой и растянутой граней позволяет сделать вывод об удовлетворительном описании предложенной расчетной моделью поведения армокаменных элементов под нагрузкой. На рис. 10 показаны теоретические и экспериментальные графики деформирования наиболее характерных коротких армокаменных элементов из выборки исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования показали применимость деформационного подхода к расчету сопротивления сжатию коротких армокаменных элементов,

который позволяет учитывать физическую нелинейность деформирования материалов в виде продольной стальной арматуры, неармированной каменной кладки и кладки с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах и получать параметры НДС элементов произвольной формы поперечного сечения с различными эксцентриситетами приложения продольных усилий на всех уровнях нагружения.

Предложенный критерий расчета сопротивления сжатию в предельной стадии по прочности в виде максимального усилия, воспринимаемого армокаменным элементом из условия совместности деформаций кладки и продольной стальной арматуры, дает возможность учесть перераспределение усилий на любой стадии работы до разрушения в поперечном сечении армокаменных элементов, состоящих из материалов с различными физико-механическими

характеристиками, и расчетным путем определять предельные деформации сжатия кладки, как правило, превышающие нормируемые значения ее предельной сжимаемости ε_{mu} .

Методика расчета сопротивления сжатию армокаменных элементов позволяет решать задачи в области проектирования для вновь возводимых элементов, для усиления существующих элементов, учитывать продольное и поперечное армирование в любом сочетании, рассчитывать элементы произвольной формы поперечного сечения с различными эксцентриситетами приложения продольных сжимающих усилий.

В дальнейшем следует рассмотреть вопросы учета длительности действия статической нагрузки, работы на растяжение каменной кладки между трещинами, особенности работы усиленных под нагрузкой армокаменных элементов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кабанцев О.В. Пластическое деформирование и разрушение каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния // Вестник МГСУ. 2016. № 2. С. 34–48. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.2.34-48
2. Капустин С.А., Лихачева С.Ю. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов с периодически повторяющейся структурой. Н.Новгород : Изд-во ННГАСУ, 2012. 96 с.
3. Пангаев В.В. О причинах разрушения многорядной каменной кладки при сжатии : монография. Новосибирск : Сибстрин, 2003. 72 с.
4. Иванов М.Л. Комплексный анализ процессов деформирования и разрушения элементов конструкций зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2013. 24 с.
5. Abdulla K.F., Cunningham L.S., Gillie M. Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach // Engineering Structures. 2017. Vol. 151. Pp. 349–365. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.021
6. Addessi D., Marfia S., Sacco E., Toti J. Modeling approaches for masonry structures // The Open Civil Engineering Journal. 2014. Vol. 8. Issue 1. Pp. 288–300. DOI: 10.2174/1874149501408010288
7. Bolhassani M., Hamid A.A., Lau A.C.W., Moon F. Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 83. Pp. 159–173. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.021
8. Sousa R., Guedes J., Sousa H. Characterization of the uniaxial compression behaviour of unreinforced masonry — Sensitivity analysis based on a numerical and experimental approach // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2015. Vol. 15. Issue 2. Pp. 532–547. DOI: 10.1016/j.acme.2014.06.007
9. Angelillo M., Lourenço P.B., Milani G. Masonry behaviour and modelling // Mechanics of Masonry Structures. 2014. Pp. 1–26. DOI: 10.1007/978-3-7091-1774-3_1
10. Page A.W. The biaxial compressive strength of brick masonry // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1981. Vol. 71. Issue 3. Pp. 893–906. DOI: 10.1680/iicep.1981.1825
11. Lishak V.I., Yagust V.I., Yankelevsky D.Z. 2-D Orthotropic failure criteria for masonry // Engineering Structures. 2012. Vol. 36. Pp. 360–371. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.11.033
12. Блохина Н.С. Проблема учета физической нелинейности при расчете строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2011. № 6. С. 384–387.
13. Блохина Н.С. Расчет конструкций из анизотропных материалов с применением физической нелинейности // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 1. С. 3–5.
14. Кашеварова Г.Г., Иванов М.Л. Натурные и численные эксперименты, направленные на построение зависимости напряжения от деформации кирпичной кладки // Приволжский научный вестник. 2012. № 8 (12). С. 10–15.
15. Анущенко А.М., Шишова М.А. Учет физической нелинейности при расчетах каменной кладки // IX Всероссийский фестиваль науки : сб. докл. в 2 т. 2020. С. 176–180.
16. Беленцов Ю.А. Усиление каменных стен и простенков с учетом упругопластической работы каменной кладки реконструируемых жилых зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2001. 24 с.

17. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчета : монография. М. : Изд-во АСВ, 2019. 194 с.
18. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Развитие методики расчета каменных и армокаменных конструкций // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции : мат. IV Междунар. (X Всерос.) конф. 2018. С. 174–183.
19. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Аналитическая оценка напряженно-деформированного состояния каменных кладок при сжатии на основе авторской теории // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 51–55. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-51-55
20. Камейко В.А. Исследование прочности и деформаций армокаменных сечений // Исследования по каменным конструкциям : сб. ст. 1950. С. 123–152.
21. Камейко В.А. Экспериментальное исследование прочности армированных кирпичных столбов // Исследования по каменным конструкциям : сб. ст. 1949. С. 157–190.
22. Фигаров А.Г. Прочность и упругие свойства неармированной и армированной кладки из пиленого известнякового камня Ашперонского полуострова // Исследования по каменным конструкциям : сб. ст. 1957. С. 248–268.
23. Поляков С.В., Измайлов Ю.В., Коноводченко В.И. и др. Каменная кладка из пильных известняков. Кишинев : Картя Молдовеняскэ, 1973. 344 с.
24. Drobiec Ł. Analiza murów z cegły pełnej ze zbrojeniem w spoinach wspornych, poddanych obciążeniom pionowym. Gliwice, 2004. 183 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.3742.0407
25. Лазовский Д.Н., Хаткевич А.М. Влияние вида сеток для поперечного армирования в горизонтальных растворных швах на напряженно-деформированное состояние коротких армокаменных элементов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2019. № 8. С. 93–100.
26. Kaushik H.B., Rai D.C., Jain S.K. Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression // Journal of Materials in Civil Engineering. 2007. Vol. 19. Issue 9. Pp. 728–739. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728)
27. Mohamad G., Lourenço P.B., Roman H.R. Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: review and prospects // Cement and Concrete Composites. 2007. Vol. 29. Issue 3. Pp. 181–192. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.11.003
28. Stavridis A., Shing P.B. Finite-element modeling of nonlinear behavior of masonry-infilled RC frames // Journal of Structural Engineering. 2010. Vol. 136. Issue 3. Pp. 285–296. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.116
29. Яременко Е.А., Яременко Н.А. Диаграммы деформирования бетона и каменной кладки // Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры. 2016. № 63. С. 103–109.
30. Costigan A., Pavia S., Kinnane O. An experimental evaluation of prediction models for the mechanical behavior of unreinforced, lime-mortar masonry under compression // Journal of Building Engineering. 2015. Vol. 4. Pp. 283–294. DOI: 10.1016/j.job.2015.10.001
31. Mohamad G. et al. Stress-strain behavior of concrete block masonry prisms under compression // Historical and Masonry Structures. Uminho Research Group.
32. Akhaveissy A.H. The DSC model for the nonlinear analysis of in-plane loaded masonry structures // The Open Civil Engineering Journal. 2012. Vol. 6. Issue 1. Pp. 200–214. DOI: 10.2174/1874149501206010200
33. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ерышев В.А. Расчетные зависимости для диаграммы деформирования арматуры с физической площадкой текучести // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2016. № 5 (365). С. 206–210.
34. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. М., 2000. 256 с.
35. Немировский Я.М. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с учетом работы растянутого бетона над трещиной и пересмотр на этой основе теории расчета деформаций и раскрытия трещин // Прочность и жесткость железобетонных конструкций : сб. науч. ст. 1968. С. 47–54.
36. Пильдши М.Я., Поляков С.В. Каменные и армокаменные конструкции зданий. 2-е изд., перераб. М. : Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1955. 400 с.
37. Камейко В.А. Прочность на сжатие кирпичной кладки с косвенным сетчатым армированием // Экспериментальные исследования каменных конструкций : сб. ст. 1939. С. 65–89.
38. Глухов Д.О., Хаткевич А.М. Метод расчета прочности сжатых каменных элементов по сечениям, нормальным к продольной оси // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2016. № 8. С. 73–79.

Поступила в редакцию 11 июля 2022 г.

Принята в доработанном виде 9 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 10 ноября 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Дмитрий Николаевич Лазовский** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций; **Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (ПГУ имени Евфросинии Полоцкой)**; 211440, Республика Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, д. 29; РИНЦ ID: 907311, Scopus: 5720341798; d.lazovski@psu.by;

Александр Михайлович Хаткевич — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций; **Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (ПГУ имени Евфросинии Полоцкой)**; 211440, Республика Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29; РИНЦ ID: 1041093; haalex83@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kabantsev O.V. Plastic deformation and fracture of masonry under biaxial stresses. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 2:34-48. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.2.34-48 (rus.).
2. Kapustin S.A., Likhacheva S.Yu. *Modeling of processes of deformation and destruction of materials with a periodically repeating structure*. Nizhniy Novgorod, Publishing House of NNGASU, 2012; 96. (rus.).
3. Pangaev V.V. *On the causes of the destruction of multi-row masonry during compression: monograph*. Novosibirsk, Sibstrin, 2003; 72. (rus.).
4. Ivanov M.L. *Complex analysis of the processes of deformation and destruction of structural elements of buildings : abstract. dis. ... candidate of technical sciences*. Nizhniy Novgorod, 2013; 24. (rus.).
5. Abdulla K.F., Cunningham L.S., Gillie M. Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. *Engineering Structures*. 2017; 151: 349-365. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.021
6. Addessi D., Marfia S., Sacco E., Toti J. Modeling approaches for masonry structures. *The Open Civil Engineering Journal*. 2014; 8(1): 288-300. DOI: 10.2174/1874149501408010288
7. Bolhassani M., Hamid A.A., Lau A.C.W., Moon F. Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages. *Construction and Building Materials*. 2015; 83:159-173. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.021
8. Sousa R., Guedes J., Sousa H. Characterization of the uniaxial compression behaviour of unreinforced masonry — Sensitivity analysis based on a numerical and experimental approach. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2015; 15(2):532-547. DOI: 10.1016/j.acme.2014.06.007
9. Angelillo M., Lourenço P.B., Milani G. Masonry behaviour and modelling. *Mechanics of Masonry Structures*. 2014; 1-26. DOI: 10.1007/978-3-7091-1774-3_1
10. Page A.W. The biaxial compressive strength of brick masonry. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1981; 71(3):893-906. DOI: 10.1680/iicep.1981.1825
11. Lishak V.I., Yagust V.I., Yankelevsky D.Z. 2-D Orthotropic failure criteria for masonry. *Engineering Structures*. 2012; 36:360-371. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.11.033
12. Blokhina N.S. The problem of accounting for physical nonlinearity in the calculation of building structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 6:384-387. (rus.).
13. Blokhina N.S. Calculation of structures made of anisotropic materials using physical nonlinearity. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2012; 1:3-5. (rus.).
14. Kashevarova G.G., Ivanov M.L. Natural and numerical experiments aimed at building the stress-strain brickwork. *Privolzhsky Scientific Bulletin*. 2012; 8(12):10-15. (rus.).
15. Anushchenko A.M., Shishova M.A. Accounting for physical nonlinearity in calculations of masonry. *IX All-Russian Festival of Science: collection of reports in 2 volumes*. 2020; 176-180. (rus.).
16. Belentsov Yu.A. *Strengthening of stone walls and piers taking into account the elastic-plastic work of masonry of reconstructed residential buildings : abstract. dis. ... candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2001; 24. (rus.).
17. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. *Design of concrete, reinforced concrete, stone and reinforced stone elements and structures using diagram calculation methods : monograph*. Moscow, ASV Publishing House, 2019; 194. (rus.).
18. Sokolov B.S., Antakov A.B. Development of the method of calculation of stone and the reinforced designs. *New in architecture, design of building structures and reconstruction : materials of the IV International (X All-Russian) conference*. 2018; 174-183. (rus.).
19. Sokolov B.S., Antakov A.B. Analytical assessment of the stress-strain state of stone masonry under compression on the basis of the author's theory. *Construction Materials*. 2019; 9:51-55. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-51-55 (rus.).

20. Kameyko V.A. Investigation of strength and deformations of armoured stone sections. *Research on Stone Structures : collection of papers*. 1950; 123-152. (rus.).
21. Kameyko V.A. Experimental study of the strength of reinforced brick pillars. *Research on Stone Structures : collection of papers*. 1949; 157-190. (rus.).
22. Figarov A.G. Strength and elastic properties of non-reinforced and reinforced masonry from sawn limestone stone of the Ashperon peninsula. *Research on Stone Structures : collection of papers*. 1957; 248-268. (rus.).
23. Polyakov S.V., Izmailov Yu.V., Konovodchenko V.I. et al. *Masonry from sawn limestones*. Chisinau, Kartya Moldovenyaske, 1973; 344. (rus.).
24. Drobiec Ł. *Analiza murów z cegły pełnej ze zbrojeniem w spoinach wspornych, poddanych obciążeniom pionowym*. Gliwice, 2004; 183. DOI: 10.13140/RG.2.1.3742.0407
25. Lazovski D., Khatkevich A. Influence of the grids type for transverse reinforcement in horizontal mortar joints on the stressed-deformed state of short reinforced stone elements. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2019; 8:93-100. (rus.).
26. Kaushik H.B., Rai D.C., Jain S.K. Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007; 19(9):728-739. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728)
27. Mohamad G., Lourenço P.B., Roman H.R. Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: review and prospects. *Cement and Concrete Composites*. 2007; 29(3):181-192. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.11.003
28. Stavridis A., Shing P.B. Finite-element modeling of nonlinear behavior of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering*. 2010; 136(3): 285-296. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.116
29. Yaremenko E.A., Yaremenko N.A. Diagrams of concrete and masonry deformation. *Bulletin of Odessa State Academy of Construction and Architecture*. 2016; 63:103-109. (rus.).
30. Costigan A., Pavia S., Kinnane O. An experimental evaluation of prediction models for the mechanical behavior of unreinforced, lime-mortar masonry under compression. *Journal of Building Engineering*. 2015; 4:283-294. DOI: 10.1016/j.job.2015.10.001
31. Mohamad G. et al. Stress-strain behavior of concrete block masonry prisms under compression. *Historical and Masonry Structures*. Uminho Research Group.
32. Akhaveissy A.H. The DSC model for the non-linear analysis of in-plane loaded masonry structures. *The Open Civil Engineering Journal*. 2012; 6(1): 200-214. DOI: 10.2174/1874149501206010200
33. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Eryshev V.A. Calculated according to the strain diagram of the reinforcement with a physical playground of strength. *Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*. 2016; 5(365):206-210. (rus.).
34. Madatyan S.A. *Reinforcement of reinforced concrete structures*. Moscow, 2000; 256. (rus.).
35. Nemirovsky Ya.M. Investigation of the stress-strain state of reinforced concrete elements taking into account the work of stretched concrete over a crack and revision on this basis of the theory of calculation of deformations and crack opening. *Strength and Rigidity of Reinforced Concrete Structures: collection of scientific articles*. 1968; 47-54. (rus.).
36. Pildish M.Ya., Polyakov S.V. *Stone and reinforced stone structures of buildings. 2nd ed., reprint*. Moscow, State Publishing House of Literature on Construction and Architecture, 1955; 400. (rus.).
37. Kameyko V.A. Compressive strength of brickwork with indirect mesh reinforcement. *Experimental Studies of Stone Structures : collection of papers*. 1939; 65-89. (rus.).
38. Hlukhau D., Khatkevich A. Application of the deformation method of calculation of durability of normal sections to the longitudinal axis of sections of compressed stone elements. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2016; 8:73-79. (rus.).

Received July 11, 2022.

Adopted in revised form on November 9, 2022.

Approved for publication on November 10, 2022.

B I O N O T E S : **Dzmitry N. Lazovski** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Structures; **Saint Euphrosyne Polotsk State University**; 29 Blokhina st., Novopolotsk, 211440, Republic of Belarus; ID RISC: 907311, Scopus: 5720341798; d.lazovski@psu.by;

Aliaksandr M. Khatkevich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural Engineering; **Saint Euphrosyne Polotsk State University**; 29 Blokhina st., Novopolotsk, 211440, Republic of Belarus; ID RISC: 1041093; haalex83@yandex.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.046.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1653-1663

Вероятностный анализ надежности деревянной стойки по критерию устойчивости при центральном сжатии

Сергей Александрович Соловьев, Юлия Александровна Инькова,
Анастасия Андреевна Соловьева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Обеспечение безопасности — приоритетная цель при проектировании, строительстве и эксплуатации строительных конструкций зданий и сооружений. Количественной оценкой безопасности может служить вероятность безотказной работы несущего элемента здания и сооружения. Выполнены исследование и анализ алгоритмов оценки надежности для деревянной стойки по критерию ее устойчивости при центральном сжатии.

Материалы и методы. Классическим подходом для решения многих задач по анализу надежности в инженерно-строительной сфере является метод FOSM (First Order Second Moment). В данном подходе применяются вторые статистические моменты случайных величин (математическое ожидание и дисперсия) и метод статистической линеаризации с разложением функции в ряд Тейлора первого порядка. Однако зачастую приходится иметь дело с нелинейными функциями предельного состояния, где метод статистической линеаризации может привести к неверным результатам. В этом случае необходимо использовать другие алгоритмы анализа надежности: алгоритм Хасофера – Линда, SORM (Second Order Reliability Method) и др.

Результаты. Рассмотрен численный пример анализа надежности деревянной стойки при центральном сжатии. В качестве случайных величин приняты размеры поперечного сечения стойки и прочность древесины, а нагрузка считается детерминированной величиной. Описан алгоритм расчета надежности деревянной стойки и при случайной нагрузке. Классический подход FOSM показал завышенный на 35 % индекс надежности по сравнению с результатами численного эксперимента методом Монте-Карло и аналитическим решением по алгоритму Хасофера – Линда.

Выводы. Применение традиционного метода FOSM для анализа надежности деревянных стоек по критерию устойчивости может приводить к завышенным оценкам индекса надежности, что недопустимо с точки зрения безопасности эксплуатации строительных конструкций. Расчет и анализ надежности деревянных стоек следует проводить на основе алгоритма Хасофера – Линда, метода SORM или других методов оптимизации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность, вероятность отказа, деревянная стойка, устойчивость, вероятностное проектирование, индекс надежности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Соловьев С.А., Инькова Ю.А., Соловьева А.А. Вероятностный анализ надежности деревянной стойки по критерию устойчивости при центральном сжатии // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1653–1663. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1653-1663

Автор, ответственный за переписку: Юлия Александровна Инькова, gubinaia@vogu35.ru.

Reliability analysis of compressed timber studs on the buckling criterion

Sergey A. Solovev, Yulia A. Inkova, Anastasia A. Soloveva

Vologda State University (VSU); Vologda, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Ensuring safety is a priority goal in the design, construction and operation of building and structures. A quantitative assessment of safety can be the failure probability of a structural element. The article presents algorithms for reliability analysis of timber studs by the buckling criterion under central compression force.

Materials and methods. The FOSM (First Order Second Moment) method is a classic approach for solving many reliability analyses tasks in the engineering sector. This method uses the second statistical moments of random variables (mathematical expectation and variance) and the method of statistical linearization with the decomposition of the function into a Taylor series of the first order. However, it is often necessary to deal with nonlinear limit state functions, where the statistical linearization method can lead to incorrect results. In this case, it is necessary to use other algorithms for reliability analysis: the Hasofer – Lind method, SORM (Second Order Reliability Method), etc.

Results. The numerical example of reliability analysis for compressed timber studs on the buckling criterion is considered. To illustrate the problem of the research, the dimensions of the cross-section of the studs and the strength of the wood are taken as random variables, and the load is considered a deterministic value. In the following, an algorithm for reliability analysis is described for a timber studs under random load. The classical FOSM approach showed an overestimated reliability index by 35 % compared to the results of the Monte Carlo numerical experiment and the analytical solution using the Hasofer – Lind algorithm.

Conclusions. The use of the traditional FOSM method for reliability analysis of wooden studs according to the buckling criterion can lead to overestimated reliability index estimates. It is unacceptable from the point of view of the structural safety. The calculation and analysis of the reliability of timber studs should be carried out on the basis of the Hasofer – Lind algorithm, the SORM method or other optimization methods.

KEYWORDS: reliability, failure probability, wooden stud, buckling, probabilistic design, reliability index

FOR CITATION: Solovev S.A., Inkova Yu.A., Soloveva A.A. Reliability analysis of compressed timber studs on the buckling criterion. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(12):1653-1663. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1653-1663 (rus.).

Corresponding author: Yulia A. Inkova, gubinaia@vogu35.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», надежность строительного объекта — это его способность выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации. Аналогичный термин приведен в Eurocode 0 «Basis of structural design» с примечанием, что «надежность обычно выражается в вероятностных терминах». Надежность строительных конструкций по действующим нормам и правилам обеспечивается за счет исполнения требований (критериев) для всех учитываемых предельных состояний при действии наиболее неблагоприятных сочетаний расчетных нагрузок.

Текущий подход к проектированию строительных конструкций позволяет проверить выполнение требований по обеспечению некоторого уровня надежности, но не дает возможность получить ее количественную оценку в вероятностных терминах. В исследовании [1] отмечается, что «несмотря на то, что можно получить очень подробные численные прогнозы при проектировании сооружений (на основе конечно-элементных моделей), эти результаты часто не достигают удовлетворительного уровня согласия с «реальностью», т.е. с действительным физическим поведением рассматриваемого континуума в эффективной эксплуатационной среде. Это несоответствие вызвано эпистемологической (сокращаемая неопределенность, вызванная недостатком знаний или данных) и алеаторной (несокращаемая неопределенность, возникающая из-за стохастической природы окружающей среды) неопределенностями модели». В работе [2] указывается, что «надежность любой конструкции является по существу конструктивным параметром, который должен вводиться в систему на этапе проектирования. При проектировании любой конструктивной системы следует иметь в виду, что ее рабочие характеристики и параметры являются вероятностными по своей природе. Очевидно, что факторы, определяющие прочность элементов и действующие на них нагрузки, также являются вероятностными. Это означает, что при оценке показателей надежности на этапе проектирования необходимо учитывать вероятностный характер параметров системы».

Гарантия безопасности — приоритетная цель при проектировании, строительстве и эксплуатации

строительных конструкций зданий и сооружений. Один из главных показателей безопасности строительных конструкций — их надежность. Обеспечение надежности подтверждается путем проверки критериев предельных состояний, предусмотренных нормами для данного типа конструкций.

Разработка современных методов прогнозирования срока службы проектируемых элементов и конструкций, т.е. обеспечение надежности строительного объекта, на сегодняшний день приобретает особую важность [3]. Изучение надежности строительных конструкций связано с вычислением и прогнозированием вероятности нарушения предельного состояния для спроектированной конструктивной системы на любом этапе ее эксплуатации в течение всего срока службы [4].

В настоящий момент надежность элементов деревянных конструкций (ДК) создается за счет использования коэффициентов надежности (в российских нормативных документах) и частных коэффициентов (в европейских стандартах). Метод расчета носит название полувариантного, так как частично физико-механические характеристики и нагрузки определяются с заданной обеспеченностью (вероятностью превышения), но затем умножаются или делятся на коэффициенты запаса. Опыт эксплуатации показывает, что такой подход позволяет создавать безопасные деревянные конструкции, но не дает возможность получить количественную оценку уровня их безопасности. Как отмечают авторы исследования [5], «по данным В.В. Большакова, в 1929 г. впервые (не только в СССР, но и за границей) были опубликованы технические условия и нормы проектирования деревянных конструкций (ДК). Обновлялись они довольно часто — в 1931, 1938, 1940 гг., т.е. через 2–7 лет. В последние годы у нас и в технически развитых зарубежных странах новые редакции норм выходили через 8–10 лет». На данный момент в РФ актуальным нормативным документом по расчету ДК является СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80» с Изменением № 3¹. Профессора

¹ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 с Изменением № 3 : утв. и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 23.12.2021 № 988/пр с 24.01.2022.

И.И. Ведяков и К.П. Пятикрестовский, внесшие значительный вклад в развитие норм расчета и проектирования, в том числе деревянных конструкций, указывают на предложения о включении в нормы проектирования расчетов на надежность и живучесть, основанных на совместной работе элементов и несущих каркасов [6].

Зимой 2005–2006 гг. на крышах домов в Центральной Европе скопилось много снега, а в Германии, Австрии и Польше произошло большое количество (>50) обрушений ДК крыш [7]. Некоторые из них привели к гибели людей и привлекли внимание средств массовой информации, которые зачастую описывают такие события как стихийные непредсказуемые бедствия. Однако, как пишут авторы труда [7], истина заключается в том, что конструкции должны быть спроектированы таким образом, чтобы выдерживать и экстремальные снеговые нагрузки. Одним из предлагаемых авторами [7] решений данной проблемы является использование прямой вероятностной модели снеговой нагрузки, а не ее максимального значения за расчетный период с последующим применением коэффициента запаса. Расчетами подобного характера оперирует такая наука, как теория надежности строительных конструкций.

Вопросы надежности и вероятностного проектирования несущих элементов строительных конструкций из древесины — предмет исследований многих ученых. Способы определения надежности элементов ДК с учетом вероятностной интерпретации коэффициента надежности по ответственности для разных законов распределения прочности и нагрузки приведены в публикации [8]. Прочность древесины, как правило, допускается описывать нормальным распределением вероятностей [9].

В исследовании [10] выполнен вероятностный анализ надежности элементов конструкций покрытий различных зданий и сооружений с учетом фактора изменчивости размеров поперечных сечений элементов по длине. Подчеркивается, что средний коэффициент вариации размеров (для древесины с небольшими биологическими повреждениями) прямоугольного поперечного сечения составляет 5 %, круглого поперечного сечения — 15 %. Для конструкций с высокой степенью износа коэффициент вариации поперечного сечения в среднем составляет 20 %, но может доходить до 40 %.

Построены вероятностные модели прогноза долговечности деревянных элементов зданий и сооружений [11]. Приведен вероятностный анализ моделей снижения прочности древесины со временем.

Одной из проблем анализа надежности является подбор эффективного алгоритма вычисления индекса надежности или вероятности безотказной работы для конкретной задачи. В математических моделях, близких к линейным, используется метод FOSM (First Order Second Moment) [12, 13].

Сегодня в научном сообществе развиваются перспективные подходы по изучению теории надежности строительных конструкций, которым посвящен ряд работ: методы машинного обучения в анализе надежности конструкций [14]; новый метод анализа надежности, основанный на модели Кригинга [15, 16]; метод комбинированной линейной выборки для анализа надежности конструкции [17]. Актуальным направлением в развитии теории надежности строительных конструкций также служит использование p -блоков [18, 19].

В данной работе предлагается рассмотреть проблему анализа надежности центрально-сжатой деревянной стойки по критерию ее устойчивости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Математическая модель предельного состояния:

$$\frac{N}{F_{\text{рас}}\varphi} \leq R_c, \quad (1)$$

где N — продольная нагрузка на стойку; $F_{\text{рас}}$ — расчетная площадь поперечного сечения; φ — коэффициент продольного изгиба элемента; R_c — прочность древесины при сжатии.

На рис. 1, а приведена расчетная схема исследуемой стойки. На рис. 1, б показан поперечный разрез стойки с указанием геометрических размеров поперечного сечения как случайных величин: \tilde{b} и \tilde{h} .

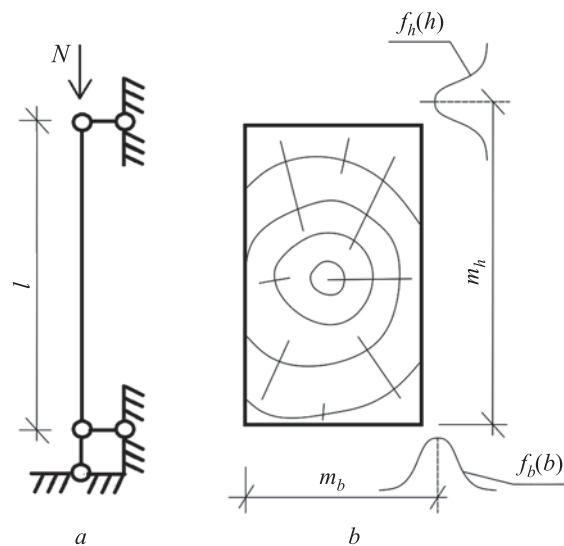


Рис. 1. Расчетная схема (а) и поперечный разрез (б) деревянной стойки

Fig. 1. The structural model (a) and cross-sectional plan (b) timber strut

По СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» коэффициент продольного изгиба $\varphi = 1 - 0,8(\lambda/100)^2$ для гибкости $\lambda \leq 70$.

Рассмотрим деревянную стойку квадратного поперечного сечения с шириной стороны b .

Тогда коэффициент продольного изгиба равен:

$$\varphi = 1 - 0,8 \left(\frac{l}{r100} \right)^2 = 1 - 0,8 \left(\frac{l}{0,289 \cdot b \cdot 100} \right)^2 = 1 - \frac{0,00097l^2}{b^2}.$$

Преобразуем математическую модель (1) к виду:

$$\frac{N}{(b^2 - 0,00097l^2)R_c} \leq 1, \text{ при } \lambda \leq 70. \quad (2)$$

Пусть необходимо выполнить оценку надежности стойки на детерминированную (постоянную) нагрузку N . С учетом случайных величин выражение (2) примет вид:

$$\frac{N}{(\tilde{b}^2 - 0,00097l^2)\tilde{\sigma}_{ult}} \leq 1, \quad (3)$$

где $\tilde{\sigma}_{ult}$ — предельное напряжение в древесине сжатия.

Сформируем функцию предельного состояния в виде:

$$g(\tilde{b}, \tilde{\sigma}_{ult}) = \frac{N}{(\tilde{b}^2 - 0,00097l^2)\tilde{\sigma}_{ult}} \leq 1 \quad (4)$$

или

$$g(\tilde{b}, \tilde{\sigma}_{ult}) = 1 - \frac{N}{(\tilde{b}^2 - 0,00097l^2)\tilde{\sigma}_{ult}} \geq 0. \quad (5)$$

Сначала рассмотрим классический подход к анализу надежности, получивший название FOSM. Статистические параметры функции (5) по FOSM можно определить по следующим формулам:

$$m_g = 1 - \frac{N}{(m_b^2 - 0,00097l^2)m_\sigma}; \quad (6)$$

$$S_g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial b} \right)^2 S_b^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ult}} \right)^2 S_\sigma^2}, \quad (7)$$

где m_b и m_σ — математические ожидания ширины поперечного сечения стойки и прочности древесины стойки, соответственно; S_b и S_σ — среднеквадратические отклонения ширины поперечного сечения стойки и прочности древесины стойки, соответственно.

В выражении (7) частные производные вычисляются так:

$$\frac{\partial g}{\partial b} = -\frac{2Nb}{(m_b^2 - 0,00097l^2)^2 m_\sigma},$$

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ult}} = -\frac{2N}{(m_b^2 - 0,00097l^2)(m_\sigma)^2}.$$

После вычисления параметров функции g можно рассчитать индекс надежности β стойки по формуле (для модели (1)):

$$\beta = m_g/S_g. \quad (8)$$

Рассмотрим пример. Пусть расчетная нагрузка $N = 60$ кН. Требуется оценить индекс надежности стойки длиной $l = 2,0$ м со следующими статистическими данными: $m_b = 0,1$ м, $S_b = 0,005$ м, $m_\sigma = 15 \cdot 10^6$ МПа, $S_\sigma = 2 \cdot 10^6$ МПа.

Математическое ожидание функции g по формуле (6) $m_g = 0,346$. Среднеквадратическое отклонение функции g по выражению (7) $S_g = 0,138$.

Тогда индекс надежности: $\beta = 0,346/0,138 = 2,507$. Вероятность безотказной работы при таком индексе надежности составляет $P = 0,9939$. С точки зрения частотного определения вероятности данную надежность можно трактовать как «на 1000 стоек придется около 6 отказов».

Для оценки корректности решения проверим его с помощью метода Монте-Карло путем моделирования псевдослучайных чисел в программе RTC MathCAD. Закон распределения примем нормальным, а статистические параметры случайных величин зададим из вышеуказанного примера. Сгенерированные пары значений $\tilde{\sigma}_{ult} - \tilde{b}$ представлены в осях на рис. 2. Также на рис. 2 приведен график функции предельного состояния:

$$\tilde{\sigma}_{ult}(\tilde{b}) = \frac{N}{(\tilde{b}^2 - 0,00097l^2)}.$$

Из 1000 сгенерированных пар значений за линией функции предельного состояния отложились 39 значений. Таким образом, с частотной точки зрения вероятности, надежность стойки при данных статистических параметрах равна $(1000 - 39)/1000 = 0,9610$. Индекс надежности при такой вероятности безотказной работы $\beta \approx 1,77$. Как видно из результатов расчета, для данной задачи оценка надежности по методу FOSM является завышенной.

Аналогичная проблема возникает и при анализе надежности по критерию устойчивости стоек круглого поперечного сечения со следующей математической моделью:

$$1 - \frac{4N}{(\pi \tilde{d}^2 - 0,00128l^2)\tilde{\sigma}_{ult}} \geq 0,$$

где d — диаметр сечения стойки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данная проблема связана с тем, что с помощью метода FOSM (также называемого MVFOSM — Mean Value FOSM) исходная сложная вероятностная задача преобразуется в простую. Благодаря методу FOSM устанавливается прямая взаимосвязь индекса надежности с основными параметрами (средним значением и стандартным отклонением) случайных величин

с помощью уравнения (8). В этом методе существует два серьезных недостатка.

1. Анализ надежности линеаризацией функции предельного состояния g с учетом только средних значений порождает ошибочные оценки для функций предельного состояния высокой степени нелинейности или в случае больших коэффициентов вариации. Это наглядно можно наблюдать при вычислении среднего значения функции g , полагая, что усечение разложения в ряд Тейлора для случая только одной случайной величины в первых трех членах равно:

$$g(X) \approx g(\mu_X) + (X - \mu_X) \times \nabla g(\mu_X) + \frac{(X - \mu_X)^2}{2} \nabla^2 g(\mu_X), \quad (9)$$

где μ_X — среднее значение случайной величины X .

Приближенное среднее значение функции предельного состояния будет выглядеть так:

$$\mu_g = E[g(\mu_X)] + E[(X - \mu_X) \nabla g(\mu_X)] + E\left[\frac{(X - \mu_X)^2}{2} \nabla^2 g(\mu_X)\right],$$

где E — математическое ожидание; ∇g — градиент функции g .

Откуда:

$$\begin{aligned} E[g(\mu_X)] &= g(\mu_X); \\ E[(X - \mu_X) \nabla g(\mu_X)] &= E[X \nabla g(\mu_X)] + E[\mu_X \nabla g(\mu_X)] = \\ &= \nabla g(\mu_X) E(X) - \mu_X \nabla g(\mu_X) = 0; \\ E\left[\frac{(X - \mu_X)^2}{2} \nabla^2 g(\mu_X)\right] &= \\ &= \frac{1}{2} \nabla^2 g(\mu_X) E[(X - \mu_X)^2] = \\ &= \frac{1}{2} \nabla^2 g(\mu_X) \text{Var}(X), \end{aligned} \quad (10)$$

где $\text{Var}(X)$ — дисперсия случайной величины X .

Из выражения (10) понятно, что третий член в правой части уравнения (9) связан с дисперсией и градиентами второго порядка функции предельного состояния $g(X)$. Соответственно, если дисперсия $g(X)$ близка к нулю или функция предельного состояния стремится к линейной, то третий член уравнения (9) можно игнорировать, а среднее значение функции $g(X)$ считать: $\mu_g \approx E[g(\mu_X)] = g(\mu_X)$. Такие предположения в иных случаях приведут к недостоверным результатам расчета, как показано в примере выше.

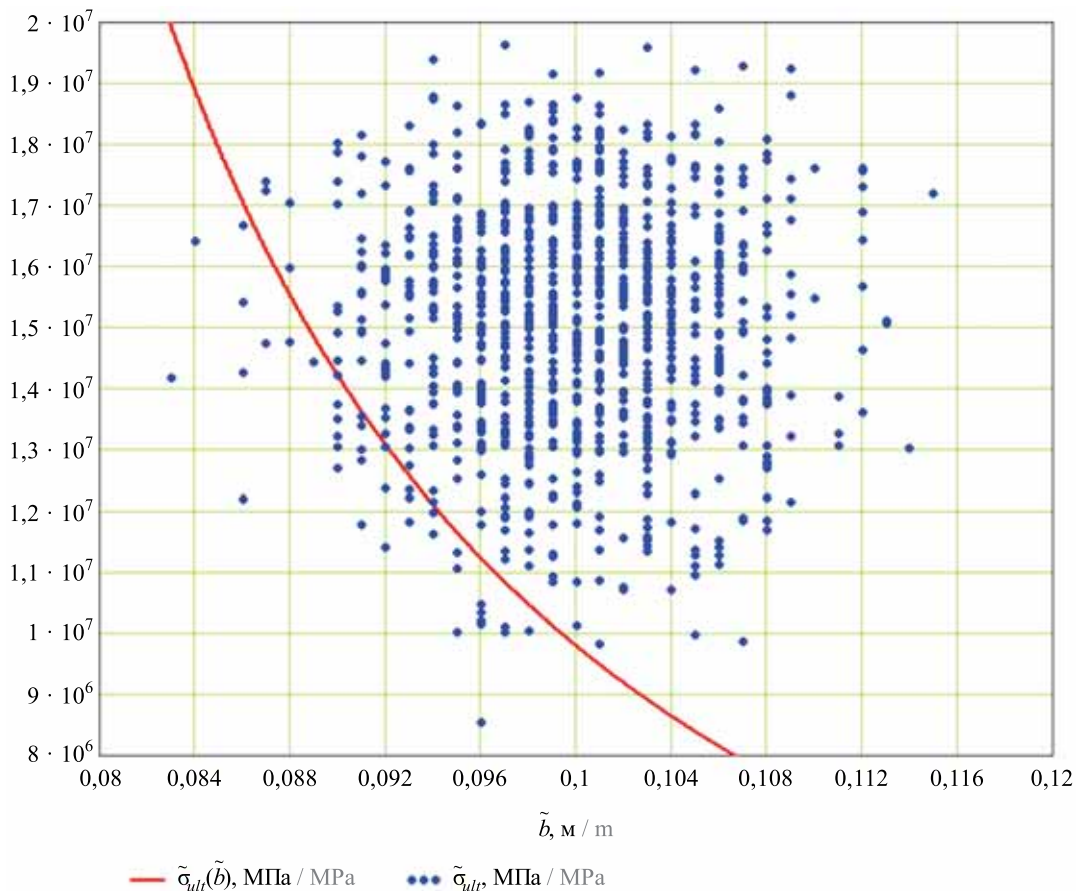


Рис. 2. Исследование надежности деревянной стойки методом Монте-Карло

Fig. 2. The reliability research timber strut Monte-Carlo method

2. Метод FOSM не может быть инвариантным при различных математически эквивалентных формулировках одной и той же задачи. Эта проблема появляется как для некоторых линейных зависимостей, так и для нелинейных функций предельных состояний $g(X)$.

Для преодоления этих недостатков необходимо использовать более продвинутые методы анализа надежности, например FORM или алгоритм Хасофера – Линда [20].

Введем обозначения $\tilde{b} = X_1$, $\tilde{\sigma}_{ult} = X_2$. Вычислим векторы:

$$\alpha_1 = -\frac{\left. \frac{\partial g}{\partial x_1} \right|_{m_X} S_{X_1}}{\sqrt{\left(\left(\frac{\partial g(m_{x_1}, m_{x_2})}{\partial x_1} \right) S_{x_1} \right)^2 + \left(\left(\frac{\partial g(m_{x_1}, m_{x_2})}{\partial x_2} \right) S_{x_2} \right)^2}} = -\frac{0,107}{0,138} = -0,775;$$

$$\alpha_2 = -\frac{\left. \frac{\partial g}{\partial x_2} \right|_{m_X} S_{X_2}}{\sqrt{\left(\left(\frac{\partial g(m_{x_1}, m_{x_2})}{\partial x_1} \right) S_{x_1} \right)^2 + \left(\left(\frac{\partial g(m_{x_1}, m_{x_2})}{\partial x_2} \right) S_{x_2} \right)^2}} = -\frac{0,087}{0,138} = -0,630.$$

Вычисляется новая расчетная точка X_2 из $x_i^* = \mu_{x_i} + \beta \sigma_{x_i} \cos \theta_{x_i}$, $i = 1, 2, \dots, n$:

$$x_{1,2} = m_{x_1} + \beta_1 S_{x_1} \alpha_1 = 0,1 + 2,507 \cdot 0,005(-0,775) = 0,090;$$

$$x_{2,2} = m_{x_2} + \beta_2 S_{x_2} \alpha_2 = 15 \cdot 10^6 + 2,507 \cdot 2 \cdot 10^6(-0,630) = 11,84 \cdot 10^6;$$

$$u_{1,2} = \frac{x_{1,2} - m_{x_1}}{S_{x_1}} = \frac{0,090 - 0,100}{0,005} = -2,00;$$

$$u_{2,2} = \frac{x_{2,2} - m_{x_2}}{S_{x_2}} = \frac{13,87 - 15,00}{2,0} = -1,58.$$

Итерация 2: вычисляется функция предельного состояния и ее градиент при X_2 :

$$g(x_{1,2}, x_{2,2}) = 1 - \frac{N}{(x_{1,2}^2 - 0,00097l^2)x_{2,2}} = -0,201,$$

$$\left. \frac{\partial g}{\partial x_1} \right|_{X_2} S_{X_1} = 0,256 \cdot \left. \frac{\partial g}{\partial x_2} \right|_{X_2} S_{X_2} = 0,203.$$

Вычисляется β , используя метод среднего значения, и его косинус направления α_i :

$$\beta_2 = \frac{g(X_2) - \sum_{i=1}^2 \left(\left(\frac{\partial g(X_2)}{\partial x_i} \right) S_{x_i} u_{i,2} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^2 \left(\left(\frac{\partial g(X_2)}{\partial x_i} \right) S_{x_i} \right)^2}} = \frac{-0,201 - 0,256(-2,00) - 0,203(-1,58)}{\sqrt{(0,256)^2 + (0,203)^2}} = 1,934.$$

Определяются новые направляющие векторы:

$$\alpha_1 = \frac{\left. \frac{\partial g}{\partial x_1} \right|_{m_X} S_{X_1}}{\sqrt{\left(\left(\frac{\partial g(m_{x_1}, m_{x_2})}{\partial x_1} \right) S_{x_1} \right)^2 + \left(\left(\frac{\partial g(m_{x_1}, m_{x_2})}{\partial x_2} \right) S_{x_2} \right)^2}} = -\frac{0,256}{0,327} = -0,783,$$

$$\alpha_2 = \frac{\left. \frac{\partial g}{\partial x_2} \right|_{m_X} S_{X_2}}{\sqrt{\left(\left(\frac{\partial g(m_{x_1}, m_{x_2})}{\partial x_1} \right) S_{x_1} \right)^2 + \left(\left(\frac{\partial g(m_{x_1}, m_{x_2})}{\partial x_2} \right) S_{x_2} \right)^2}} = -\frac{0,203}{0,327} = -0,621.$$

Рассчитывается новая расчетная точка X_3 :

$$x_{1,3} = m_{x_1} + \beta_2 S_{x_1} \alpha_1 = 0,1 + 1,934 \cdot 0,005(-0,783) = 0,092,$$

$$x_{2,2} = m_{x_2} + \beta_2 S_{x_2} \alpha_2 = 15 \cdot 10^6 + 1,934 \cdot 2 \cdot 10^6(-0,621) = 12,60 \cdot 10^6;$$

$$u_{1,2} = \frac{x_{1,3} - m_{x_1}}{S_{x_1}} = \frac{0,092 - 0,100}{0,005} = -1,6,$$

$$u_{2,2} = \frac{x_{2,2} - m_{x_2}}{S_{x_2}} = \frac{12,60 - 15,00}{2,0} = -1,2.$$

Вычисляется функция предельного состояния и ее градиент при X_2 :

$$g(x_{1,3}, x_{2,3}) = 1 - \frac{N}{(x_{1,3}^2 - 0,00097l^2)x_{2,3}} = -0,039;$$

$$\left. \frac{\partial g}{\partial x_1} \right|_{X_2} S_{X_1} = 0,208 \cdot \left. \frac{\partial g}{\partial x_2} \right|_{X_2} S_{X_2} = 0,165.$$

Вычисляется β , используя метод среднего значения, и его косинус направления α_i :

$$\beta_2 = \frac{g(X_2) - \sum_{i=1}^2 \left(\left(\frac{\partial g(X_2)}{\partial x_i} \right) S_{x_i} u_{i,2} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^2 \left(\left(\frac{\partial g(X_2)}{\partial x_i} \right) S_{x_i} \right)^2}} = \frac{-0,039 - 0,208(-1,60) - 0,165(-1,20)}{\sqrt{(0,208)^2 + (0,165)^2}} = 1,852.$$

Производится проверка сходимости индекса надежности:

$$\varepsilon = \frac{|\beta_2 - \beta_1|}{\beta} = \frac{1,934 - 1,852}{1,852} = 0,044.$$

Поскольку условие сходимости не выполняется $\varepsilon = 0,061 > \varepsilon_r = 0,005$, то итерации продолжаются.

Дальнейшие вычисления сведем в табличную форму (табл.).

При индексе надежности $\beta = 1,849$ вероятность безотказной работы составляет 0,9678.

На рис. 3 показана сходимость индекса надежности β к значению, близкому к экспериментальному β_{MC} при $n = 5$ итерациях.

Результаты итераций индекса надежности

Results of iterations of the reliability index

Итерация Iteration	1	2	3	4	5	6	7
$g(X_k)$	0,346	-0,201	-0,039	0,009	-0,008	0,005	0,007
β	2,507	1,934	1,852	1,849	1,850	1,849	1,849
ε	-	0,296	0,044	0,016	0,0005	0,0005	0

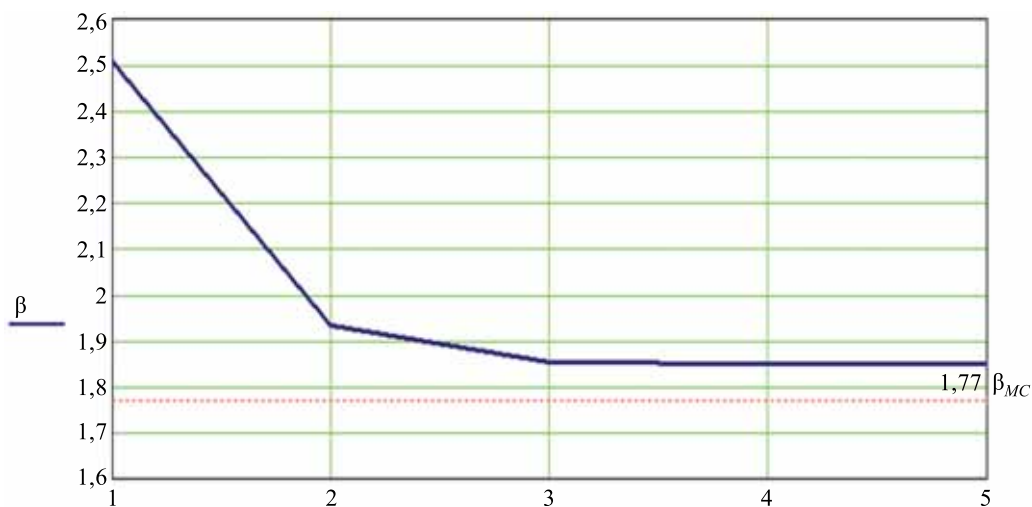


Рис. 3. Сходимость индекса надежности β к значению, близкому к экспериментальному β_{MC}

Fig. 3. Convergency of the reliability index β to amount near to experimental β_{MC}

С практической точки зрения необходимо рассмотреть расчетную ситуацию, когда нагрузка также является случайной величиной. Рассмотрим общий случай стойки с прямоугольным поперечным сечением:

$$1 - \frac{\tilde{N}}{\tilde{b}\tilde{h} \left[1 - 0,00096 \frac{l^2}{\tilde{b}^2} \right] \tilde{\sigma}_{ult}} \leq 0. \quad (11)$$

При условном обозначении случайных величин \tilde{x}_i можно записать функцию предельного состояния (при $i = 1, 2, \dots, 4$):

$$g(\tilde{x}_i) = 1 - \frac{\tilde{x}_1}{\tilde{x}_2\tilde{x}_3 \left[1 - 0,00096 \frac{l^2}{\tilde{x}_2^2} \right] \tilde{x}_4} \leq 0. \quad (12)$$

Далее задача определения индекса надежности решается аналогично приведенному выше примеру. В общем виде, в соответствии с алгоритмом Хасофера – Линда для анализа надежности коэффициенты чувствительности могут быть вычислены как:

$$\alpha_i = - \frac{\frac{\partial g}{\partial x_i} \sigma_{x_i}}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (13)$$

где σ_{x_i} — среднеквадратическое отклонение случайной величины \tilde{x}_i .

Затем вычисляются x^* и u координаты для функции предельного состояния $g(\tilde{x}_i)$:

$$x_i^* = E[x_i] + \beta \sigma_{x_i} \alpha_i, \quad (14)$$

$$u_i = \frac{x_i^* - E[x_i]}{\sigma_{x_i}}, \quad (15)$$

где $E[x_i]$ — математическое ожидание случайной величины \tilde{x}_i .

После чего строится новая функция предельного состояния $g(x^*)$ и определяется ее производная $\frac{\partial g(x^*)}{\partial x_i^*}$.

Новый индекс надежности β^* можно определить в виде:

$$\beta^* = \frac{g(x^*) - \sum \frac{\partial g(x^*)}{\partial x_i} \sigma_{x_i} u_i}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g(x^*)}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2}}. \quad (16)$$

Если индекс надежности, рассчитанный по формуле (16), близок к индексу надежности (выражение (8)), то его принимают за итоговый результат. Если разница велика, алгоритм расчета повторяют по формулам (13)–(16) (начиная с координат x^* и получая в дальнейшем координаты x^{**}) до требуемой сходимости индекса надежности, как рассмотрено в примере выше.

Для принятия решения об уровне безопасности эксплуатации деревянной стойки необходимо выполнить оценку надежности по всем критериям предельных состояний и рассматривать стойку как последовательную механическую систему, элементами которой являются вероятности безотказной работы по каждому критерию предельного состояния. Целесообразно сформировать две системы — для предельных состояний первой и второй групп.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Количественным показателем безопасности эксплуатации несущих элементов строительных конструкций может быть принята их надежность, мерой которой служит вероятность безотказной работы. Значения вероятности безотказной работы различных проектных решений возможно использовать при их сравнительном анализе и дальнейшем анализе риска.

Метод FOSM (или MVFOSM), получивший большое распространение в инженерной практике вследствие своей простоты, может приводить к неверным результатам анализа надежности при нелинейных математических моделях предельных состояний или в задачах с большой изменчивостью случайных величин. Числовой пример показывает, что метод FOSM завышает индекс надежности деревянной стойки на 35 % по сравнению с действительным значением и на 40 % по сравнению с экспериментальными исследованиями методом Монте-Карло. Для решения задач анализа надежности с нелинейными функциями предельного состояния корректнее использовать другие методы и алгоритмы, например метод FORM или алгоритм Хасофера – Линда.

С целью принятия решения об уровне безопасности эксплуатации деревянной стойки следует выполнить оценку надежности по всем критериям предельных состояний и рассматривать стойку как последовательную механическую систему, элементами которой являются вероятности безотказной работы по каждому критерию предельного состояния. Целесообразно сформировать две системы — для предельных состояний первой и второй групп.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Faes M.G.R., Daub M., Marelli S., Patelli E., Beer M.* Engineering analysis with probability boxes: a review on computational methods // *Structural Safety*. 2021. Vol. 93. P. 102092. DOI: 10.1016/j.strusafe.2021.102092
2. *Чемодуров В.Т., Сеитжелілов М.С.* Оптимизация и надежность строительных систем // *Строительство и техногенная безопасность*. 2017. № 9 (61). С. 83–86.
3. *Левченко В.Н., Левин В.М., Кириченко В.Ф.* Долговечность и надежность строительных конструкций и анализ методов их обеспечения в зданиях и сооружениях // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2018. № 6 (134). С. 90–99.
4. *Melchers R.E., Beck A.T.* Structural reliability analysis and prediction. John Wiley & Sons, 2018. 528 p. DOI: 10.1002/9781119266105
5. *Серов Е.Н., Черных А.Г., Серов А.Е., Соломаха А.Ю., Храмов К.С.* Строительные нормы проектирования деревянных конструкций. Состояние, проблемы и перспективы // *Вестник гражданских инженеров*. 2012. № 3 (32). С. 107–114.
6. *Ведяков И.И., Погорельцев А.А., Пятикрестовский К.П.* Перспективы совершенствования норм проектирования деревянных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 4. С. 28–32.
7. *Frühwald E., Serrano E., Toratti T., Emilsson A., Thelandersson S.* Design of safe timber structures — How can we learn from structural failures in concrete, steel and timber? // *Report TVBK-3053*. Division of Structural Engineering, Lund University. 2007. 270 p.
8. *Громацкий В.А., Турковский С.Б., Филимонов М.А.* Об оценке надежности элементов деревянных конструкций // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2011. № 6 (239). С. 66–73.
9. *Xiao Y., Wu Y., Li J., Yang R.Z.* An experimental study on shear strength of glulam // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 150. Pp. 490–500. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.005
10. *Lourenço P.B., Sousa H.S., Brites R.D., Neves L.C.* In situ measured cross section geometry of old timber structures and its influence on structural safety // *Materials and Structures*. 2013. Vol. 46. Issue 7. Pp. 1193–1208. DOI: 10.1617/S11527-012-9964-5
11. *Qin S., Yang N.* Strength degradation and service life prediction of timber in ancient Tibetan building // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2018. Vol. 76. Issue 2. Pp. 731–747. DOI: 10.1007/s00107-017-1211-x
12. *Мкртычев О.В., Райзер В.Д.* Теория надежности в проектировании строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2016. 906 с.
13. *Cederbaum G., Elishakoff I., Librescu L.* Reliability of laminated plates via the first-order second-moment method // *Composite Structures*. 1990. Vol. 15. Issue 2. Pp. 161–167. DOI: 10.1016/0263-8223(90)90005-y
14. *Afshari S.S., Enayatollahi F., Xu X., Liang X.* Machine learning-based methods in structural reliability analysis: A review // *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 219. P. 108223. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108223
15. *Sun Z., Wang J., Li R., Tong C.* LIF: A new Kriging based learning function and its application to structural reliability analysis // *Reliability Engineering & System Safety*. 2017. Vol. 157. Pp. 152–165. DOI: 10.1016/j.ress.2016.09.003
16. *Zhang L., Lu Z., Wang P.* Efficient structural reliability analysis method based on advanced Kriging model // *Applied Mathematical Modelling*. 2015. Vol. 39. Issue 2. Pp. 781–793. DOI: 10.1016/j.apm.2014.07.008
17. *Papaioannou I., Straub D.* Combination line sampling for structural reliability analysis // *Structural Safety*. 2021. Vol. 88. P. 102025. DOI: 10.1016/j.strusafe.2020.102025
18. *Соловьева А.А., Соловьев С.А.* Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 2. С. 153–167. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.153-167
19. *Solovev S., Soloveva A.* Structural reliability analysis using evidence theory and fuzzy probability distributions // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 107. Issue 7. P. 10704. DOI: 10.34910/MCE.107.4
20. *Hasofer A.M., Lind N.C.* Exact and invariant second-moment code format // *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1974. Vol. 100. Issue 1. Pp. 111–121. DOI: 10.1061/JMCEA3.0001848

Поступила в редакцию 27 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 24 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 24 ноября 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Александрович Соловьев** — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; SPIN-код: 4738-8927, Scopus: 57191529586, ResearcherID: AAJ-1708-2020; solovevsa@vogu35.ru;

Юлия Александровна Инькова — аспирант, ассистент кафедры промышленного и гражданского строительства; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; ResearcherID: AGO-6725-2022; gubinaiaa@vogu35.ru;

Анастасия Андреевна Соловьева — аспирант, преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; SPIN-код: 5162-9279, Scopus: 86157789317, ResearcherID: ABG-1982-2021; solovevaaa@vogu35.ru.

Вклад авторов:

Соловьев С.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, составление исходного текста, анализ полученных результатов, формулирование итоговых выводов.

Инькова Ю.А. — сбор материала, проведение расчетов, анализ полученных результатов, доработка текста, формулирование итоговых выводов.

Соловьева А.А. — сбор материала, проведение расчетов, анализ полученных результатов, составление исходного текста и итоговых выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Faes M.G.R., Daub M., Marelli S., Patelli E., Beer M. Engineering analysis with probability boxes: a review on computational methods. *Structural Safety*. 2021; 93:102092. DOI: 10.1016/j.strusafe.2021.102092
2. Chemodurov V.T., Seitjanov M.S. Optimization and reliability of building systems. *Construction and Technogenic Safety*. 2017; 9(61):83-86. (rus.)
3. Levchenko V., Levin V., Kirichenko V. Durability and reliability of building structures and analysis of methods of their provision in buildings and structures. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2018; 6(134):90-99. (rus.)
4. Melchers R.E., Beck A.T. *Structural reliability analysis and prediction*. John Wiley & Sons, 2018; 528. DOI: 10.1002/9781119266105
5. Serov Ye.N., Chernykh A.G., Serov A.Ye., Solomakha A.Yu., Khramov K.S. Building design standards of wooden structures. State, problems and prospects. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 3(32):107-114. (rus.)
6. Vedyakov I.I., Pogoreltsev A.A., Pyatikrestovskiy K.P. Prospects for improving design standards of wooden structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 4:28-32. (rus.)
7. Frühwald E., Serrano E., Toratti T., Emilsson A., Thelandersson S. Design of safe timber structures — How can we learn from structural failures in concrete, steel and timber? *Report TVBK-3053*. Division of Structural Engineering, Lund University. 2007; 270.
8. Gromatskij V.A., Turkovskij S.B., Filimonov M.A. Elements reliability estimation of wooden structures. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2011; 6(239):66-73. (rus.)
9. Xiao Y., Wu Y., Li J., Yang R.Z. An experimental study on shear strength of glulam. *Construction and Building Materials*. 2017; 150:490-500. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.005
10. Lourenço P.B., Sousa H.S., Brites R.D., Neves L.C. In situ measured cross section geometry of old timber structures and its influence on structural safety. *Materials and Structures*. 2013; 46(7):1193-1208. DOI: 10.1617/S11527-012-9964-5
11. Qin S., Yang N. Strength degradation and service life prediction of timber in ancient Tibetan building. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2018; 76(2):731-747. DOI: 10.1007/s00107-017-1211-x
12. Mkrtychev O.V., Reiser V.D. *Reliability theory on structural design*. Moscow, ASV Publishing House, 2016; 906. (rus.)
13. Cederbaum G., Elishakoff I., Librescu L. Reliability of laminated plates via the first-order second-moment method. *Composite Structures*. 1990; 15(2): 161-167. DOI: 10.1016/0263-8223(90)90005-y
14. Afshari S.S., Enayatollahi F., Xu X., Liang X. Machine learning-based methods in structural reliability analysis: A review. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022; 219:108223. DOI: 10.1016/j.res.2021.108223
15. Sun Z., Wang J., Li R., Tong C. LIF: A new Kriging based learning function and its application to structural reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2017; 157:152-165. DOI: 10.1016/j.res.2016.09.003
16. Zhang L., Lu Z., Wang P. Efficient structural reliability analysis method based on advanced Kriging model. *Applied Mathematical Modelling*. 2015; 39(2):781-793. DOI: 10.1016/j.apm.2014.07.008
17. Papaioannou I., Straub D. Combination line sampling for structural reliability analysis. *Structural Safety*. 2021; 88:102025. DOI: 10.1016/j.strusafe.2020.102025
18. Soloveva A.A., Solovev S.A. Reliability analysis of planar steel trusses based on *p*-box models. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(2):153-167. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.153-167 (rus.)

19. Solovev S., Soloveva A. Structural reliability analysis using evidence theory and fuzzy probability distributions. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 107(7):10704. DOI: 10.34910/MCE.107.4

20. Hasofer A.M., Lind N.C. Exact and invariant second-moment code format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1974; 100(1):111-121. DOI: 10.1061/JMCEA3.0001848

Received September 27, 2022.

Adopted in revised form on November 24, 2022.

Approved for publication on November 24, 2022.

B I O N O T E S : **Sergey A. Solovev** — Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; SPIN-code: 4738-8927, Scopus: 57191529586, ResearcherID: AAJ-1708-2020; solovevsa@vogu35.ru;

Yulia A. Inkova — postgraduate, assistant of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; ResearcherID: AGO-6725-2022; gubinaia@vogu35.ru;

Anastasia A. Soloveva — postgraduate, lecturer of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; SPIN-code: 5162-9279, Scopus: 86157789317, ResearcherID: ABG-1982-2021; solovevaaa@vogu35.ru.

Contribution of the authors:

Sergey A. Solovev — scientific guidance, research concept, development of methodology, editing of the source text, analysis of the results obtained, drawing up final conclusions.

Yulia A. Inkova — material assembly, calculations, analysis of the results, text rework, compilation of final conclusions.

Anastasia A. Soloveva — material assembly, calculations, analysis of the results, compilation of the source text and final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interests.

Длительная осадка и несущая способность оснований и фундаментов вблизи вертикальной выемки при разных параметрах вязкости грунта

Завен Григорьевич Тер-Мартirosян, Армен Завенович Тер-Мартirosян,
Юлия Викторовна Ванина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. При взаимодействии подземной части высотного здания с окружающим массивом за ограждением котлована и подстилающим фундамент слоем возникает сложное неоднородное напряженно-деформированное состояние (НДС), трансформирующееся в пространстве и во времени — как в период строительства, так и в период эксплуатации здания. Особые сложности возникают, когда массив грунта неоднороден и обладает реологическими свойствами, и при этом вблизи ограждения котлована действует дополнительная нагрузка.

Материалы и методы. Для задачи о НДС массива грунта, обладающего весом, за ограждением котлована глубиной h с учетом влияния распределенной полосовой нагрузки $q = \text{const}$ шириной $b = 2a$ на расстоянии c от края ограждающей конструкции котлована компоненты напряжений получены с помощью решения на основе тригонометрических рядов Рибьера – Файлона. Для определения осадки во времени фундамента вблизи котлована использовалась модель А.З. Тер-Мартirosяна для описания сдвиговых деформаций и модель Кельвина – Фойгта — для описания деформаций объема, полагая, что $\dot{\varepsilon}_z(t) = \dot{\varepsilon}_x(t) + \dot{\varepsilon}_y(t)$ согласно системе физических уравнений Генки.

Результаты. Разработан аналитический метод количественной оценки осадки оснований и фундаментов близрасположенной застройки за ограждением котлована во времени.

Выводы. Данные решения могут быть использованы для определения длительной осадки и несущей способности оснований зданий и сооружений, обладающих реологическими свойствами, вблизи котлованов. Выбранные геомеханическая модель основания (ее геометрические параметры, начальные и граничные условия), а также расчетная модель грунтовой среды (линейная, нелинейная и реологическая) и тип физических уравнений (система Гука или система Генки) существенно влияют на характер кривой осадка–время ($S-t$), а также на несущую способность грунтового основания. Зависимости осадка–время при разных параметрах вязкости грунта дают возможность утверждать, что чем меньше вязкость грунта, тем быстрее грунтовое основание переходит в стадию прогрессирующего разрушения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: НДС, тригонометрические ряды Рибьера – Файлона, реологическая модель А.З. Тер-Мартirosяна, реологическая модель Кельвина – Фойгта, длительная устойчивость основания, кривые ползучести, котлован

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Ванина Ю.В. Длительная осадка и несущая способность оснований и фундаментов вблизи вертикальной выемки при разных параметрах вязкости грунта // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1664–1676. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1664-1676

Автор, ответственный за переписку: Юлия Викторовна Ванина, yuli.julles@gmail.com.

Long-term settlement and bearing capacity of foundations adjacent to vertical excavation at various parameters of soil viscosity

Zaven G. Ter-Martirosyan, Armen Z. Ter-Martirosyan, Yuliya V. Vanina

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

ABSTRACT

Introduction. When the underground part of a high-rise building interacts with the surrounding soil massif behind the excavation pit, a complex heterogeneous stress-strain state occurs, transforming in space and time — during construction and during the exploitation of the building. Special issues arise when the soil massif is heterogeneous and has rheological properties, and an additional load acts near the pit excavation at the same time.

Materials and methods. For the problem of the stress strain statement of soil with a weight behind the enclosure of a pit with a depth h , taking into account the influence of a distributed load $q = \text{const}$ with a width $b = 2a$ at a distance c from the edge of the enclosing structure of the pit, the stress components were obtained using a solution based on the Ribier – Filon trigonometric series. To determine the settlement over time of the foundation near the pit, the A.Z. Ter-Martirosyan's model

was used. To describe shear deformations and the Kelvin – Foigt's model was used to describe volume deformations, assuming that $\dot{\varepsilon}_z(t) = \dot{\varepsilon}_x(t) + \dot{\varepsilon}_y(t)$, according to the Henky's system of physical equations.

Results. An analytical method has been developed for quantifying the settlement of soil bases and foundations of nearby buildings behind the pit over the time. The graphs of the settlement-time with double curvature, as well as the graph of the long-term stability of the base are obtained.

Conclusions. The solutions obtained can be used to determine the long-term settlements and bearing capacity of the foundations of buildings and structures with rheological properties near the pits. The selected geomechanical model of the foundation (its geometric parameters, initial and boundary conditions), as well as the computational model of the soil (linear, nonlinear and rheological) and the type of physical equations (Hooke system or Henky system), significantly affect the type of the settlement-time curve ($S-t$), as well as the bearing capacity of the soils. Collaborative using of A.Z. Ter-Martirosyan's rheological model and Kelvin – Foigt's rheological model makes it possible to obtain settlement-time graphs with double curvature, as well as a graph of the long-term stability of the soil base.

KEYWORDS: stress strain settlement, Ribier – File trigonometric series, A.Z. Ter-Martirosyan's rheological model, Kelvin – Foigt's rheological model, long-term stability of the soil base, creep curves, excavation

FOR CITATION: Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Vanina Yu.V. Long-term settlement and bearing capacity of foundations adjacent to vertical excavation at various parameters of soil viscosity. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(12):1664-1676. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1664-1676 (rus.).

Corresponding author Yuliya V. Vanina, yuli.julles@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что одной из главных задач высотного строительства с развитой подземной частью в прикладной механике грунтов является проведение количественной оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) массива грунта, вмещающего глубокий котлован с ограждением и подземными конструкциями с учетом инженерно-геологических условий. При взаимодействии подземной части высотного здания с окружающим массивом за ограждением котлована и подстилающим фундамент слоем возникает сложное неоднородное НДС, трансформирующееся в пространстве и во времени — как в период строительства, так и в период эксплуатации здания. Особые сложности возникают, когда массив грунта неоднороден и обладает реологическими свойствами, и при этом вблизи ограждения котлована действует дополнительная нагрузка.

Настоящая статья посвящена постановке и аналитическому решению задачи о НДС массива грунта, обладающего весом, за ограждением котлована глубиной h с учетом влияния распределенной полосовой нагрузки $q = \text{const}$, кПа, шириной $b = 2a$ на расстоянии c от края ограждающей конструкции (рис. 1), и определению осадки основания во времени с учетом вязкоупругих свойств грунта. Принято, что конструкция ограждения котлована неподвижна, на нее действуют давление от веса грунта и нагрузки q на расстоянии c от бровки котлована. В качестве расчетной для описания изменения НДС массива грунта за ограждением котлована во времени принята упруго-вязкая модель А.З. Тер-Мартirosяна [1] для описания сдвиговых деформаций и модель Кельвина – Фойгта [2] для описания объемных деформаций, полагая, согласно Генки [3], что любую деформацию можно представить в виде суммы объемных и сдвиговых составляющих этой деформации, т.е. $\varepsilon_z = \varepsilon_v + \varepsilon_\gamma$, причем $\varepsilon_v = f(\sigma_m)$, а $\varepsilon_\gamma = f(\tau_i, \sigma_m)$.

Попытки дать количественную оценку НДС весомого массива грунта в четверти плоскости были сделаны О.Я. Шехтер [4], В.А. Флориным [5], М.И. Горбуновым-Посадовым [4], З.Г. Тер-Мартirosяном [6] и др. Отметим, что З.Г. Тер-Мартirosяном было получено аналитическое решение задачи о напряжениях областей с криволинейной границей, в том числе глубокого котлована, методом комплексных потенциалов Колосова – Мусхелишвили путем отображения верхней области с криволинейной границей на нижнюю полуплоскость.

Удачным оказалось решение задачи определения НДС полуплоскости с приложением на границе нагрузки для слоя ограниченной толщины З.Г. Тер-Мартirosяном [7, 8] с помощью тригонометрических рядов Рибьера – Файлона. Данное решение позволяет с помощью ПК MathCAD решить задачу о НДС как для слоя ограниченной ширины, так и для слоя, опирающегося на несжимаемое основание. В настоящее время методики определения НДС массивов грунтов под воздействием нагрузок разрабатываются отечественными [9–11] и зарубежными учеными [12–16].

Первые попытки учесть реологические свойства грунтов для прогноза деформаций ползучести были сделаны К. Терцаги [17] в 1925 г. Существенный вклад в исследование деформаций глинистых грунтов и их влияние на прогноз изменения НДС оснований внесли отечественные ученые: Н.Н. Маслов [18], С.С. Вялов [2], В.А. Флорин [5], М.Н. Гольдштейн [19], Ю.К. Зарецкий [20], С.Р. Месчан [21, 22], Г.И. Тер-Степанян [23], Н.А. Цытович [24], З.Г. Тер-Мартirosян [24–31], А.З. Тер-Мартirosян [1, 25, 27–31], а также зарубежные исследователи: Л. Шукле [32] и др. [33–37]. Большинство этих исследований посвящены развитию теории ползучести и созданию новых реологических моделей. Большой вклад в развитии теории консолидации и ползучести принадлежит Ю.К. Зарецкому, А.Л. Гольдину, З.Г. Тер-Мартirosяну, А.З. Тер-Мартirosяну. Получены ре-

шения одномерных, двумерных и трехмерных задач консолидации с учетом ползучести скелета грунта.

В данной работе для решения поставленной задачи использовалась модель А.З. Тер-Мартirosяна [1] для описания сдвиговых деформаций и модель Кельвина – Фойгта [2] для описания деформаций объема, полагая, что $\dot{\epsilon}_z(t) = \dot{\epsilon}_v(t) + \dot{\epsilon}_\gamma(t)$ согласно системе физических уравнений Генки [3]. Ранее многими учеными, в том числе С.С. Вяловым [2], А.Р. Ржаницыным [38], утверждалось, что кривая ползучести $\gamma-t$ имеет двойную кривизну, включающую начальную (затухающую), промежуточную (установившуюся) и заключительную (прогрессирующую) стадии с возможным переходом на разрушение. Однако описать данную кривую одним уравнением не удавалось. В связи с этим впервые в мире была разработана новая реологическая модель для описания кривой ползучести $\gamma-t$ с двойной кривизной А.З. Тер-Мартirosяном (2016 г.). Далее эта модель была применена для решения краевой задачи о действии распределенной нагрузки З.Г. Тер-Мартirosяном и А.З. Тер-Мартirosяном [1].

Для прогноза осадок и длительной несущей способности основания используется теорема о тождественности НС сред, обладающих упругостью и наследственной теорией ползучести Больцмана – Вольтерра, при условии постоянства коэффициента Пуассона, доказанная Н.Х. Арутюняном [39], а также в других исследованиях. В первом приближении принято, что $v^e \approx v^v$.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривается действие распределенной нагрузки $q = \text{const}$ по полосе шириной $b = 2a$ на расстоянии c от края ограждающей конструкции, опирающейся на несжимаемый слой. Принимается, что вертикальная стена ограждения закреплена распорными конструкциями, но допускаются вертикальные перемещения грунта (рис. 1). Для данной задачи компоненты напряженного состояния грунтовой среды за ограждающей конструкцией определены с помощью тригонометрических рядов Рибьера – Файлона по методу З.Г. Тер-Мартirosяна [7, 8]:

$$\sigma_y(x, y) = \frac{qa}{l} + \frac{4q}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi a}{l} \left[\left(\frac{m\pi h}{l} \text{ch} \frac{m\pi h}{l} + \text{sh} \frac{m\pi h}{l} \right) \text{ch} \frac{m\pi(y-h)}{l} - \frac{m\pi(y-h)}{l} \text{sh} \frac{m\pi(y-h)}{l} \text{sh} \frac{m\pi h}{l} \right]}{m \left(\text{sh} \frac{2m\pi h}{l} + \frac{2m\pi h}{l} \right)} \cos \frac{m\pi x}{l}; \quad (1)$$

$$\sigma_x(x, y) = \frac{qa}{l} \frac{v}{1-v} - \frac{4q}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi a}{l} \left[\left(\frac{m\pi h}{l} \text{ch} \frac{m\pi h}{l} - \text{sh} \frac{m\pi h}{l} \right) \text{ch} \frac{m\pi(y-h)}{l} - \frac{m\pi(y-h)}{l} \text{sh} \frac{m\pi(y-h)}{l} \text{sh} \frac{m\pi h}{l} \right]}{m \left(\text{sh} \frac{2m\pi h}{l} + \frac{2m\pi h}{l} \right)} \cos \frac{m\pi x}{l}; \quad (2)$$

$$\tau_{xy}(x, y) = -\frac{4q}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi a}{l} \left[\frac{m\pi h}{l} \text{ch} \frac{m\pi h}{l} \text{sh} \frac{m\pi(y-h)}{l} - \frac{m\pi(y-h)}{l} \text{ch} \frac{m\pi(y-h)}{l} \text{sh} \frac{m\pi h}{l} \right]}{m \left(\text{sh} \frac{2m\pi h}{l} + \frac{2m\pi h}{l} \right)} \sin \frac{m\pi x}{l}; \quad (3)$$

$$\sigma_m(x, y) = \frac{1+v}{3} \left[\frac{qa}{l} \frac{1}{1-v} + \frac{8q}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi a}{l} \text{sh} \frac{m\pi a}{l} \text{ch} \frac{m\pi(y-h)}{l}}{m \left(\text{sh} \frac{2m\pi h}{l} + \frac{2m\pi h}{l} \right)} \cos \frac{m\pi x}{l} \right]. \quad (4)$$

По результатам испытаний глинистых грунтов С.С. Вяловым, С.Р. Месчаном и другими авторами [2, 21, 22] (рис. 2) при длительном воздействии нагрузки было установлено, что для грунтов, обладающих реологическими свойствами, характерна диаграмма развития незатухающих деформаций ползучести при больших значениях напряжений (рис. 3).

А.З. Тер-Мартirosяном [1] впервые было предложено новое реологическое уравнение, позволяющее построить зависимость $\gamma-t$ при разных τ в виде кривой с двойной кривизной (рис. 4) и включающее три стадии: начальная, нелинейная, промежуточная с установившейся скоростью сдвига и конечная, развивающаяся с возрастающей скоростью и переходящая на стадию прогрессирующего разрушения.

При $\tau = \text{const}$ реологическая модель А.З. Тер-Мартirosяна [1] описывается уравнением следующего вида:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau^*}{\eta_\gamma(\sigma_m)} \left(\frac{e^{-\alpha\gamma}}{a} + \frac{e^{\beta\gamma}}{b} \right), \quad (5)$$

где τ и τ^* — действующее и предельное значения касательных напряжений на образец грунта; $\dot{\gamma}(\gamma)$ — скорость угловой деформации, зависящая от самой деформации γ . Выражение в скобках представляет функцию одновременного упрочнения и разупрочнения, где $\dot{\gamma}$ является лучшей мерой упрочнения согласно Ю.Н. Работнову [40]; $\eta_\gamma(\sigma_m)$ — начальная сдвиговая вязкость грунта, которая в общем случае зависит от среднего напряжения σ_m ; α , β , a и b — параметры

упрочнения (разупрочнения) глинистого грунта, которые определяются по результатам кинематического сдвига ($\dot{\gamma} = \text{const}$), представленного на рис. 2.

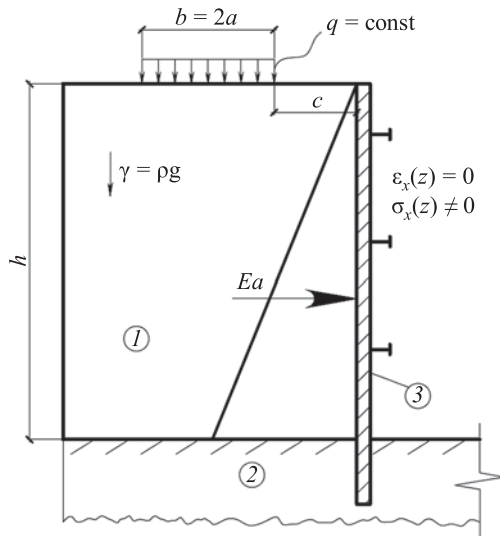


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия весового слоя (1) толщиной h , опирающегося на несжимаемое основание (2), с вертикальной неподвижной стеной ограждения котлована (3) при воздействии распределенной нагрузки $q = \text{const}$ по полосе $b = 2a$ на расстоянии c от ограждения

Согласно этой модели (формула (5)), скорость сдвиговой деформации зависит нелинейно от накопленной сдвиговой деформации $\dot{\gamma}(\gamma)$. На основании формулы (5) удается построить кривые $\tau-t$ при кинематическом сдвиге ($\dot{\gamma} = \text{const}$), а также кривые релаксации $\tau(0) \rightarrow \tau(t)$ при $\dot{\gamma}(0) = \text{const}$ (см. рис. 4, 5).

Таким образом, одной функцией удастся построить все три вида реологических кривых, в том числе ползучесть в виде кривых $\gamma-t$ при разных $\tau - \tau^* = \text{const}$ (рис. 4), кинематический сдвиг $\tau-t$ при разных ($\dot{\gamma} = \text{const}$), (рис. 5, а) и релаксацию $\tau-t$ при разных начальных $\tau(0)$ и при $\dot{\gamma}(0) = \text{const}$ (рис. 5, б).

Следует отметить, что вид этих кривых на основе нового реологического уравнения (5) во многих случаях совпадает с кривыми, полученными по результатам лабораторных испытаний разных ученых [2, 18–23]. Важно и то, что эти кривые построены при одних и тех же реологических параметрах (α, β, a и b). Ранее А.Р. Ржаницыным [38] рекомендовалось двойную кривизну ползучести (рис. 3) строить по частям, т.е. начальную, промежуточную и незатухающую.

Система физических уравнений Генки [3], позволяющая определить линейную и нелинейную зависимости между напряжениями и скоростями деформации, имеет следующий вид:

$$\dot{\epsilon}_x = \dot{\chi}(\sigma_x - \sigma_m) + \dot{\chi}^* \sigma_m; \gamma_{xy} = 2\dot{\chi}\tau_{xy}; \quad (6)$$

$$\dot{\epsilon}_y = \dot{\chi}(\sigma_y - \sigma_m) + \dot{\chi}^* \sigma_m; \gamma_{yz} = 2\dot{\chi}\tau_{yz}; \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon}_z = \dot{\chi}(\sigma_z - \sigma_m) + \dot{\chi}^* \sigma_m; \gamma_{zx} = 2\dot{\chi}\tau_{zx}; \quad (8)$$

где

$$\dot{\chi} = \frac{\gamma_i}{2\tau_i} = \frac{f(\tau_i, \sigma_m, \mu_\sigma, t)}{2\tau_i}; \quad (9)$$

$$\dot{\chi}^* = \frac{\epsilon_m}{\sigma_m} = \frac{f^*(\tau_i, \sigma_m, \mu_\sigma, t)}{2\tau_i}; \quad (10)$$

$$\dot{\chi} = \frac{\gamma_i}{2\tau_i} = \frac{1}{2\eta_\gamma(\sigma_m)} \left(\frac{e^{-\alpha\epsilon_z}}{a} + \frac{e^{\beta\epsilon_z}}{b} \right). \quad (11)$$

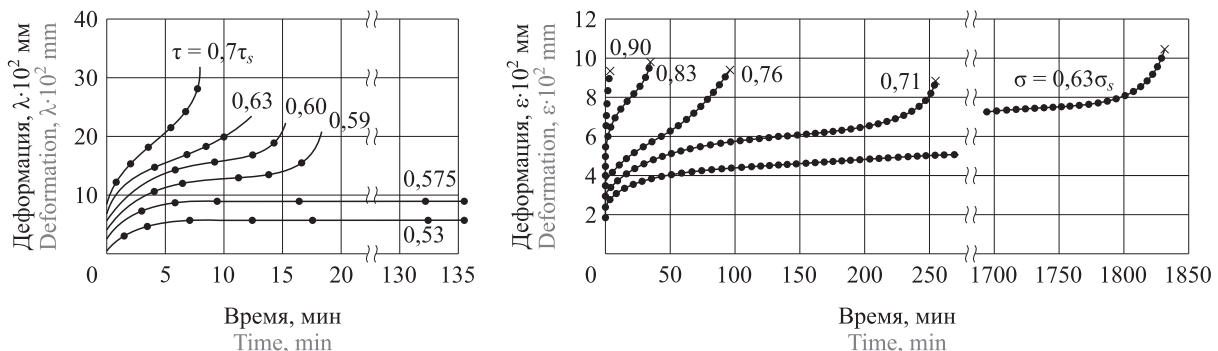


Рис. 2. Кривые ползучести глин при сдвиге по С.С. Вялову (1978 г.): τ_s — предельное значение касательных напряжений (напряжений сдвига) [2]

Fig. 2. Creep curves of clays under shear stresses by S.S. Vyalov (1978): τ_s is the limit value of tangential stresses (shear stresses) [2]

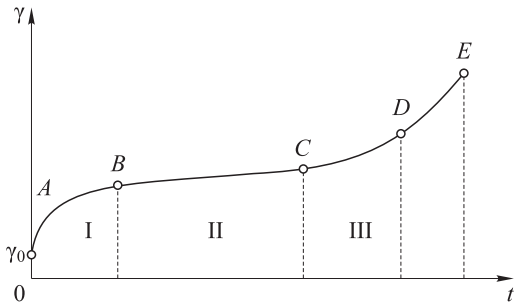


Рис. 3. Диаграмма изменения деформаций во времени: I стадия — установившаяся ползучесть (участок AB); II стадия — установившееся течение (участок BC); III стадия — прогрессирующее разрушение (участок CD)

Fig. 3. Diagram of changes in deformations over time: stage I — the stage of steady creep (section AB); stage II — the stage of steady flow (section BC); stage III — the stage of progressive destruction (section CD)

В качестве расчетной для определения нелинейных объемных деформаций с учетом реологических свойств грунта принята вязкоупругая модель Кельвина – Фойгта [2] в следующем виде:

$$\sigma_m = \sigma_m^{упр} + \sigma_m^{вяз} = K(\sigma_m)\epsilon_m + \eta_v \dot{\epsilon}_m, \quad (12)$$

которая при $\epsilon_m(t \approx 0) = 0$ приводит к выражению вида:

$$\epsilon_m(t) = \frac{\sigma_m}{K(\sigma_m)} \left(1 - e^{-\frac{-K \cdot t}{\eta_v}} \right), \quad (13)$$

где η_v — объемная вязкость.

В этом случае скорость объемной деформации будет иметь затухающий характер, т.е. при $t \rightarrow 0$ параметр $\dot{\epsilon}(t) \rightarrow 0$, причем скорость ее снижается:

$$\dot{\epsilon}_m(t) = \frac{\sigma_m}{K(\sigma_m)} \left(\frac{-K}{\eta_v} e^{-\frac{-K}{\eta_v} t} \right). \quad (14)$$

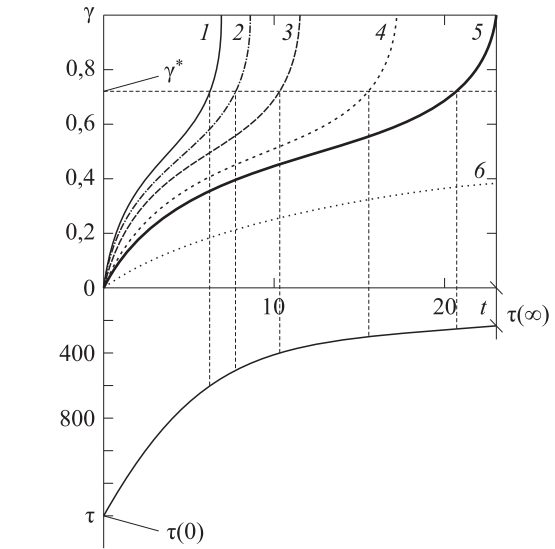
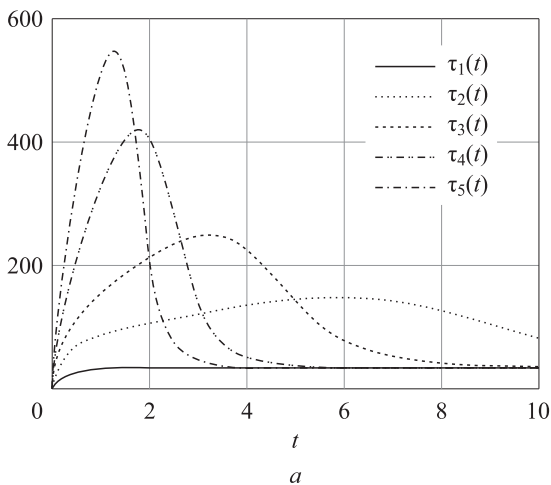


Рис. 4. Кривые ползучести $\gamma-t$ при $\tau_1 > \tau_2 > \dots > \tau_5$ (верхняя часть) и кривая длительной прочности $\tau(0) \rightarrow \tau(\infty)$ при $t \rightarrow \infty$, построенные по формуле (5)

Fig. 4. Creep curves $\gamma-t$ at $\tau_1 > \tau_2 > \dots > \tau_5$ (upper part) and curves of the long-term capacity $\tau(0) \rightarrow \tau(\infty)$ at $t \rightarrow \infty$, constructed by the formula (5)

Зависимости между напряжениями и скоростями деформаций были определены с помощью системы физических уравнений Генки [3], которая описывает скорость деформаций как сумму объемных и сдвиговых скоростей деформаций ($\dot{\epsilon}_z = \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_x$) в следующем виде:

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{\sigma_z - \sigma_m}{\eta_v(\sigma_m)} \left(\frac{e^{-\alpha \epsilon_z}}{a} + \frac{e^{\beta \epsilon_z}}{b} \right) + \frac{\sigma_m}{K(\sigma_m)} \left(\frac{-K}{\eta_v} e^{-\frac{-K}{\eta_v} t} \right). \quad (15)$$

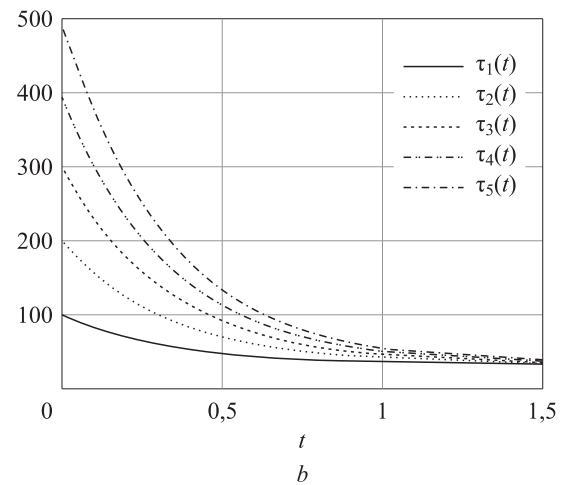


Рис. 5. Кривые $\tau-t$ по результатам испытаний в кинематическом режиме при различных значениях $\dot{\gamma} = \text{const}$, $\dot{\gamma}_1 > \dot{\gamma}_2 > \dots > \dot{\gamma}_5$ (a); кривые релаксации напряжения сдвига $\tau(t)$ при различных начальных напряжениях сдвига $\tau(0)$ и при $\gamma = \text{const}$ (b)

Fig. 5. Curves $\tau-t$ according to the results of tests in kinematic mode at different values $\dot{\gamma} = \text{const}$, $\dot{\gamma}_1 > \dot{\gamma}_2 > \dots > \dot{\gamma}_5$ (a); curves of relaxation of shear stress $\tau(t)$ at different initial shear stresses $\tau(0)$ and at $\gamma = \text{const}$ (b)

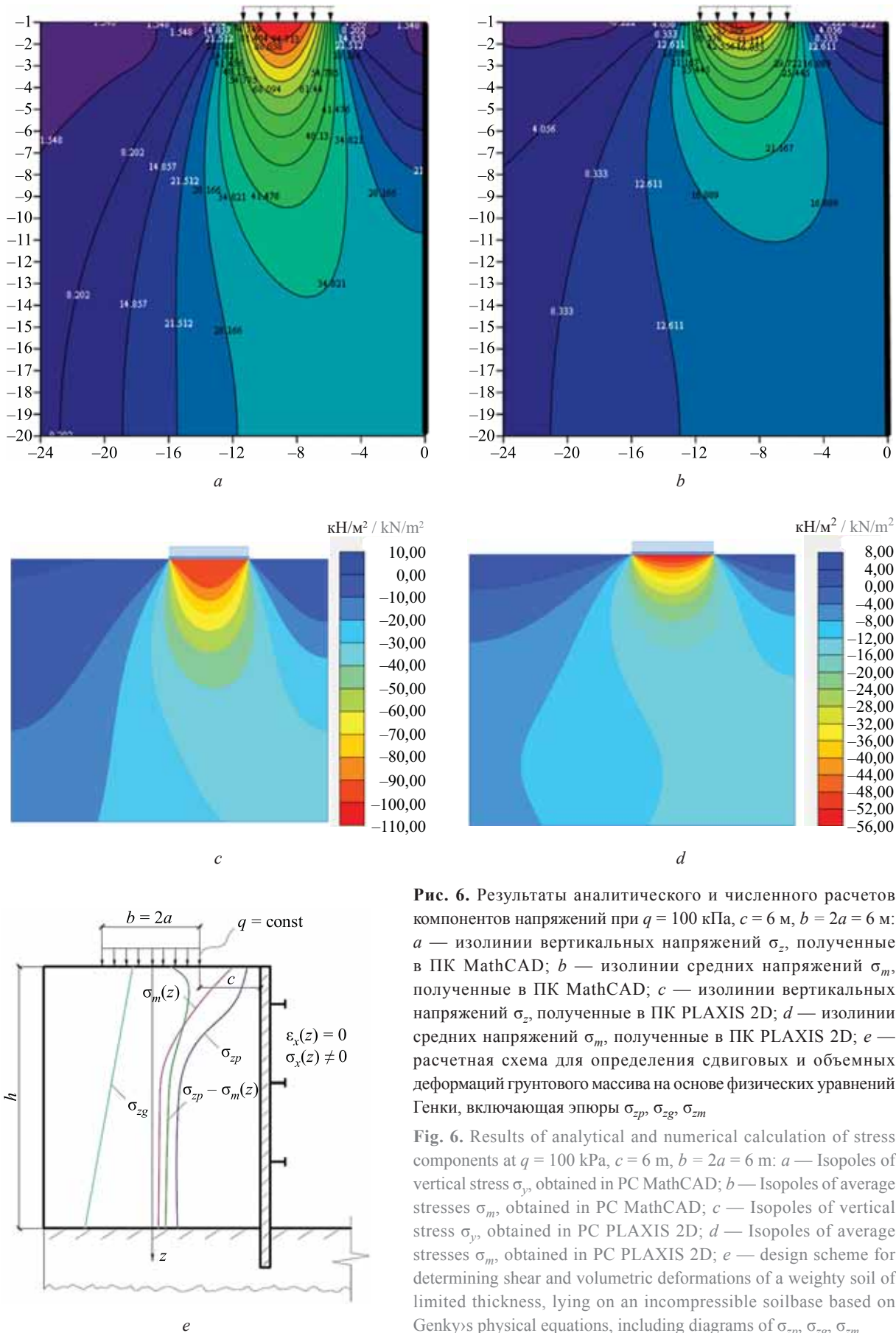


Рис. 6. Результаты аналитического и численного расчетов компонентов напряжений при $q = 100$ кПа, $c = 6$ м, $b = 2a = 6$ м: a — изолинии вертикальных напряжений σ_z , полученные в ПК MathCAD; b — изолинии средних напряжений σ_m , полученные в ПК MathCAD; c — изолинии вертикальных напряжений σ_z , полученные в ПК PLAXIS 2D; d — изолинии средних напряжений σ_m , полученные в ПК PLAXIS 2D; e — расчетная схема для определения сдвиговых и объемных деформаций грунтового массива на основе физических уравнений Генки, включающая эпюры σ_{zp} , σ_{zg} , σ_{zm}

Fig. 6. Results of analytical and numerical calculation of stress components at $q = 100$ kPa, $c = 6$ m, $b = 2a = 6$ m: a — Isopoles of vertical stress σ_z , obtained in PC MathCAD; b — Isopoles of average stresses σ_m , obtained in PC MathCAD; c — Isopoles of vertical stress σ_z , obtained in PC PLAXIS 2D; d — Isopoles of average stresses σ_m , obtained in PC PLAXIS 2D; e — design scheme for determining shear and volumetric deformations of a weighty soil of limited thickness, lying on an incompressible soilbase based on Genky's physical equations, including diagrams of σ_{zp} , σ_{zg} , σ_{zm}

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аналитический расчет при помощи ПК MathCAD позволил определить компоненты напряжений σ_z, σ_m по всей плоскости при $z > 0$ и $\pm x$. На рис. 6 представлены изолинии компонент напряжений. Для сравнительного анализа был произведен аналогичный расчет в ПК PLAXIS 2D для четверти плоскости с граничным условием на оси $z \varepsilon_x = 0, \sigma_x \neq 0$. Результаты показаны на рис. 6.

Для построения графиков развития ползучести слоев в сжимаемой толще основания во времени (формула (15)) были использованы следующие параметры грунтового основания с тремя различными значениями вязкости грунта (табл.).

Результаты построения графиков зависимости осадки от времени получены для слоев сжимаемой толщи основания в виде суммы $\varepsilon_{zi}(t) = \varepsilon_{zi}(\gamma, t) + \varepsilon_{zi}(\varepsilon, t)$. На их основе можно определить суммарную осадку сжимаемой толщи, т.е. получаем:

$$\sum S'(t) = \sum S'_\gamma(t) + \sum S'_\varepsilon(t). \quad (16)$$

Выполненные расчеты для определения суммарной осадки представлены на рис. 7.

Осадка основания во времени, рассчитанная по моделям Кельвина – Фойгта [2] и А.З. Тер-Мартirosяна [1], включенных в систему физических уравнений Генки [3], приводит к кривой: осадка–время ($S'-t$), имеющей двойную кривизну, которая в определенный момент времени переходит на стадию прогрессирующей осадки ($S \rightarrow \infty$ при $t = t^*$ — время разрушения). Исходя из полученных зависимостей осадка–время, представленных на рис. 8, следует, что чем меньше вязкость грунта, тем быстрее грунтовое основание переходит в стадию прогрессирующего разрушения.

Также были построены графики зависимости $S'-t$ при разных нагрузках от фундамента p . На рис. 9 приведены кривые осадка–время при вязкости грунта $\eta_{\gamma 1} = 1,657 \cdot 10^5$ кПа·сут. Значения нагрузок: $p_1 = 100$ кПа; $p_2 = 150$ кПа; $p_3 = 180$ кПа; $p_4 = 200$ кПа; $p_5 = 220$ кПа; $p_6 = 250$ кПа.

Параметры грунтового основания

Parameters of the soil base

η_γ , кПа·сут / kPa·days	K , кПа / kPa	K/η_γ , 1/сут / 1/days	a	b	α	β
$1,657 \cdot 10^5$	3500	0,0043	1,2	60	171	40
$2,067 \cdot 10^5$		0,0016				
$4,372 \cdot 10^5$		0,00076				

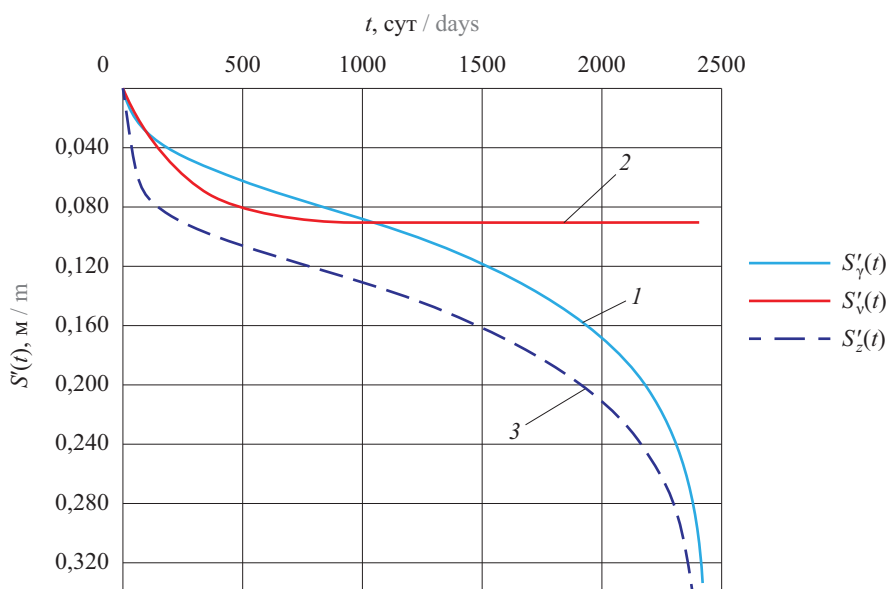


Рис. 7. Осадки основания $S'(t) - t$: 1 — определенные по модели Тер-Мартirosяна; 2 — определенные по модели Кевина – Фойгта; 3 — суммарные деформации, определенные по формуле (15)

Fig. 7. Settlements of the layer $S'(t) - t$: 1 — settlements determined by the Ter-Martirosyan model; 2 — volumetric settlements determined by the Kevin – Voigt model; 3 — total settlements determined by the formula (15)

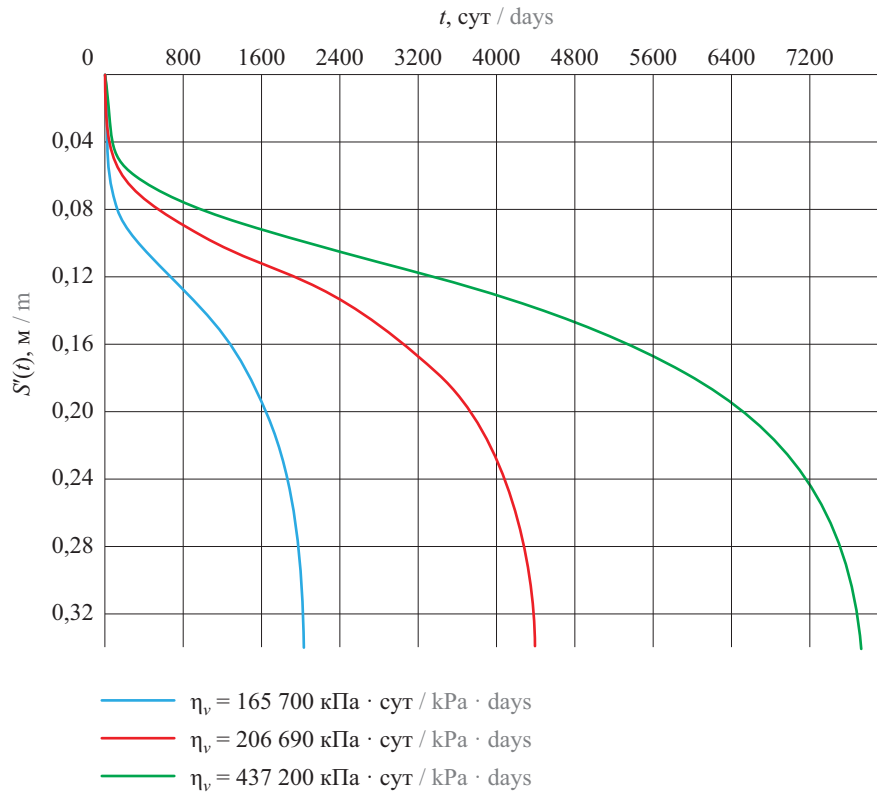


Рис. 8. Суммарные осадки основания $S-t$ при нагрузке от фундамента $p = 100$ кПа при различных параметрах вязкости
Fig. 8. The total settlements of the soil base $S-t$ at load from the foundation $p = 100$ kPa and at various parameters of soil viscosity

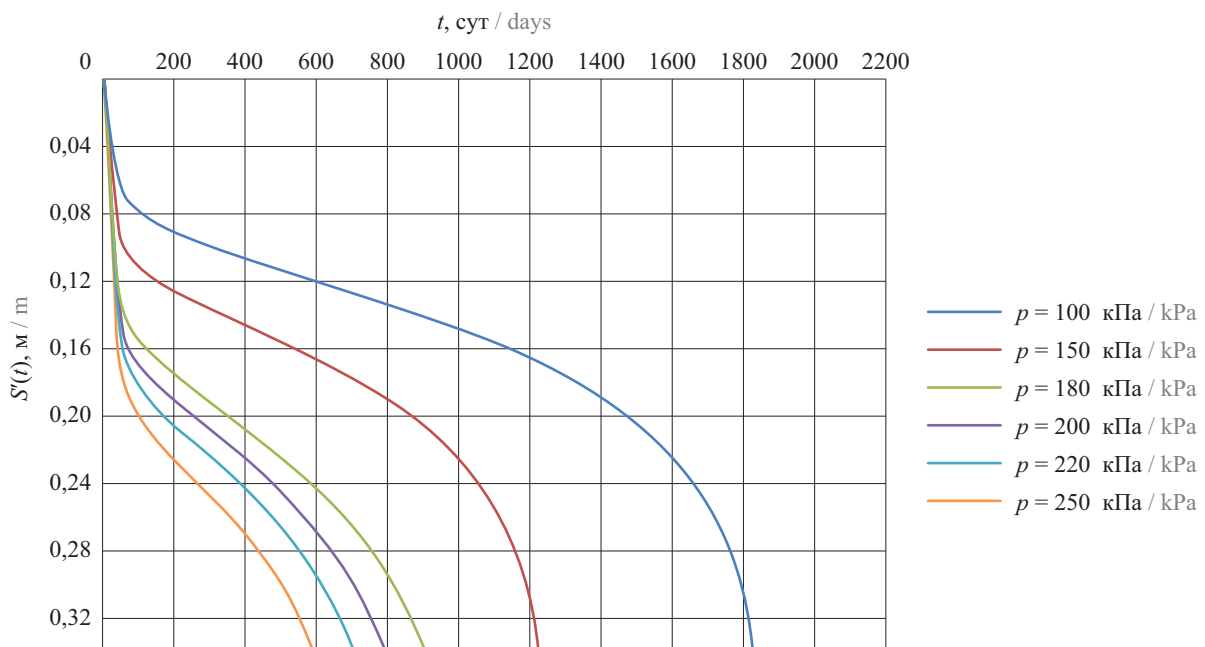


Рис. 9. Суммарные осадки основания $S-t$ при различных нагрузках от фундамента p при вязкости грунта $\eta_{v1} = 1,657 \cdot 10^5$ кПа·сут; график длительной устойчивости основания
Fig. 9. The total settlements of the soil base $S-t$ at various loads from the foundation p at soil viscosity $\eta_{v1} = 1,657 \cdot 10^5$ kPa · day; a graph of the long-term stability of the soil base

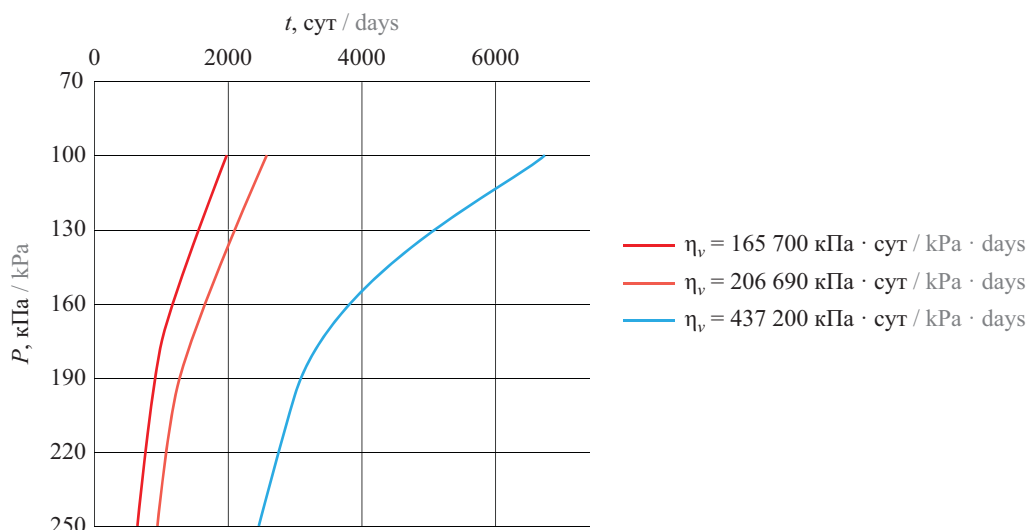


Рис. 10. График длительной устойчивости основания при различных нагрузках от фундамента p и вязкости грунта η_v
Fig. 10. The graph of the long-term stability of the soil base at various loads from the foundation p at various parameters of soil viscosity η_v

На основании рис. 9 и аналогичных кривых, построенных при разных нагрузках от фундамента p и при параметрах вязкости грунта $\eta_{v2} = 2,067 \times 10^5$ кПа · сут и $\eta_{v3} = 2,067 \cdot 10^5$ кПа · сут, был получен сравнительный график длительной устойчивости фундамента (рис. 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

Выбранные геомеханическая модель основания (ее геометрические параметры, начальные и граничные условия), а также расчетная модель грунтовой среды (линейная, нелинейная и реологическая) и тип физических уравнений (система Гука или система Генки) существенно влияют на характер кривой осадка–время ($S-t$), а также на несущую способность грунтового основания.

Разработан аналитический метод количественной оценки осадки оснований и фундаментов близ-

расположенной застройки за ограждением котлована во времени.

Используемая в настоящей работе расчетная модель, наряду с реологической моделью А.З. Тер-Мартirosяна при сдвиге и моделью объемных деформаций грунта Кельвина – Фойгта в составе физических уравнений Генки, позволила определить деформации грунта $\epsilon(\sigma - \epsilon, \tau - \gamma)$, представленные в виде суммы объемной и сдвиговой составляющих этой деформации ($\epsilon_z = \epsilon_{z,v} + \epsilon_{z,\gamma}$). В этом случае кривая деформации — время ($\epsilon_{z(t)} - t$) имеет двойную кривизну.

Совместное использование моделей А.З. Тер-Мартirosяна и Кельвина – Фойгта при различных значениях нагрузок p позволяет получить график длительной несущей способности основания.

Полученные зависимости осадка–время при разных параметрах вязкости грунта дают возможность утверждать, что чем меньше вязкость грунта, тем быстрее грунтовое основание переходит в стадию прогрессирующего разрушения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тер-Мартirosян А.З. Взаимодействие фундаментов зданий и сооружений с водонасыщенным основанием при учете нелинейных и реологических свойств грунтов : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2016.
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов : учебное пособие. М. : Высш. школа, 1978. 447 с.
3. Ильюшин А.А. Пластичность. Ч. 1. Упруго-пластические деформации. М. ; Л. : Гостехиздат, 1948. 376 с.
4. Горбунов-Посадов М.И., Шехтер О.Я., Кофман В.А. Давление грунта на жесткий заглубленный фундамент и свободные деформации котлована // Труды НИИ оснований и фундаментов. М. : Гостройиздат, 1954. № 24.
5. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. 1. Л. ; М. : Гостройиздат, 1961. 543 с.
6. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З. Механика грунтов в высотном строительстве с раз-

витой подземной частью : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2020. 945 с.

7. *Тер-Мартirosян З.Г., Пак Чун Сун.* Консолидация и ползучесть слоя грунта ограниченной ширины под действием местной нагрузки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1998. № 2. С. 2–6.

8. *Ter-Martirosyan Z.G., Luzin I.N., Vanina Yu.V., Ter-Martirosyan A.Z.* Stress-strain state of the soil mass under the uniformly distributed load action adjacent to a vertical excavation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1083. Issue 1. P. 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/1083/1/012015

9. *Karaulov A.M., Korolev K.V.* A static solution for the problem of the stability of a smooth freestanding sheet pile wall // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2017. Vol. 54. Issue 4. Pp. 211–215. DOI: 10.1007/s11204-017-9460-6

10. *Kudriavtcev S.A., Paramonov V.N., Kazharski A.V., Goncharova E.D.* Calculated evaluation of shoring of deep excavation in the restrained urban conditions (Khabarovsk, Russia) // Japanese Geotechnical Society Special Publication. 2016. Vol. 2. Issue 79. Pp. 2722–2725. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-10

11. *Mirsayapov I.T., Koroleva I.V.* The strength and deformability of clay soils under the regime spatial stress state in view of cracking // Grounds, Foundations and Soil Mechanics. 2016. № 1. Pp. 16–23.

12. *Brown E.T., Hoek E.* Trends in relationships between measured in situ stresses and depth // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1978. Vol. 15. Issue 4. Pp. 211–215. DOI: 10.1016/0148-9062(78)91227-5

13. *Khademian Z., Shahriar K., Nik M.G.* Developing an algorithm to estimate in situ stresses using a hybrid numerical method based on local stress measurement // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2012. Vol. 55. Pp. 80–85. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.05.019

14. *Kuntsche K.* Deep excavations and slopes in urban areas // Proc. of the 14-th European Conf. on ISMGE. Madrid, 2007. Vol. 1. Pp. 63–73.

15. *Li G., Mizuta Y., Ishida T., Li H., Nakama S., Sato T.* Stress field determination from local stress measurements by numerical modelling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2009. Vol. 46. Issue 1. Pp. 138–147. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.07.009

16. *Pei Q., Ding X., Liu Y., Lu B., Huang S., Fu J.* Optimized back analysis method for stress determination based on identification of local stress measurements and its application // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2019. Vol. 78. Issue 1. Pp. 375–396. DOI: 10.1007/s10064-017-1118-0

17. *Terzaghi K.* The Shearing resistance of saturated soils and the angle between the plane of shear // Proc. 1-st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1936. Vol. 1. Pp. 54–56.

18. *Маслов Н.Н.* Длительная устойчивость и деформация смещения подпорных сооружений. М. : Энергия, 1968. 160 с.

19. *Гольдштейн М.Н., Туровская А.Я., Ланидус Л.С.* Исследование оползневого течения // Вопросы геотехники. 1932. № 5. С. 3–23.

20. *Зарецкий Ю.К.* Длительная прочность и вязко-пластичность глинистых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1995. № 2. С. 2–6.

21. *Месчан С.Р., Бадалян П.Г.* Об одной важной закономерности ползучести глинистых грунтов при сдвиге // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1976. № 1. С. 21–23.

22. *Месчан С.Р.* Начальная и длительная прочность глинистых грунтов. М. : Недра, 1978. 207 с.

23. *Тер-Степанян Г.И.* Теория прогрессирующего разрушения в грунтовых и скальных средах. Ереван : Изд-во АН АрмССР, 1975. 32 с.

24. *Тер-Мартirosян З.Г., Цытович Н.А.* О вторичной консолидации глин // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1965. № 5. С. 12–15.

25. *Ter-Martirosyan Z., Ter-Martirosyan A., Sidorov V.* Settlement and Bearing Capacity of the Pile in A Three-Layer Base Taking into Account the Elastic-Visco-Plastic Properties of Soils // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661. Issue 1. P. 012099. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012099

26. *Тер-Мартirosян З.Г.* Реологические параметры грунтов и расчеты оснований сооружений. М. : Стройиздат, 1990. 199 с.

27. *Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Курилин Н.О.* Прогноз осадки и длительной несущей способности основания фундамента конечной ширины // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2021. № 3. С. 6–9.

28. *Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Kurilin N.O.* Predicting the Settlement and Long-Term Bearing Capacity of a Base of Foundation of Finite Width // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2021. Vol. 58. Issue 3. Pp. 190–195. DOI: 10.1007/s11204-021-09727-x

29. *Тер-Мартirosян З.Г., Сидоров В.В., Тер-Мартirosян А.З., Манукян А.В.* Скорость осадки сваи, погруженной в толщу глинистого грунта, с учетом его упруговязких и упругопластических свойств // Жилищное строительство. 2016. № 11. С. 3–6.

30. *Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Sidorov V.V.* Creep and long-term bearing capacity of a long pile in clay // 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013. 2013. Pp. 2881–2884.

31. *Ter-Martirosyan A., Manukyan A., Ermoshina L.* Experience of determining the parameters of the elastoviscoplastic soil model // E3S Web of Confe-

rences. 2021. Vol. 263. P. 02051. DOI: 10.1051/e3s-conf/202126302051

32. Шукле Л. Реологические проблемы механики грунтов. М. : Стройиздат, 1973. 485 с.

33. Idriss I.M., Dobry R., Singh R.D. Nonlinear Behavior of Soft Clays during Cyclic Loading // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1978. Vol. 104. Issue 12. Pp. 1427–1447. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000727

34. Wang G., Sitar N. Numerical analysis of piles in elasto-plastic soils under axial loading // 17th ASCE Engineering Mechanics Conference. 2004. Pp. 1–7.

35. Geuse E.C.W.A., Tjong-Kie T. The mechanical behaviors of clays // Proceedings of the International Congress on Rheology. London, 1954. Pp. 247–259.

36. Henkel D.J. Investigation of two long-term failures in London clay slopes at Wood Green and

Northolt // Proc. 4-th Intern. Conf. Soil Mech. Found. Eng. London, 1957. Vol. 2. Pp. 315–320.

37. Higo Y., Oka F., Kodaka T., Kimoto S. A Three — Three-dimensional strain localization of water-saturated clay and numerical simulation using an elasto-viscoplastic model // Philosophical Magazine. 2006. Vol. 86. Issue 21–22. Pp. 3205–3240. DOI: 10.1080/14786430500321203

38. Ржаницын А.П. Теория ползучести. М. : Стройиздат, 1968. 416 с.

39. Арутюнян Н.Х., Колмановский В.Б. Теория ползучести неоднородных тел. М. : Наука, 1983. 336 с.

40. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М. : Наука, 1966. 752 с.

Поступила в редакцию 2 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 16 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 16 ноября 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Завен Григорьевич Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, почетный член Российской Академии архитектуры и строительных наук, главный научный сотрудник научно-образовательного центра «Геотехника»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9613-8764, ORCID: 0000-0001-9159-6759, Scopus: 6603474514, ResearcherID: Q-8635-2017; ter-martyrosyanzg@mgsu.ru;

Армен Завенович Тер-Мартirosян — доктор технических наук, профессор, проректор, руководитель научно-образовательного центра «Геотехника»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9467-5034, ORCID: 0000-0001-8787-826X, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; Ter-MartirosianAZ@gic.mgsu.ru;

Юлия Викторовна Ванина — аспирант кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 791344; yuli.julles@gmail.com.

Вклад авторов:

Тер-Мартirosян З.Г. — идея, концепция исследования, развитие методологии, научное руководство, научное редактирование текста.

Тер-Мартirosян А.З. — научное редактирование текста.

Ванина Ю.В. — произведение аналитических расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ter-Martirosyan A.Z. *Interaction of foundations of buildings and structures with a water-saturated base when taking into account the nonlinear and rheological properties of soils* : dis. ... doctor of technical sciences. Moscow, 2016. (rus.).

2. Vyalov S.S. *Rheological foundations of soil mechanics* : textbook. Moscow, Higher school, 1978; 447. (rus.).

3. Ilyushin A.A. *Plastic. Part 1. Elastic-plastic deformations*. Moscow; Leningrad, Gostekhizdat, 1948; 376. (rus.).

4. Gorbunov-Posadov M.I., Shekhter O.Ya., Kofman V.A. *The pressure of the soil on the deep foundation and free deformation of the pit. Works of the Research Institute of Foundation bases and Foundations*. Moscow, Gostroyizdat, 1954; 24. (rus.).

5. Florin V.A. *Fundamentals of soil mechanics. Vol. 1.* Leningrad; Moscow, Gosstroyizdat, 1961; 543. (rus.).
6. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z. *Soil mechanics in high-rise building with a developed underground part : textbook.* Moscow, ASV Publishing House, 2020; 945. (rus.).
7. Ter-Martirosyan Z.G., Pak Chun Sun. Consolidation and creep of a soil layer of limited width under the influence of local load. *Foundations, Foundations and Soil Mechanics.* 1998; 2:2-6. (rus.).
8. Ter-Martirosyan Z.G., Luzin I.N., Vanina Yu.V., Ter-Martirosyan A.Z. Stress-strain state of the soil mass under the uniformly distributed load action adjacent to a vertical excavation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2021; 1083(1):012015. DOI: 10.1088/1757-899X/1083/1/012015
9. Karaulov A.M., Korolev K.V. A static solution for the problem of the stability of a smooth freestanding sheet pile wall. *Soil Mechanics and Foundation Engineering.* 2017; 54(4):211-215. DOI: 10.1007/s11204-017-9460-6
10. Kudriavtsev S.A., Paramonov V.N., Kazharski A.V., Goncharova E.D. Calculated evaluation of shoring of deep excavation in the restrained urban conditions (Khabarovsk, Russia). *Japanese Geotechnical Society Special Publication.* 2016; 2(79):2722-2725. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-10
11. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. The strength and deformability of clay soils under the regime spatial stress state in view of cracking. *Grounds, Foundations and Soil Mechanics.* 2016; 1:16-23.
12. Brown E.T., Hoek E. Trends in relationships between measured in situ stresses and depth. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.* 1978; 15(4):211-215. DOI: 10.1016/0148-9062(78)91227-5
13. Khademian Z., Shahriar K., Nik M.G. Developing an algorithm to estimate in situ stresses using a hybrid numerical method based on local stress measurement. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2012; 55:80-85. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.05.019
14. Kuntsche K. Deep excavations and slopes in urban areas. *Proc. of the 14-th European Conf. on ISMGE.* Madrid, 2007; 1:63-73.
15. Li G., Mizuta Y., Ishida T., Li H., Nakama S., Sato T. Stress field determination from local stress measurements by numerical modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2009; 46(1):138-147. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.07.009
16. Pei Q., Ding X., Liu Y., Lu B., Huang S., Fu J. Optimized back analysis method for stress determination based on identification of local stress measurements and its application. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment.* 2019; 78(1):375-396. DOI: 10.1007/s10064-017-1118-0
17. Terzaghi K. The Shearing resistance of saturated soils and the angle between the plane of shear. *Proc. 1-st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.* 1936; 1:54-56.
18. Maslov N.N. *Long-term stability and displacement deformation of retaining walls.* Moscow, Energiya, 1968; 160. (rus.).
19. Gol'dshtejn M.N., Turovskaya A.Ya., Lapidus L.S. Landslide investigation. *Geotechnical Issues.* 1932; 5:3-23. (rus.).
20. Zareckij Yu.K. Long-term strength and viscoplasticity of clay soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering.* 1995; 2:2-6. (rus.).
21. Meschyan S.R., Badalyan R.G. About one important regularity of creep of clay soils during shear. *Soil Mechanics and Foundation Engineering.* 1976; 1: 21-23. (rus.).
22. Meschyan S.R. *Initial and long-term strength of clay soils.* Moscow, Nedra, 1978; 207. (rus.).
23. Ter-Stepanyan G.I. *Theory of progressive destruction in ground and rock formations.* Erevan, Publishing House of the Academy of Sciences of the Arm-SSR, 1975; 32. (rus.).
24. Ter-Martirosyan Z.G., Cytovich N.A. Secondary consolidation of clays. *Soil Mechanics and Foundation Engineering.* 1965; 5:12-15. (rus.).
25. Ter-Martirosyan Z., Ter-Martirosyan A., Sidorov V. Settlement and Bearing Capacity of the Pile in A Three-Layer Base Taking into Account the Elastic-Visco-Plastic Properties of Soils. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019; 661(1):012099. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012099
26. Ter-Martirosyan Z.G. *Rheological parameters of soils and calculation of the foundations of structures.* Moscow, Stroyizdat, 1990; 199. (rus.).
27. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Kurilin N.O. Predicting the settlement and long-term bearing capacity of a base of foundation of finite width. *Soil Mechanics and Foundation Engineering.* 2021; 3:6-9. (rus.).
28. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Kurilin N.O. Predicting the Settlement and Long-Term Bearing Capacity of a Base of Foundation of Finite Width. *Soil Mechanics and Foundation Engineering.* 2021; 58(3):190-195. DOI: 10.1007/s11204-021-09727-x
29. Ter-Martirosyan Z.G., Sidorov V.V., Ter-Martirosyan A.Z., Manukyan A.V. Speed of settlement of a pile submerged in the depth of clay soil with due regard for its visco-elastic and visco-plastic properties. *Housing Construction.* 2016; 11:3-6. (rus.).
30. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Sidorov V.V. Creep and long-term bearing capacity of a long pile in clay. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013.* 2013; 2881-2884.

31. Ter-Martirosyan A., Manukyan A., Ermoshina L. Experience of determining the parameters of the elastoviscoplastic soil model. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:02051. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302051
32. Shukle L. *Rheological problems of soil mechanics*. Moscow, Stroyizdat, 1973; 485. (rus.).
33. Idriss I.M., Dobry R., Singh R.D. Nonlinear Behavior of Soft Clays during Cyclic Loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1978; 104(12):1427-1447. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000727
34. Wang G., Sitar N. Numerical analysis of piles in elasto-plastic soils under axial loading. *17th ASCE Engineering Mechanics Conference*. 2004; 1-7.
35. Geuse E.C.W.A., Tjong-Kie T. The mechanical behaviors of clays. *Proceedings of the International Congress on Rheology*. London, 1954; 247-259.
36. Henkel D.J. Investigation of two long-term failures in London clay slopes at Wood Green and Northolt. *Proc. 4-th Intern. Conf. Soil Mech. Found. Eng.* London, 1957; 2:315-320.
37. Higo Y., Oka F., Kodaka T., Kimoto S. A Three — Three-dimensional strain localization of water-saturated clay and numerical simulation using an elasto-viscoplastic model. *Philosophical Magazine*. 2006; 86 (21-22):3205-3240. DOI: 10.1080/14786430500321203
38. Rzhaničyn A.R. *Theory of creep*. Moscow, Stroyizdat, 1968; 419. (rus.).
39. Arutyunyan N.H., Kolmanovskiy V.B. *Theory of creep of inhomogeneous bodies*. Moscow, Nauka, 1983; 336. (rus.).
40. Rabotnov Yu.N. *Creep of structural elements*. Moscow, Nauka, 1966; 752. (rus.).

Received November 2, 2022.

Adopted in revised form on November 16, 2022.

Approved for publication on November 16, 2022.

B I O N O T E S : **Zaven G. Ter-Martirosyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9613-8764, ORCID: 0000-0001-9159-6759, Scopus: 6603474514, ResearcherID: Q-8635-2017; ter-martyrosyanzg@mgsu.ru;

Armen Z. Ter-Martirosyan — Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9467-5304, ORCID: 0000-0001- 8787-826X, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; Ter-MartirosianAZ@gic.mgsu.ru;

Yuliya V. Vanina — postgraduate of department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 791344; yuli.julles@gmail.com.

Contribution of the authors:

Zaven G. Ter-Martirosyan — idea, concept of research, development of methodology, scientific guidance, scientific text editing.

Armen Z. Ter-Martirosyan — scientific text editing.

Yuliya V. Vanina — the product of analytical calculations, writing the source text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 628.14:725.193
DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1677-1686

Моделирование изменения гидравлических характеристик напорных труб в зависимости от температуры

Владимир Александрович Орлов, Сергей Петрович Зоткин,
Дмитрий Александрович Петербургский

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Уменьшение гидравлического сопротивления внутренних стенок напорных трубопроводов из различных материалов — актуальная задача в области трубопроводного транспорта, так как позволяет экономить электроэнергию при транспортировке жидкости. Решение подобных задач возможно с использованием физического и математического моделирования работы трубопроводов при изменении температурных условий в широких диапазонах как транспортируемой среды, так и окружающей обстановки. Физическое моделирование подразумевает экспериментальные исследования процесса транспортировки воды по трубопроводам с выявлением зависимости изменения гидравлических характеристик альтернативных материалов труб от температурного фактора. Поставленная цель моделирования гидравлических характеристик в зависимости от температуры обеспечивается за счет выполнения пилотных экспериментов на гидравлическом стенде, а также применения автоматизированной программы расчета, где имитируется работа производственного трубопровода при различных температурных режимах.

Материалы и методы. Материалами для научных исследований являются трубы из полиэтилена. Метод исследований — проведение экспериментальных и расчетно-аналитических работ.

Результаты. Результат работы представлен комплексным анализом опытных и расчетно-аналитических данных по гидравлическому и энергетическому расчету для полиэтиленовых труб с учетом температурных условий эксплуатации трубопроводных сетей и транспортируемой среды.

Выводы. На основе стендовых гидравлических испытаний полимерного трубопровода мерной длины из полиэтилена ПЭ 80 SDR 9 получены математические зависимости, описывающие динамику изменения потерь напора от расхода для соответствующих температур стенки трубы и транспортируемой воды, что позволяет проводить предварительный анализ обеспечения оптимальных режимов работы трубопроводной системы в широких диапазонах температур. Получены математические зависимости, описывающие изменение потерь напора от расхода для соответствующих температур стенки трубы и транспортируемой воды. С помощью автоматизированного комплекса установлены граничные значения температур окружающей среды и транспортируемой воды, позволяющие производить оценку потребления электроэнергии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидравлические эксперименты, напорные трубы, температурные условия, автоматизированные расчеты, экономия электроэнергии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Орлов В.А., Зоткин С.П., Петербургский Д.А. Моделирование изменения гидравлических характеристик напорных труб в зависимости от температуры // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1677–1686. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1677-1686

Автор, ответственный за переписку: Владимир Александрович Орлов, OrlovVA@mgsu.ru.

Simulation of changes in hydraulic characteristics of pressure pipes depending on temperature

Vladimir A. Orlov, Sergey P. Zotkin, Dmitry A. Petersburgskiy

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

ABSTRACT

Introduction. Reducing the hydraulic resistance of the inner walls of pressure pipelines made of various materials is an urgent task in the field of pipeline transport, as it allows you to save electricity when transporting liquids. The solution of such problems is possible with the use of physical and mathematical modeling of the operation of pipelines under changing temperature conditions in wide ranges of both the transported medium and the surrounding environment. Physical modeling involves conducting experimental studies of the process of transporting water through pipelines with the identification of the dependence of changes in the hydraulic characteristics of alternative pipe materials on the temperature factor. The goal of modeling

hydraulic characteristics depending on temperature is achieved by conducting pilot experiments on a hydraulic stand, as well as using an automated calculation program, where the work of the production system is simulated.

Materials and methods. Materials for scientific research are pipes made of polyethylene (PE). The method of research is to conduct experimental and computational and analytical work.

Results. The result of the work is presented by a comprehensive analysis of experimental and computational and analytical data on hydraulic and energy calculations for polyethylene pipes, taking into account the temperature conditions of operation of pipeline networks and the transported medium.

Conclusions. Mathematical dependences describing the change in pressure losses from the flow rate for the corresponding temperatures of the pipe wall and the transported water are obtained. On the basis of the use of an automated complex, boundary values of ambient temperatures and transported water have been established, allowing for an assessment of electricity consumption.

KEYWORDS: hydraulic experiments, pressure pipes, temperature conditions, automated calculations, energy saving

FOR CITATION: Orlov V.A., Zotkin S.P., Petersburgskiy D.A. Simulation of changes in hydraulic characteristics of pressure pipes depending on temperature. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(12):1677-1686. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1677-1686 (rus.).

Corresponding author: Vladimir A. Orlov, OrlovVA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании новых трубопроводных систем, а также при реновации (модернизации) ветхих напорных трубопроводов должны быть обеспечены их соответствующие прочностные и энергетические показатели, отвечающие условиям долговременной работы сетей при минимальном потреблении электроэнергии на транспортировку жидкостей [1]. Для минимального потребления электрической энергии при перекачке воды, т.е. создания условий эффективной работы напорных трубопроводов, в первую очередь необходимо обратить внимание на степень шероховатости используемых труб, а также учитывать температурный фактор [2–5]. Решение подобных задач сводится к вопросам оперативного управления потреблением электроэнергии на стадии проекта.

Ранее установлено, что изменение температуры транспортируемой по трубопроводу жидкости отражается на ее вязкости и величине коэффициента гидравлического трения [6]. Однако предложенные зависимости и методические подходы решения задачи по определению коэффициента гидравлического трения для широкого ассортимента труб из новых материалов, которые используются в различных природно-климатических, производственных и эксплуатационных условиях, требуют дополнительной проработки [7, 8]. Для любого материала трубопровода, который потенциально рассматривается для работы в различных температурных режимах, важным является проведение стендовых экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях [9, 10]. Способствовать этому, в том числе с подтверждением выдвигаемых по результатам опытов гипотез, предназначены автоматизированные программные комплексы, с помощью которых осуществляется моделирование процессов транспортировки воды в широких диапазонах ее температур по напорным сетям при их работе в различных климатических условиях [11, 12]. Наблюдается симбиоз опытного и расчетно-аналитического подходов к выявлению динамики и диапазонов изменения гидрав-

лических и энергетических характеристик потока жидкости в напорных трубопроводах [13]. Конечная цель подобных подходов — возможность сопоставления натуральных данных с расчетными, оценки их расхождений и корреляции окончательных выводов в соответствующих рамках эксплуатационных характеристик действующих трубопроводных сетей.

Представленное исследование может быть использовано в проектных решениях по экономии электроэнергии и назначению оптимальных режимов работы напорных трубопроводных сетей в зависимости от температуры. Кроме того, благодаря применению автоматизированных комплексов, приведенные сведения могут содействовать прогнозированию эффективной работы трубопроводов в условиях их изношенности, выбора метода ремонта, исключающего утечки, в том числе с помощью бесланшейных технологий [14–20].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами для научных исследований являются трубы из полиэтилена (ПЭ), методом исследований служит проведение экспериментальных (первый этап) и расчетно-аналитических работ (второй этап), которые базируются на использовании теории полуэмпирической турбулентности.

Первый этап заключался в проведении пилотных гидравлических экспериментов на опытном малогабаритном стенде, компоновочная схема которого представлена на рис. 1. Монтаж стенда выполнен в лаборатории кафедры водоснабжения и водотведения НИУ МГСУ.

На рис. 2 показан гидравлический стенд с мерной емкостью, греющим кабелем, электронным терморегулятором и пьезометрами.

Гидравлический стенд представляет собой систему, включающую емкость с водой определенной температуры $t_{ж}$, скрученным в виток (для обеспечения компактности) гибким полимерным трубопроводом мерной длины из полиэтилена ПЭ 80 PN 16 SDR 9 внутренним диаметром 12 мм, помещенным в греющий кабель, и защитную пленку для имитации

различных температурных условий эксплуатации трубопроводной системы. В состав стенда также входит электронный терморегулятор, обеспечивающий требуемый температурный режим стенки трубопровода в период проведения экспериментов. В двух точках полиэтиленового трубопровода за пределами греющего кабеля (до и после него) установлены тонкие патрубки белого цвета (см. рис. 2, *b*) для отбора статического давления воды. Патрубки подсоединены посредством гибких прозрачных полиэтиленовых трубок к платформе с миниатюрным пьезометрическим стендом (рис. 2, *b*).

Работа на экспериментальной установке состояла из операций замера относительных величин потерь напора h на двух пьезометрах как разницы в их показаниях, фиксации расхода Q вытекающей из ем-

кости воды объемным методом с последующим построением графических зависимостей $\Delta h = f(Q)$ в широком диапазоне изменения расходов Q путем его регулирования вентилем.

Таким образом, из емкости к полимерному трубопроводу поступала и вытекала из него вода с относительно стабильной температурой в диапазоне $t_{ж} = 14\text{--}18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в среднем $16\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом необходимо отметить, что относительная стабильность температуры $t_{ж}$ вытекающей из емкости воды в период серии экспериментов достигалась пополнением ее из водопровода. Соответствующая температура стенок трубопровода t (или окружающей его среды) искусственно изменялась и контролировалась датчиком, предварительно настраиваемым на определенный градус.

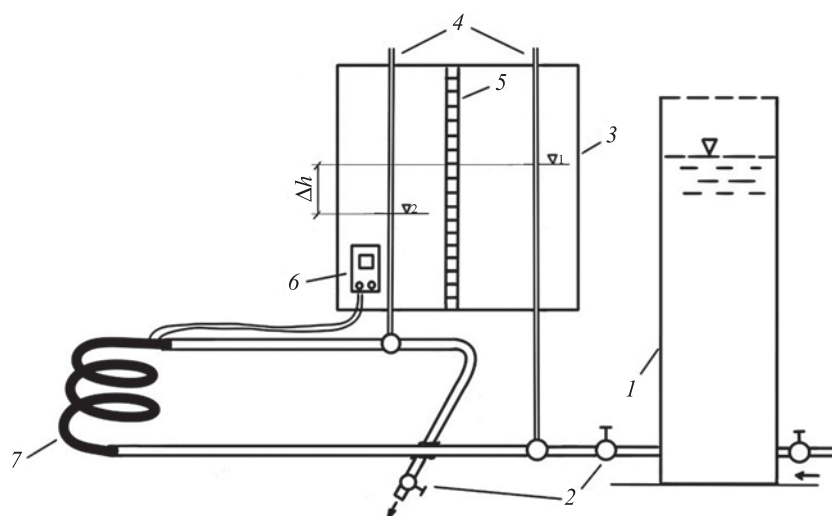


Рис. 1. Эскиз испытательного гидравлического стенда, обернутого греющим кабелем электронного терморегулятора (справа): 1 — емкость с водой определенной температуры; 2 — вентили; 3 — навесная платформа; 4 — пьезометры; 5 — мерная линейка; 6 — электронный терморегулятор МПРТ-11; 7 — скрученная часть трубопровода, помещенная в греющий кабель и защитную пленку

Fig. 1. Sketch of a hydraulic test bench wrapped with a heating cable of an electronic thermostat (right): 1 — a container with water of a certain temperature; 2 — valves; 3 — a hinged platform; 4 — piezometers; 5 — dimensional ruler; 6 — an electronic thermostat MPRT-11; 7 — a twisted part of the pipeline placed in a heating cable and a protective film



a



b

Рис. 2. Отдельные фрагменты экспериментальной установки с мерной емкостью и терморегулятором (*a*) и с пьезометрами, вынесенными на платформу (*b*)

Fig. 2. Individual fragments of an experimental setup with a measuring tank and a temperature controller (*a*) and piezometers placed on the platform (*b*)

Одним из базовых результатов экспериментов стало подтверждение/опровержение принципиальной гипотезы о влиянии нагрева стенки трубопровода на изменение гидравлических сопротивлений трубопровода за счет определенных соотношений динамических вязкостей, отнесенных соответственно к температурам стенки трубы, т.е. окружающего пространства трубопровода (например, находящегося в помещении, при наземной или подземной прокладке труб и т.д.) в условиях стабильной температуры транспортируемой жидкости.

Второй этап работы заключался в моделировании описанной выше ситуации при транспортировке воды с постоянной температурой и изменением температурных условий окружающей трубопровод среды, а также анализе изменения при этих условиях величин энергопотребления. Обработка результатов экспериментов проводилась с помощью запатентованных авторами автоматизированных программ^{1,2}.

Базовый результат функционирования автоматизированного комплекса — определение численных значений таких физических характеристик, как динамическая и кинематическая вязкость, расчетный коэффициент гидравлического трения, величина затрачиваемой энергии на перекачку жидкости, которая выражается через коэффициент гидравлического трения и/или удельного сопротивления трубопровода.

Ниже представлен краткий алгоритм решения описанной задачи.

В автоматизированном комплексе при выполнении расчетов использовались следующие формулы:

1) скорости течения воды V , м/с:

$$V = 4Q/\pi d^2, \quad (1)$$

где Q — расход воды в трубопроводе, м³/с; d — диаметр трубопровода, м;

2) коэффициента динамической вязкости, отнесенного к потоку жидкости $\eta_{ж}$, Па·с:

$$\eta_{ж} = \frac{1}{562 + 17t_{ж} + 0,21t_{ж}^2 - 0,00093t_{ж}^3 + 0,000001t_{ж}^4}, \quad (2)$$

где $t_{ж}$ — температура потока воды;

¹ Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021615221. Анализ потребления электроэнергии при транспортировке воды по напорным трубопроводам из альтернативных материалов / В.А. Орлов, С.П. Зоткин, М.А. Иншакова, В.А. Герасимов. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 06.04.2021.

² Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020661754. Программа расчета гидравлических параметров напорных труб при изменении температурных режимов / В.А. Орлов, С.П. Зоткин, М.А. Иншакова, Д.А. Петербургский. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 30.09.2020.

3) коэффициента динамической вязкости, отнесенного к температуре стенки трубы η_t , Па·с:

$$\eta_t = \frac{1}{562 + 17t + 0,21t^2 - 0,00093t^3 + 0,000001t^4}, \quad (3)$$

где t — температура стенки трубопровода;

4) соотношения динамических вязкостей:

$$Z^* = \eta_{ж}/\eta_t \quad (4)$$

(* если величина Z находилась в диапазоне от 2,5 до 0,83, то расчет продолжался; в противном случае выдавалась распечатка с комментарием «требуется оптимизация температурных параметров»);

5) коэффициента кинематической вязкости жидкости ν , м²/с:

$$\nu = \frac{1}{550\,000 + 21\,000t_{ж} + 110t_{ж}^2 - 0,35t_{ж}^3}; \quad (5)$$

6) чисел Рейнольдса Re :

$$Re^* = 4Q/(\pi d \nu) \quad (6)$$

(* если величина коэффициента Re находилась в диапазоне от $2,8 \cdot 10^4$ до $4,5 \cdot 10^5$, то расчет продолжался; в противном случае выдавалась распечатка с комментарием «требуется оптимизация расхода»);

7) расчетного коэффициента гидравлического трения λ :

$$\lambda = \frac{1}{[1,82 \cdot \lg(Re \cdot Z) - 1,64]^2}; \quad (7)$$

8) потребления электроэнергии $E\lambda$ (через коэффициент гидравлического трения), кВт·ч в год:

$$E\lambda = \frac{0,81 \cdot Q^3 \cdot l \cdot \lambda \cdot 24 \cdot 365}{d^5 \cdot k}, \quad (8)$$

где l — длина трубопровода, м; k — коэффициент полезного действия насосной установки;

9) потребления электроэнергии E_A (через коэффициент удельного сопротивления), кВт·ч в год:

$$E_A = \frac{9,81 \cdot Q^3 \cdot K \cdot l \cdot d^{-n} \cdot 24 \cdot 365}{k}, \quad (9)$$

где n, K — соответственно показатели степени и коэффициент в формуле удельного сопротивления трубопровода.

Следует отметить, что правомерность использования расчетных величин λ для исследуемого материала трубопровода (ПЭ) вместо опытных была предварительно обоснована путем их сравнения при эксплуатации программного комплекса, где расхождение величин гидравлических сопротивлений составило не более 10 %, что для инженерных расчетов можно считать допустимым.

Конечная цель моделирования — выявление динамики снижения потребления электроэнергии при увеличении температуры трубопровода при постоянной температуре транспортируемой воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам первого этапа натурных экспериментов, реализованных на гидравлическом стенде при температуре стенки трубопровода t , равной 17, 25, 30 и 35 °С, и при средней температуре воды в период проведения экспериментов $t_{ж} = 16$ °С, получен ряд графических зависимостей, выборочные из которых представлены на рис. 3. Поддержание температуры воды определенного градуса в мерной емкости обеспечивалось периодическим подливом в нее свежей воды и замером термометром.

Анализ графиков на рис. 3 показывает, что при разных температурах стенок трубопровода наблюдается идентичный линейный характер изменения потерь напора, но при этом прослеживается зависимость: чем выше температура стенки трубопровода, тем меньше потери напора, что, очевидно, связано

с изменением динамической вязкости воды, отнесенной соответственно к температуре стенки трубы. Это подтверждает выдвинутую ранее гипотезу о влиянии температуры стенки трубопровода на изменение гидравлических сопротивлений [6].

Основываясь на данном предположении, по результатам натурных экспериментов для нескольких характерных расходов воды Q выполнены расчеты по определению величин потерь напора для четырех случаев температуры стенки трубы t , т.е. 17; 25; 30 и 35 °С (табл.).

По данным таблицы для наглядности строились зависимости $h = f(t)$ с линиями тренда для увеличенного диапазона температуры стенки трубы t , т.е. от 12 до 40 °С (рис. 4). Искусственное увеличение интервала температур объясняется тем, что такие значения температур в опытах на гидравлическом стенде обеспечить проблематично.

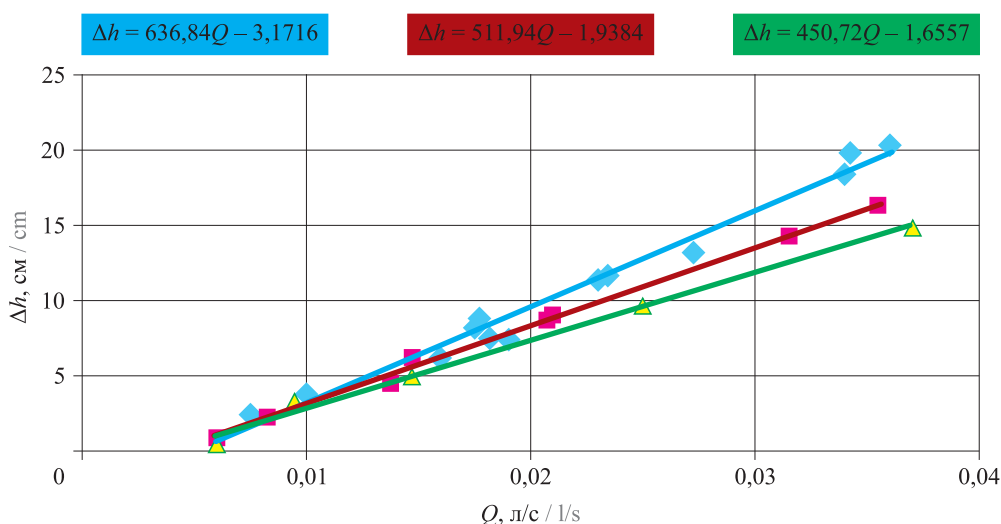


Рис. 3. Графики зависимости потерь напора Δh от расхода воды Q для соответствующих температур стенки трубы t (— для температуры 17 °С, — 30 °С и — 35 °С)

Fig. 3. Graphs of the dependence of the pressure loss Δh on the water flow rate Q for the corresponding pipe wall temperatures t (— for temperature 17 °С, — 30 °С and — 35 °С)

Расчетные данные по величинам потерь напора для нескольких значений расхода транспортируемой воды по трубопроводу при ее температуре $t_{ж} = 16$ °С

Calculated data on the values of pressure losses for several values of the water flow rate of transported water through the pipeline at its temperature $t_j = 16$ °С

Величина потерь напора Δh , см, в виде зависимостей $\Delta h = f(Q)$ The magnitude of the pressure loss Δh , cm, in the form of dependencies $\Delta h = f(Q)$				
Расход воды Q , л/с Water flow rate Q , l/s	При 17 °С At 17 °С $\Delta h = 636,86Q - 3,1741$	При 25 °С At 25 °С $\Delta h = 601,29Q - 2,539$	При 30 °С At 30 °С $\Delta h = 511,94Q - 1,9384$	При 35 °С At 35 °С $\Delta h = 450,72Q - 1,6567$
0,02	9,5631	9,4868	8,3004	7,35
0,03	15,9317	15,4997	13,4198	11,8649
0,035	19,116	18,50615	15,9795	14,1185

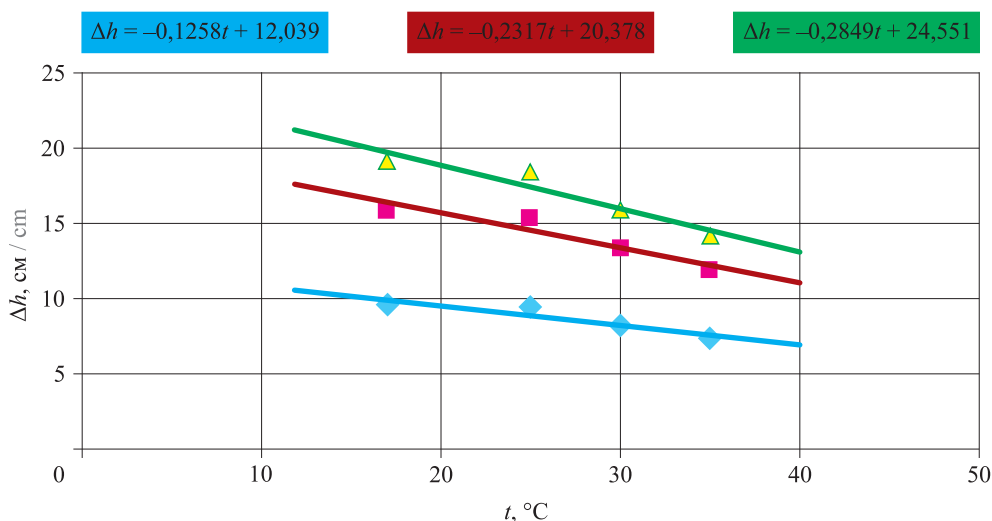


Рис. 4. Графики зависимости потерь напора Δh от расхода воды Q для соответствующих температур стенки трубы t с линиями тренда для 12 и 40 °С при Q : 0,02 л/с (— кривая); 0,03 л/с (—) и 0,035 л/с (—)

Fig. 4. Graphs of the dependence of the pressure loss Δh on the water flow rate Q for the corresponding pipe wall temperatures t with trend lines for 12 and 40 °C at Q : 0.02 l/s (— curve); 0.03 l/s (—) and 0.035 l/s (—)

В качестве выводов по первому этапу исследований необходимо отметить, что, изменяя величины температурных параметров трубопровода t , можно получить расчетные зависимости величины коэффициентов гидравлического трения от динамической вязкости в широких диапазонах температур стенки трубопровода, используя для расчетов автоматизированный комплекс. Это также можно отнести к температуре транспортируемой воды $t_{ж}$. Кроме того, это позволяет отслеживать экономический эффект работы трубопроводной системы в части снижения затрат на перекачку воды при различных ее температурах и соответствующей температуре окружающей среды.

Такая задача, как указывалось выше, была сформулирована для второго этапа исследований, т.е. выявления возможности оптимизации процесса транспортировки воды и управления им с помощью предварительных автоматизированных расчетов по установлению затрат электроэнергии при применении соответствующих материалов напорных сетей, варьируя диапазонами температур воды и стенки трубопровода.

Результатом второго этапа расчетно-теоретических исследований, выполняемых с помощью автоматизированного комплекса, стал анализ выходной информации и построение ряда зависимостей, позволяющих осуществлять управление работой трубопроводной системы, выявляя ее оптимальные температурные параметры.

В качестве входной информации каждого этапа расчета на автоматизированном комплексе использовался определенный набор показателей. В виде примера приведены выборочные значения показателей одного из этапов расчета.

Входная информация.

1. Материал трубы — полиэтиленовая труба SDR 17 с наружным диаметром 200 мм.
2. Внутренний диаметр d , м (0,1762).
3. Протяженность трубопровода L , м (150).
4. Расход воды Q , м³/с (0,025).
5. Коэффициент полезного действия насосной установки k (0,95).
6. Температура потока жидкости $t_{ж}$, градусы Цельсия (16 °C).
7. Температура стенки трубы t , градусы Цельсия (10 °C).
8. Коэффициент в формуле удельного сопротивления материала трубы K (0,0004).
9. Степень диаметра в формуле удельного сопротивления n (5,7276).

Выходная информация по представленному выше этапу расчета включала следующие значения показателей.

1. Скорость течения воды в трубе 1,0253 м/с.
2. Коэффициент динамической вязкости, относенный к потоку жидкости, — 0,001131151 Па·с.
3. Коэффициент динамической вязкости, относенный к температуре стенки трубы, — 0,001329635 Па·с.
4. Соотношение динамической вязкости — 0,851.
5. Коэффициент кинематической вязкости жидкости — 0,000001096 м²/с.
6. Число Рейнольдса — 164886,40.
7. Расчетный коэффициент гидравлического трения — 0,016746.
8. Потребление электроэнергии через коэффициент гидравлического трения — 1726,117 кВт·ч/год.

9. Потребление электроэнергии через коэффициент удельного сопротивления — 1766,027 кВт·ч/год.

Сущность последующего анализа результатов автоматизированного расчета гидравлических и энергетических параметров трубопроводной системы при изменении температурных условий сводилась, в частности, к выявлению зависимости величины коэффициента гидравлического трения от динамической вязкости, отнесенной к температуре стенки трубы. Кроме того, анализу подверглись величины потребления электроэнергии через коэффициенты гидравлического трения λ и удельного сопротивления A трубопровода определенной длины L , диаметра d , расхода Q транспортируемой воды и других показателей, значения которых приведены выше.

Моделирование проводилось в оптимальном интервале значений температур стенки трубопровода t , установленным ранее при эксплуатации программного комплекса при соблюдении расчетных параметров в допустимой области. Результаты расчета показали,

что при температуре воды свыше 60 °С значения величин чисел Рейнольдса и соотношения вязкостей выходят за рамки установленных значений, что свидетельствует о невозможности предварительной оценки изменения потребления электроэнергии, т.е. управления системой в данном диапазоне температур воды. Таким образом, предварительная теоретическая оценка потребления энергии в системе горячего водоснабжения становится невозможной. Это же относится к температуре воды менее 10 °С. На рис. 5 представлены графические зависимости изменения коэффициента гидравлического трения λ трубопровода от температуры t его стенки, т.е. $\lambda = f(t)$, что фактически повторяет натурные эксперименты, где выявлялась зависимость потерь напора от температурных условий и расхода воды. Однако использование программного комплекса позволило провести оценку изменения расчетных параметров в более широких диапазонах температуры стенки трубы t при разных значениях температуры транспортируемой воды $t_{ж}$.

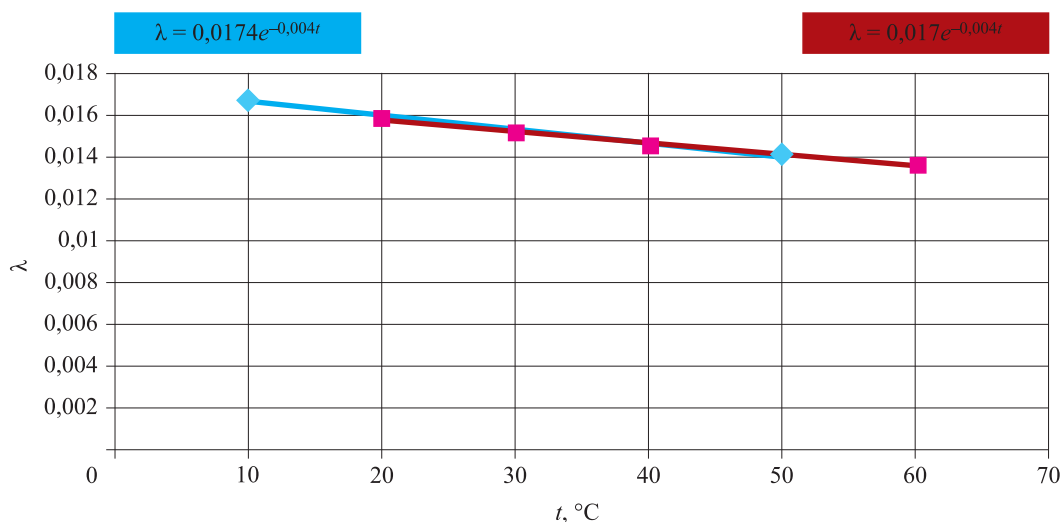


Рис. 5. Зависимость величины коэффициента гидравлического трения λ от динамической вязкости, отнесенной к температуре стенки полиэтиленовой трубы, при постоянном расходе воды 0,025 м³/с при температуре воды $t_{ж}$ 12 °С (— кривая) и 25 °С (—)

Fig. 5. The dependence of the value of the coefficient of hydraulic friction λ on the dynamic viscosity related to the temperature of the polyethylene pipe wall at a constant water flow rate of 0.025 м³/s at a water temperature $t = 12$ °С (— curve) and 25 °С (—)

Как следует из рис. 5, кривые $\lambda = f(t)$ близки друг к другу (фактически накладываются друг на друга), хотя температуры транспортируемой воды отличаются почти в 2 раза (т.е. 12 и 25 °С). Это свидетельствует о том, что температура транспортируемой воды $t_{ж}$ по сравнению с температурой стенки трубопровода t не оказывает существенного влияния на динамику изменения величины коэффициента гидравлического трения λ .

На рис. 6 для аналогичных температурных условий приведены графики изменения (уменьшения) потребления электроэнергии E_{λ} (см. формулу (8)) при

расчете ее через коэффициенты гидравлического трения λ в виде процентов P от величин потребленной электроэнергии E_A . Для подсчета энергетических характеристик E_A по формуле (9) температура стенки трубы в ней отсутствует, а значения E_A остаются неизменными при любой температуре стенки трубы t . Так, например, при исходных данных, представленных выше, потребление электроэнергии, рассчитанное по формуле (9), составляет 1766,027 кВт·ч, а по формуле (8) — 1726,117 кВт·ч/год. В процентном отношении наблюдается снижение потребления электроэнергии на 2,18 %.

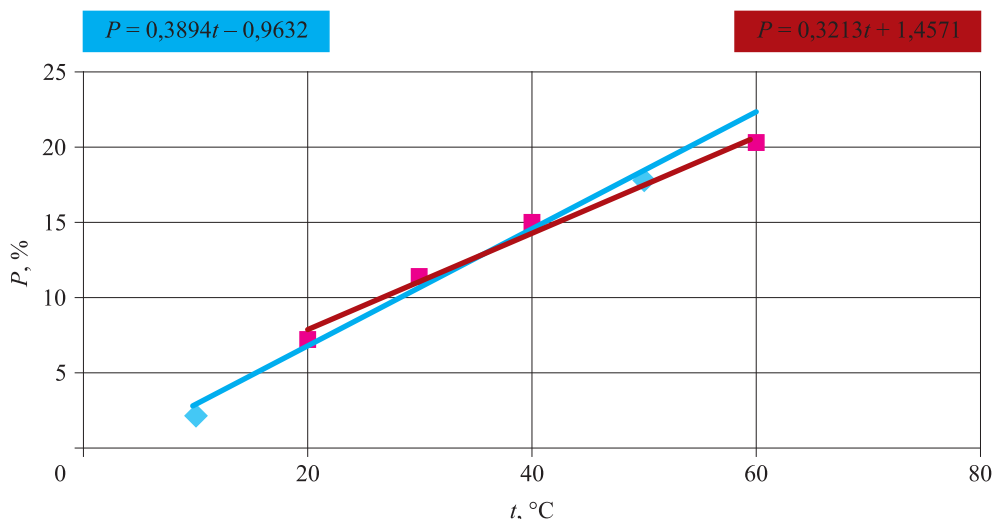


Рис. 6. Иллюстрация снижения процента потребления P , %, электроэнергии при изменении температуры t стенки трубопровода (— кривая при температуре воды 12 °C и — 25 °C)

Fig. 6. Illustration of a decrease in the percentage of electricity consumption P , %, when the temperature t of the pipeline wall changes (— curve at a water temperature of 12 °C and — 25 °C)

Анализ кривых на рис. 6 показывает их практически идентичный характер. Можно констатировать, что чем больше температура стенки трубопровода, тем процент снижения потребления электроэнергии будет выше.

Представленные на рис. 5 и 6 результаты свидетельствуют о возможности достижения определенного положительного эффекта от повышения температуры стенок трубопровода в плане уменьшения гидравлических сопротивлений движению жидкости и снижения энергозатрат на транспортировку воды по напорным водопроводным сетям с относительно высокой температурой наружных стенок. На практике это относится к достижению положительного эффекта в виде экономии электроэнергии при транспортировке воды при проектировании, строительстве и ремонте наземных и надземных напорных систем трубопроводов в южных регионах. В противном случае, т.е. при размещении трубопровода в зоне низких температур (например, в условиях вечной мерзлоты или в зимних условиях), холодная наружная поверхность трубопровода будет провоцировать повышение гидравлических сопротивлений, что негативно отразится на повышении потребления электроэнергии. Используя результаты гидравлических экспериментов и автоматизированную программу расчета, возможно получение аналогичных математических зависимостей с определением оптимальной области эффективной эксплуатации инженерных сетей для любого материала и диаметра трубопровода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе стендовых гидравлических испытаний полимерного трубопровода мерной длины из полиэтилена ПЭ 80 SDR 9 получены математические зависимости, описывающие динамику изменения потерь напора от расхода для соответствующих температур стенки трубы и транспортируемой воды, что позволяет проводить предварительный анализ обеспечения оптимальных режимов работы трубопроводной системы в широких диапазонах температур.

В результате проведенных экспериментов и выполнения теоретических разработок, включая создание автоматизированной программы моделирования гидравлических и энергетических параметров трубопроводов в широких диапазонах температур транспортируемых вод и стенок труб из ПЭ 100 SDR 17, получен важный практический материал для проектировщиков, который может быть использован при обосновании принятия решений на стадии разработок по оптимизации строительства, ремонта и эксплуатации трубопроводного транспорта в различных климатических зонах.

С помощью автоматизированного комплекса установлены граничные значения температур окружающей среды и транспортируемой воды, позволяющие производить оценку потребления электроэнергии на этапе проектирования и эксплуатации магистральных трубопроводных коммуникаций, т.е. иметь возможность влиять на их управление в целях экономии энергозатрат на транспортировку воды по напорным сетям систем водоснабжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Gavrilas M., Gavrilas G.* Improving energy efficiency in water distribution systems based on water consumption profiling // *Environmental Engineering and Management Journal*. 2008. Vol. 7. Issue 3. Pp. 321–327. DOI: 10.30638/eemj.2008.035
2. *Grossmann S., Lohse D.* Curvature effects on the velocity profile in turbulent pipe flow // *The European Physical Journal E*. 2017. Vol. 40. Issue 2. DOI: 10.1140/epje/i2017-11504-x
3. *Александров В.И., Гвоздев О.Б., Карелин А.Э., Морозов А.А.* Оценка влияния шероховатости внутренней поверхности гидротранспортных трубопроводов на величину удельных потерь напора // *Горное оборудование и электромеханика*. 2017. № 3 (130). С. 34–40.
4. *Орлов В.А.* Бестраншейные технологии и энергосбережение. М. : Изд-во АСВ, 2021. 124 с.
5. *Продоус О.А., Якубчик П.П.* Гидравлический расчет трубопроводов из полимерных материалов с учетом параметров шероховатости внутренней поверхности труб (в порядке обсуждения) // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2020. № 11. С. 55–60.
6. *Альциуль А.Д.* Гидравлические сопротивления. М. : Недра, 1982. 224 с.
7. *Салаватов С.Ю.* Характеристика мерзлых грунтов при инженерно-геологических изысканиях // *Символ науки: Международный научный журнал*. 2017. Т. 2. № 1. С. 32–34.
8. *Орлов В.А., Нечитаева В.А., Петербургский Д.А.* Строительство и реконструкция трубопроводов в условиях вечной мерзлоты // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2021. № 5 (233). С. 18–23.
9. *Сухарев М.Г., Карасевич А.М., Самойлов Р.В., Тверской И.В.* Исследования гидравлического сопротивления полиэтиленовых трубопроводов // *Инженерно-физический журнал*. 2005. Т. 78. № 2. С. 136–144.
10. *Чесноков Ю.Г.* Новые формулы для расчета характеристик течения жидкости или газа в трубе кругового поперечного сечения // *Инженерно-физический журнал*. 2017. Т. 90. № 4. С. 1005–1011.
11. *Самарин О.Д.* Построение универсальной зависимости для потерь давления в трубопроводах // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2016. № 1 (169). С. 24–25.
12. *Gavrilas M., Gavrilas G., Ivanov O.* Electricity load prediction for water supply systems // *Environmental Engineering and Management Journal*. 2008. Vol. 7. Issue 4. Pp. 453–458. DOI: 10.30638/eemj.2008.067
13. *Ghanbari A., Farshad F.F.* Newly developed friction factor correlation for pipe flow and flow assurance // *Journal of Chemical Engineering*. 2011. Vol. 2. Pp. 83–86.
14. *Fang X., Xu Y., Zhou Z.* New correlations of single-phase friction factor for turbulent pipe flow and evaluation of existing single-phase friction factor correlations // *Nuclear Engineering and Design*. 2011. Vol. 241. Issue 3. Pp. 897–902. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.12.019
15. *Альциуль А.Д., Калицун В.И., Майрановский Ф.Г., Пальгунов П.П.* Примеры расчетов по гидравлике. М. : Изд-во Альянс, 2013. 255 с.
16. *El Drainy Y.A., Saqr K.M., Aly H.S., Jaafar Mohammad N.M.* CFD Analysis of Incompressible Turbulent Swirling Flow through Zanker Plate // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2009. Vol. 3. Issue 4. Pp. 562–572. DOI: 10.1080/19942060.2009.11015291
17. *Продоус О.А.* Прогнозирование потерь напора в трубопроводах из разных полимерных материалов // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2018. № 11. С. 60–64.
18. *Сычев О.Ф.* О целесообразности создания гидравлической модели для изношенных водопроводных сетей // *Вода MAGAZINE*. 2017. № 3 (115). С. 18–22.
19. *Орлов В.А.* Трубопроводы систем транспорта жидкостей. М. : Изд-во АСВ, 2022. 237 с.
20. *Примин О.Г.* Утечки воды. М. : МГСУ, 2022. 167 с.

Поступила в редакцию 12 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 31 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 10 ноября 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Александрович Орлов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; OrlovVA@mgsu.ru;

Сергей Петрович Зоткин — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ZotkinSP@mgsu.ru;

Дмитрий Александрович Петербургский — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Piter.rus@inbox.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gavrilas M., Gavrilas G. Improving energy efficiency in water distribution systems based on water consumption profiling. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2008; 7(3):321-327. DOI: 10.30638/eemj.2008.035
2. Grossmann S., Lohse D. Curvature effects on the velocity profile in turbulent pipe flow. *The European Physical Journal E*. 2017; 40(2). DOI: 10.1140/epje/i2017-11504-x
3. Alexandrov V.I., Gvozdev O.B., Karelin A.E., Morozov A.A. Evaluation of the effect of the roughness of polyurethane coating on the inner surface of pipelines on specific head loss in the hydrotransport systems. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2017; 3(130):34-40. (rus.).
4. Orlov V.A. *Trenchless technologies and energy saving*. Moscow, ASV Publ., 2021; 124. (rus.).
5. Prodous O.A., Yakubchik P.P. Hydraulic calculation of pipelines made of polymer materials taking into account the parameters of the roughness of the inner surface of the pipes (in order of discussion). *Water Supply and Sanitary Equipment*. 2020; 11:55-60. (rus.).
6. Altshul A.D. *Hydraulic resistances*. Moscow, Nedra Publ., 1982; 224. (rus.).
7. Salavatov S.Yu. Characteristics of frozen soils during engineering and geological surveys. *Symbol of Science: International Scientific Journal*. 2017; 2(1):32-34. (rus.).
8. Orlov V.A., Nechitaeva V.A., Peterburgskiy D.A. Construction and reconstruction of pipelines in permafrost conditions. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2021; 5(233):18-23. (rus.).
9. Sukharev M.G., Karasevich A.M., Samoilov R.V., Tverskoi I.V. Investigation of the hydraulic resistance in polyethylene pipelines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005; 78(2):136-144. (rus.).
10. Chesnokov Y.G. New formulas for calculating the fluid flow characteristics in a circular pipe. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017; 90(4):1005-1011. (rus.).
11. Samarin O.D. Construction of a universal dependence for pressure losses in pipelines. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2016; 1(169):24-25. (rus.).
12. Gavrilas M., Gavrilas G., Ivanov O. Electricity load prediction for water supply systems. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2008; 7(4): 453-458. DOI: 10.30638/eemj.2008.067
13. Ghanbari A., Farshad F.F. Newly developed friction factor correlation for pipe flow and flow assurance. *Journal of Chemical Engineering*. 2011; 2:83-86.
14. Fang X., Xu Y., Zhou Z. New correlations of single-phase friction factor for turbulent pipe flow and evaluation of existing single-phase friction factor correlations. *Nuclear Engineering and Design*. 2011; 241(3):897-902. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.12.019
15. Altshul A.D., Kalitsun V.I., Mayranovsky F.G., Palgunov P.P. *Examples of calculations on hydraulics*. Moscow, Publishing house Alliance, 2013; 255. (rus.).
16. El Drainy Y.A., Saqr K.M., Aly H.S., Jaafar Mohammad N.M. CFD Analysis of Incompressible Turbulent Swirling Flow through Zanker Plate. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2009; 3(4):562-572. DOI: 10.1080/19942060.2009.11015291
17. Prodous O.A. Predicting head loss in pipelines made of different polymer materials. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2018; 11:60-64. (rus.).
18. Sychev O.F. Do I need to create a hydraulic model for the worn water supply networks. *Water MAGAZINE*. 2017; 3(115):18-22. (rus.).
19. Orlov V.A. *Pipelines of liquid transport systems*. Moscow, ASV Publ., 2022; 237. (rus.).
20. Primin O.G. *Water leaks*. Moscow, MGSU, 2022; 167. (rus.).

Received October 12, 2022.

Adopted in revised form on October 31, 2022.

Approved for publication on November 10, 2022.

BIONOTES: **Vladimir A. Orlov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; OrlovVA@mgsu.ru;

Sergey P. Zotkin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor 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; ZotkinSP@mgsu.ru;

Dmitry A. Petersburgsky — postgraduate of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Piter.rus@inbox.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.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 556.535.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1687-1706

Гидрологические исследования бассейна реки Мереп-Гаш в интересах управления водными ресурсами Эритреи

Ангхесом Алемнгус Гебрехивот, Дмитрий Вячеславович Козлов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Адаптация к изменению климата и смягчение его последствий посредством эффективного управления водными ресурсами имеет важное значение для достижения целей устойчивого развития Эритреи. Требуется строительство новых объектов водной инфраструктуры и обслуживание существующих, что можно сделать только с использованием актуальной гидрологической информации. Данное исследование направлено на получение уникальной информации и выбор эффективных инструментов для моделирования стока в бассейне реки Мереп-Гаш.

Материалы и методы. Рассмотрели физически обоснованные полураспределенные и концептуальные модели с использованием наборов данных реанализа климата и геоморфологических характеристик водосбора. Перед использованием моделей формирования стока изучались входные параметры, их статистические и пространственные закономерности, методы оценки потенциальной эвапотранспирации и условия засухи в речном бассейне. Для решения каждой из этих задач применялись два или более методических подхода.

Результаты. Модель GIUH-Nash обладает высокой эффективностью для получения достоверных значений в большинстве расчетных случаев независимо от источников и разрешения цифровых моделей рельефа, но оказалось, что она чувствительна к типу алгоритма формирования речной сети. Концептуальные математические модели NAM и SWAT показали завышенные значения осадков с использованием данных реанализа, что, в свою очередь, оказало существенное влияние на другие выходные параметры, такие как потенциальное испарение, и таким образом привело к значительному расхождению между моделируемым и наблюдаемым стоком.

Выводы. Несмотря на то что массивы данных реанализа имеют большое преимущество перед наземными наблюдениями с точки зрения их простоты и доступности, результаты исследования продемонстрировали необходимость критического отношения к обоим источникам исходных данных. Для минимизации неопределенностей математических моделей и, как следствие, улучшения возможностей моделирования не существует качественной альтернативы восстановлению существующих, а также новых наземных станций гидрометеорологических наблюдений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Эритрея, речной бассейн, математическая модель, реанализ системы климатического прогноза, цифровая модель рельефа, статистический анализ, эффективность модели

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гебрехивот А.А., Козлов Д.В. Гидрологические исследования бассейна реки Мереп-Гаш в интересах управления водными ресурсами Эритреи // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1687–1706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1687-1706

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Вячеславович Козлов, kozlovdv@mail.ru.

Hydrological and water resources investigations of the Mereb-Gash river basin in Eritrea

Anghesom A. Ghebrehiwot, Dmitry V. Kozlov

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

ABSTRACT

Introduction. Adaptation and mitigation of climate change and its consequences through effective water resources management, among others, is essential for achieving sustainable development goals. The construction of water infrastructure facilities and the maintenance of existing ones which can be done with up-to-date hydrological information are required. Therefore, this study aims at obtaining unique information and choosing effective tools for stream flow simulations in Mereb-Gash river basin.

Materials and methods. To this end, physically-based semi-distributed and conceptual models are investigated using climate reanalysis datasets and geomorphologic catchment characteristics. Prior to feeding model forcing variables, their statistical and spatial patterns, methods of potential evapotranspiration estimations, and basin drought conditions are studied. Two or more approaches have been employed for each of these tasks.

Results. GIUH-Nash model has the potential to produce acceptable values in most cases irrespective of sources and resolutions of digital elevation models, but it is found to be sensitive to the type of algorithms selected for stream network generations. The continuous simulation models reveal considerable overestimation of most of the precipitation in the reanalysis

datasets, which in turn has a significant effect on other variables, such as potential evapotranspiration and thereby leading to a substantial discrepancy between simulated and observed.

Conclusions. Despite the fact that reanalysis dataset has a great advantage over ground-based observations in terms of their simplicity and accessibility, the research results have shown the need for a critical attitude to both sources of initial data. To minimize the uncertainties of mathematical models and thereby to improve modeling capabilities, there is no qualitative alternative to restoring existing as well as new ground-based observation stations.

KEYWORDS: climate forecast system reanalysis, digital elevation model, Eritrea, model efficiency, mathematical model, river basin, statistical analysis

FOR CITATION: Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Hydrological and water resources investigations of the Mereb-Gash river basin in Eritrea. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(12):1687-1706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1687-1706 (rus.).

Corresponding author: Dmitry V. Kozlov, kozlovdv@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата существенно влияют на доступность, количество и качество водных ресурсов, тем самым оказывая воздействие на продовольственную безопасность, энергетику и экономику, а также устойчивость экосистем. Гидрологические изменения, вызванные трансформацией климатических условий, создают дополнительные проблемы для управления водными ресурсами. Водные ресурсы Восточной Африки подвержены сильной гидрологической и климатической изменчивости как в пространстве, так и во времени, и служат ключевыми факторами, сдерживающими экономическое развитие. В результате этот регион является экологически, социально и экономически уязвимым к стихийным бедствиям и изменениям климата. Глобальные и региональные прогнозы [1] указывают на то, что эти территории, как ожидается, будут испытывать растущий дефицит воды и влияние на них процессов опустынивания земель. Следовательно, адаптация к перемене климата, смягчение этих проблем и их последствий посредством, в том числе, эффективного управления водными ресурсами имеет важное значение для достижения целей устойчивого развития региона. В этой связи возможность получения надежных и научно обоснованных оценок текущего состояния водных ресурсов и его прогнозов на будущее имеет первостепенное значение. Создание новых объектов водной инфраструктуры и поддержание в рабочем состоянии действующих гидротехнических сооружений может быть осуществлено только с учетом пространственно-временной изменчивости и на основе точной количественной оценки речного стока. Разработка эффективных механизмов регулирования и экономии воды в регионах с ограниченными естественными водными ресурсами может повысить их доступность, например, за счет активного использования сезонного стока. Таким образом, задачи формирования и расчета речного стока на водосборах недостаточно обеспеченных гидрологически и климатическими данными наблюдений, как это имеет место во многих районах Эритреи, постоянно интересовали исследователей в области инженерной и региональной гидрологии.

Более 72 % населения Эритреи занимается натуральным сельским хозяйством. Растущая численность населения страны необратимо приведет к увеличению спроса на продовольствие. Чтобы удовлетворить его, необходимо должным образом освоить потенциальные пахотные земли Эритреи (около 1,5 млн га), расположенные в основном в засушливых и полупустынных агроэкологических зонах. Однако в этих районах ежегодно выпадает всего от 200 до 400 мм осадков, что недостаточно для высокопродуктивного развития сельскохозяйственного производства, если только не использовать какую-либо технологию орошения. В таких условиях достаточно широко применяется система орошения аккумулярованными ливневыми водами или поливного орошения дождевым стоком. Такой вид орошения определен как оросительная технология, включающая отвод и аккумуляцию ливневых паводковых вод, стекающих с горных хребтов. Потоки воды, протекающие с большими расходами и интенсивностью, продолжительностью от нескольких часов до нескольких дней, сбрасываются по коротким с большим уклоном водотокам в понижения местности или так называемые наливные пруды (малые водохранилища). Западные и восточные низменности Эритреи обладают значительным потенциалом для развития орошаемого земледелия. Поэтому в последние десятилетия в стране предпринимались различные усилия, направленные на освоение этих территорий путем строительства современных систем орошения ливневым (или дождевым) стоком. Количество таких ирригационных систем только в регионе Гаш-Барка увеличилось с 16 (в 2003 г.) до 35 (в 2016 г.). Однако по состоянию на 2018 г. ни один из этих проектов, реализованных, как правило, на гидрологически мало- или неизученных водосборах, не достиг намеченных целей [1]. Отсутствие или недостаточность надежных гидрологических данных, а также управленческие, эксплуатационные и технические проблемы, по-видимому, стали основными причинами низкой эффективности таких мелиоративно-водохозяйственных систем.

В этих условиях при проектировании гидротехнических сооружений и решении сложных задач управления водными ресурсами для получения более

надежных и физически обоснованных оценок стока следует использовать математические модели формирования стока в сочетании с различными исходными данными для рассматриваемых речных бассейнов.

Гидрологические модели имитируют естественные гидрологические и биогеохимические процессы. Они не только являются полезными инструментами, подкрепляющими понимание динамических взаимодействий между климатом и гидрологическими условиями поверхности суши, но и предоставляют недостающую информацию в качестве надежной основы для принятия решений, касающихся развития водных и земельных ресурсов, а также управления ими.

Известно, что широкий спектр задач в области охраны окружающей среды и управления водными ресурсами решается с помощью гидрологических математических моделей [2–6], которые, в первую очередь, требуют исходных данных о речном стоке, климатических характеристиках и другой информации о бассейне [4], как правило, недоступных в полном объеме и зависящих от влияния антропогенной деятельности на компоненты гидрологического цикла. В последние годы наблюдается сокращение численности гидрометрических и метеостанций, в том числе из-за более широкого использования данных глобального климатического реанализа в качестве входных переменных в математическую модель.

Цель исследования заключается в получении уникальной гидрологической информации и выборе эффективного инструмента для моделирования речного стока в бассейне р. Мереп-Гаш в Эритрее. Для ее достижения были решены следующие задачи: проанализировано текущее состояние системы управления водными ресурсами бассейна Мереп-Гаш и предложена стратегия ее устойчивого развития; исследованы устойчивость и статистическая значимость массивов данных климатического реанализа при их использовании в качестве исходной информации в физически обоснованных математических моделях речного стока; установлены условия применимости моделей SWAT и MIKE NAM для моделирования дождевого стока и выполнена оценка эффективности практического использования модели GIUH-Nash (Нэша) на базе геоморфологического мгновенного единичного гидрографа (GIUH) для моделирования на основе отдельного события.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Бассейн Мереп-Гаш, устьева зона которого расположена недалеко от города Кассала (в Судане), имеет сложный ландшафт. В верховьях Мереп-Гаша преобладают гористая местность и высокогорные холмы с ограниченными равнинами (нагорьями) и уклоном более 15 %. На этот тип рельефа приходится 42 %

от общей площади бассейна. Средняя и нижняя части бассейна (29 %) представляют собой преимущественно плоские холмы со средним уклоном от 0 до 5 %. Остальные формы рельефа имеют волнистый (18 %) и сильно наклонный (11 %) характер с уклонами 5–10 % и 10–15 % соответственно. Основное русло р. Мереп-Гаш берет свое начало недалеко от столицы Эритреи города Асмэра и течет строго на юг. Затем река поворачивает на запад, становясь границей между Эфиопией и Эритреей в центральной части страны. И, наконец, далее она течет в западном направлении в Судан, образуя внутреннюю дельту к северу от Кассалы. Известно, что среднегодовой объем стока в Кассале равен 680 млн м³ при максимальном расходе 1000 м³/с [7]. Общая площадь водосбора и длина основного русла Мереп-Гаша составляют приблизительно 22 850 км² и 550 км соответственно. При этом высота над уровнем моря территории водосбора колеблется от 510 до 3164 м (уже в Эфиопии) над средним уровнем моря.

Речные бассейны классифицируются в зависимости от площади, длины основного русла, условий течения и т.д. Мереп-Гаш является крупным речным бассейном, если учитывать его площадь, и средним бассейном — по критерию длины основного русла. Это один из двух крупных речных бассейнов Эритреи, образующих Верхний Нил. Более 76 % площади водосбора находятся на территории Эритреи. С морфометрической точки зрения бассейн Мереп-Гаш характеризуется как длинный, узкий и вытянутый по основному руслу, имеющий коэффициент формы водосбора и его средний уклон 11 и 7 % соответственно [7]. Почвенный покров бассейна Мереп-Гаш столь же разнообразен, как рельеф и климат страны. Почвы в пределах водосбора (рис. 1, б) были описаны с использованием Цифровой карты почв мира (DSMW). На равнинах Западной низменности и Центрального нагорья преобладают йермозолы (32 %) и гуминовые камбисолы (37 %). Очевидна интенсивная эрозия почв, которая вызывает озабоченность и связана с характером выпадения осадков и унаследованной деградацией природной среды.

На территории Эритреи расположено шесть агроэкологических зон: влажные и засушливые нагорья (высокогорья), влажные и засушливые низменности, субгумидный склон и полупустыня. Климат бассейна Мереп-Гаш главным образом представлен влажными высокогорьями и влажными низменностями. Зона влажного высокогорья (нагорья), расположенная в восточной и юго-восточной частях бассейна, где и берет начало главное русло, имеет высоту более 1600 м над средним уровнем моря со среднегодовым количеством осадков от 500 до 700 мм. Зона влажных низменностей, расположенная в центральной части бассейна, имеет диапазон высот от 500 до 1600 м над средним уровнем моря, теплый или жаркий полузасушливый климат и среднегодовое количество осадков от 500 до 800 мм.

Климат крайней нижней части бассейна в большей степени относится к зоне засушливых низменностей, с жарким сухим климатом и среднегодовым количеством осадков от 200 до 500 мм. Климатические условия остальной части речного бассейна (24%), расположенной за пределами Эритреи, обладают

аналогичными характеристиками. Осадки по территории водосбора обычно выпадают на ограниченной площади в виде кратковременных дождей средней или высокой интенсивности. Суммарное испарение также переменное: от чуть более 2000 мм/год с низменностей и до 1500 мм/год в высокогорьях.



Рис. 1. Классификация типов землепользования и расположение гидрометеостанций (а); состав картографических почвенных единиц (b) в бассейне Мероб-Гаш (выполнено на основе GlobeLand30 и почвенной карты мира FAO–ЮНЕСКО)
 Fig. 1. Classification of landuse types and location of hydrometeorological stations (a) and composition of cartographic soil units (b) in the Mereb-Gash basin (based on GlobeLand30 and the UNESCO–FAO soil map of the world)

Водные ресурсы Эритреи характеризуются количественным дефицитом, пространственно-временной изменчивостью и высокой степенью зависимости от различных факторов. С помощью SWOT-анализа проанализированы вопросы использования и управления водными ресурсами с целью разработки стратегии их устойчивого развития. Для этого был выполнен отбор репрезентативных критериев с последующим их количественным и качественным описанием. Отмечена высокая вероятность возникновения опасных природных гидрологических явлений (наводнений, засух), напрямую связанных с трансграничными водными объектами, развитием экстремальных ситуаций, в том числе из-за неблагоприятных последствий изменения климата.

Выбор и настройка моделей

Вопрос выбора математической модели — важная часть гидрологического моделирования, так как объективные подходы к определению наилучшей модели до настоящего времени не разработаны. Выбор модели для условий неизученных (или малоизученных) бассейнов требует особого подхода из-за различных сложностей, которыми они обладают. Поэтому в отсутствие единой наилучшей математической модели для гидрологического моделирования рекомендуется применять две или более моделей и сравнивать их характеристики и эффективность. Для достижения намеченных целей принята совокупность различных подходов к процессам гидрологического моделирования, алгоритмы которых схематично представлены на рис. 2.

Во-первых, смоделировать трансформацию паводка (как одиночного события) при его прохождении по речной системе можно методом «единичного гидрографа». Расчет «единичного гидрографа» для рек, на которых нет доступных гидрологических наблюдений, предлагается выполнять с помощью инструмента мгновенного единичного гидрографа по Нэшу (Nash). Модель Нэша не может быть применена непосредственно к неизученным водосборам из-за нелинейного характера взаимосвязи осадков и стока, а также невозможности соотнести ее параметры с физическими характеристиками водосбора. Использование геоморфоклиматического подхода GIUH, основанного на топологической системе кодировки порядка водотоков, предложенной Хортоном для построения речной сети, позволяет преодолеть эти трудности. Указанный подход имеет конкретное преимущество — возможность определять мгновенный единичный гидрограф, используя только данные цифровой модели рельефа (ЦМР или DEM). Схематизация речного бассейна может быть выполнена с помощью технологий геоинформационных систем (ГИС или GIS) на основе цифровой модели рельефа, от которой зависят результаты гидрологического моделирования. ЦМР и ГИС являются мощными инструментами для получения этих характеристик даже при отсутствии

топографических карт. Точность разрешения ЦМР напрямую влияет на выходную (смоделированную) гидрологическую информацию. Кроме того, эффективность моделей дождевого стока зависит от разрешения выбранной матрицы высот и пороговых значений. Поэтому были проведены исследования по выбору цифровой модели рельефа и алгоритмов обработки данных для математического моделирования на основе подхода GIUH-Nash. Рассмотрены четыре часто используемых ЦМР с открытым исходным кодом и различным разрешением, а также два алгоритма QGIS:GRASS (система поддержки анализа географических ресурсов) и SAGA (система автоматизированного геоанализа). На основании этого создана геоморфологическая база данных суббассейна Дебарва (верховья р. Мереб-Гаш).

Во-вторых, для оценки речного стока и располагаемых водных ресурсов в условиях малоизученного бассейна Мереб-Гаш применены две широко используемые физически обоснованные математические модели, обладающие различной структурой и допущениями: SWAT и MIKE 11-NAM. Непрерывность моделирования стока обеспечивалась исходной информацией, сформированной на основе массивов данных реанализа системы климатических прогнозов (CFSR) Национального центра экологического прогнозирования (США). Данные CFSR охватывали 35-летний период (с 1979 по 2013 гг.) суточных наблюдений по 32 гидрометеостанциям в бассейне р. Мереб-Гаш и вокруг него. Прежде чем использовать указанные данные в качестве входных параметров математических моделей, выполнялся статистический и пространственный анализ массивов спутниковых глобальных климатических данных CFSR; устанавливались причины устойчивых и значимых тенденций климатических характеристик, в том числе потенциальной эвапотранспирации (PET) и условий (индексов) засухи, наблюдавшихся в исследуемом речном бассейне и в регионе в целом. Оценка статистической значимости климатических данных выполнялась с помощью непараметрического теста Манна-Кендалла (МК) и модифицированного теста Манна-Кендалла (ММК), а также оценочной функции Сена (SS), основанных на ранговых статистиках и используемых для оценки достоверности без предположения о характере распределения исходной выборки. Для определения PET с применением доступного R-статистического программного обеспечения были выбраны три наиболее известных алгоритма, встроенных в пакет SPEI: Торнтвейта, Харгривза и Пенмана – Монтейта. Анализ состояния засухи проводился с помощью стандартизованного индекса осадков-испарения (SPEI) [8] и индекса аномалий осадков (RAI) [9].

Далее выполнялись статистические и сравнительные количественные оценки результатов использования выбранных математических моделей, на основе которых были сформулированы выводы об их возможностях и эффективности.

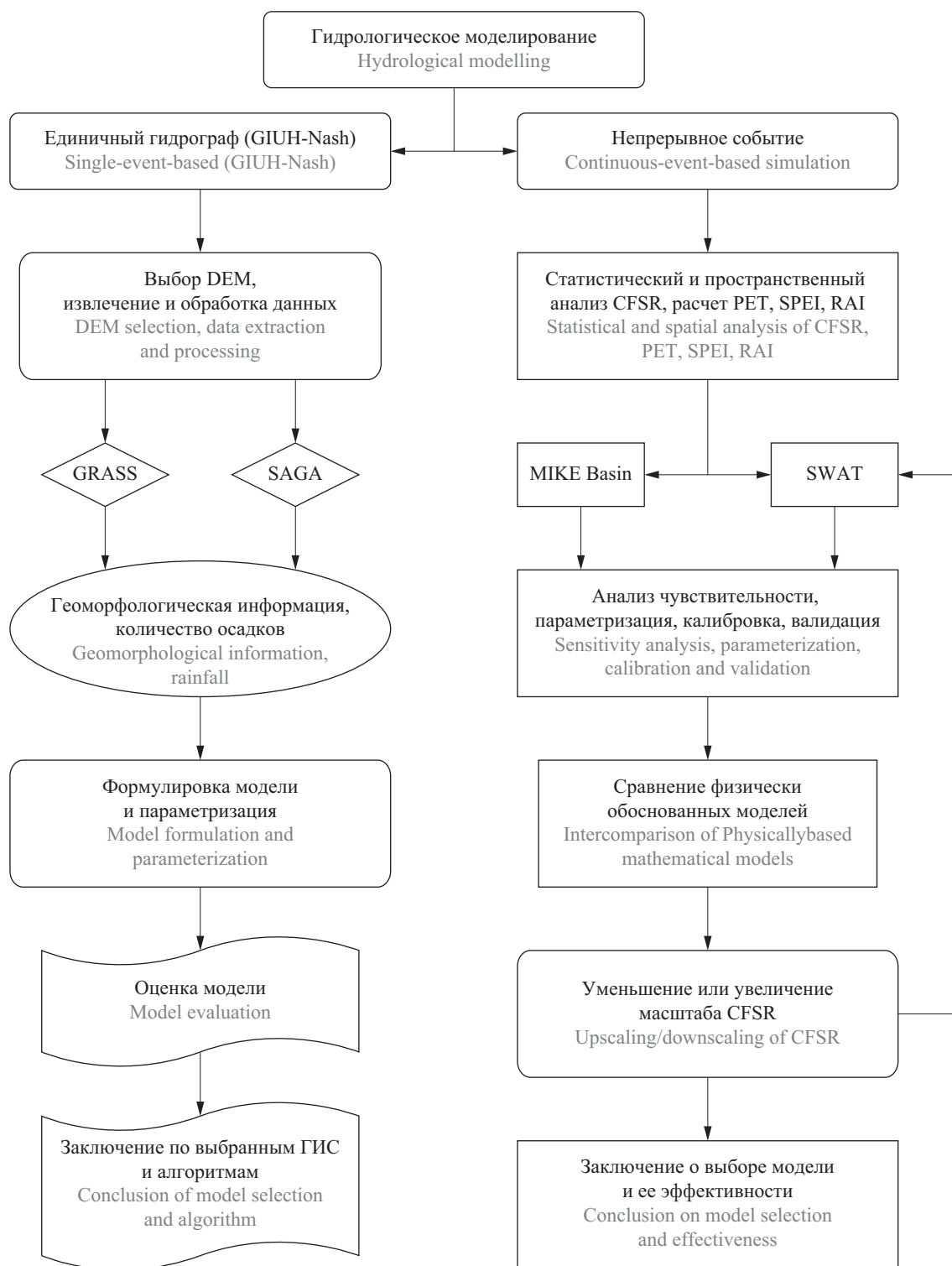


Рис. 2. Укрупненный алгоритм подходов к гидрологическому моделированию, разработанный для решения задач в исследуемом речном бассейне

Fig. 2. Schematic representation of hydrological modeling approach developed for solving problems in the study area

Калибровка и валидация моделей

Калибровка или «обратное моделирование» тесно связана с оценкой неопределенности и заключается в корректировке входных параметров модели для достижения наилучшего соответствия результа-

тов моделирования имеющимся наблюдениям. При калибровке требуется правильное понимание трех важных понятий, таких как параметризация, определение целевой функции и неединственность (неопределенность).

Параметризация должна ответить на вопрос о том, какие параметры, представляющие собой гидрологические процессы в пределах исследуемого бассейна, следует использовать и как их регионализировать. В этой связи следует изучить значимость одного и/или нескольких параметров по отношению к целевой функции или выходным данным модели, т.е. результатам моделирования. Численное моделирование сопровождается оценкой чувствительности полученного решения к неопределенности исходных данных, т.е. анализом неопределенности — это процесс распространения и количественной оценки ошибок во входных данных модели в процессе калибровки. Возможными источниками неопределенности в гидрологическом моделировании являются входные данные модели, в том числе параметры, константы и массивы управляющих данных (например, о типах почв, видах землепользования и осадков, о стоке); допущения и упрощения, принятые в расчетах (например, об инфильтрации воды, ненасыщенности потока), научные знания и представления (законы), положенные в основу модели; стохастическая неопределенность или изменчивость, и вычислительные неопределенности, такие как численные приближения и необнаруженные ошибки программного обеспечения.

Таким образом, калибровка и неопределенность тесно связаны друг с другом. Наконец, откалиброванные (проверенные) параметры с независимым набором данных без дальнейших изменений как параметров, так и структуры расчетной модели тестируются в процессе валидации. Другими словами, валидация используется для повышения уровня доверия к численной модели и откалиброванным параметрам. Обычно рекомендуются два правила, которым необходимо следовать в процессе валидации [10]: 1) использовать тот же диапазон параметров, что и при калибровке; 2) данные, используемые для валидации, должны иметь такие же статистические характеристики, что и данные, используемые для калибровки (например, среднее значение, среднеквадратическое отклонение (стандартное отклонение) и др.). Процессы калибровки и валидации эффективно задействуются только с данными натурных наблюдений.

В настоящем исследовании использовались как ручные, так и автоматизированные алгоритмы калибровки с учетом различных целевых функций, в зависимости от типа применяемой модели. Например, процедура автоматической оптимизации, основанная на многоцелевой стратегии оптимизации, в которой четыре целевые функции могут быть оптимизированы одновременно, являлась частью модели NAM. Эти целевые функции связаны с согласованностью между различными моделируемыми и наблюдаемыми характеристиками внутригодового распределения, расхода и объема стока, включая элементы водного баланса, форму гидрографа, значения пикового и ме-

женного расходов. При ручной калибровке произведена настройка параметров методом проб и ошибок, чтобы можно было определить степень соответствия откалиброванной модели на основе визуальной оценки путем сравнения смоделированных и наблюдаемых гидрографов. Первоначальный выбор параметров зависит от поведения результатов моделирования перед любой калибровкой [11], например параметризация, анализ неопределенности и т.д.

Калибровка и валидация модели SWAT выполнялись с помощью автономной программы SWAT-CUP, объединяющей пять разных алгоритмов оптимизации с SWAT и включающей полуавтоматический алгоритм SUFI-2, одиннадцать вариантов целевой функции и десятки параметров. Несмотря на то что различные подходы к калибровке параметров гидрологической модели дают разные решения, их общая цель — поиск наилучших диапазонов параметров, удовлетворяющих желаемому порогу, назначенному целевой функцией.

Выходные данные, соответствующие каждой целевой функции, обычно уникальны, что обуславливает выбор целевых функций. Чтобы избежать условностей при выборе целевых функций, в модели была предложена многоцелевая функция. Целевые функции отражают степень соответствия между моделируемым и наблюдаемым. Идеального соответствия достичь практически невозможно из-за различных источников неопределенности, имеющихся на водосборном бассейне.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

SWOT-анализ

Разные страны используют различные стратегии управления своими водными ресурсами с возможно общей целью — обеспечение устойчивого развития.

Система развития и управления водными ресурсами имеет три основных направления:

- 1) оценка и информация о водных ресурсах;
- 2) развитие водных ресурсов;
- 3) использование и управление водными ресурсами.

Исследование сильных и слабых сторон сложной системы водных ресурсов бассейна Мереб-Гаш с целью определения соответствующих направлений развития (например, консервативное развитие, стабильное функционирование, интенсивное и инновационное развитие) выполнено на основе SWOT-анализа — инструмента определения стратегии, который учитывает внутренние (сильные и слабые стороны) и внешние (возможности и угрозы) факторы. В то время как комбинации сильных сторон *S* и возможностей *O* имеют положительные или благоприятные эффекты, слабые стороны *W* и угрозы *T* представляют собой отрицательные или неблагоприятные воздействия на систему. Предполагалось, что устой-

чивое развитие системы водных ресурсов включает четыре составляющие показателей: водные ресурсы, социальная, экономическая и экологическая сферы. Для каждой составляющей были выбраны по четыре индикатора, каждый из которых каким-либо образом отражал текущее состояние водных ресурсов Эритреи в целом и бассейна Мереб-Гаш в частности. Глобальные угрозы, такие как изменение климата и его негативные последствия, затрагивают многие отрасли экономики Эритреи, среди них и водохозяйственный комплекс, который может стать наиболее чувствительным к этим изменениям. Глобальные климатические прогнозы также предсказывают усиление экстремальных природных явлений (засух и наводнений), которые, в свою очередь, повысят уязвимость к изменению климата. Недавнее исследование [12] показало, что более 88 % фермерских домохозяйств в Эритрее оказались уязвимыми к изменению климата в результате совокупного воздействия на них внешних факторов, чувствительности к внутренним факторам и снижения адаптивной способности.

Река Нил протяженностью более 6800 км — самая длинная река в мире, расположена в регионе Африканского Рога. Как отмечалось ранее, два крупнейших эритрейских речных бассейна Мереб-Гаш и Сетит являются притоками Нила, годовое количество осадков в которых колеблется от минимального 240 до максимального 665 мм. Эти два бассейна вместе взятые имеют площадь 24 921 км² (0,8 % от общей площади бассейна Нила или 20,4 % от площади страны). В связи с увеличением потребности в воде р. Нил оказалась в центре сложного межгосударственного спора, в котором участвуют несколько

стран, в первую очередь Эфиопия, Египет и Судан. Указанная проблема, наряду с другими внешними факторами, представляет собой потенциальные региональные угрозы для справедливого использования общих водных ресурсов. Результаты формирования обобщенного SWOT-анализа представлены в табл. 1.

С учетом результатов SWOT-анализа стало ясно, что жизнеспособности водохозяйственной системы на национальном или бассейновом уровнях серьезно угрожают неразрывно связанные факторы. Вообще говоря, текущие действия по преодолению «угроз» и «слабостей» не кажутся соразмерными. Глобальные и региональные угрозы устойчивости водной системы требуют неотложного и особого внимания. Однако, очевидно, что скорость изменений (например, климата, деградации земель и т.д.) больше, чем скорость, с которой система может адекватно реагировать, особенно, в региональных условиях Африканского Рога. Поскольку скорость изменений превышает способность реагировать, водохозяйственная система теряет свою жизнеспособность и устойчивость. Помимо глобальных и региональных угроз, социальной устойчивости в Эритрее в настоящее время угрожает повышенная динамика развития современных технологий, экономики и населения, которые могут ускорить темпы экологических и социальных изменений. С другой стороны, растущее институциональное сопротивление реорганизации (структурная инерция) снижает способность своевременно реагировать. Поэтому стратегии, направленные на повышение устойчивости системы водных ресурсов, должны разрабатываться так, как показано на рис. 3.

Табл. 1. Результаты SWOT-анализа системы водных ресурсов Эритреи

Table 1. Results of SWOT-analysis of water resources system of Eritrea

	Сильные стороны Strengths	Слабые стороны Weaknesses
Внутренние условия Internal conditions	Политическая воля и приверженность принципам устойчивого развития. Обеспечение объектов водоснабжения и в целом инфраструктуры. Технологическое и социальное развитие общества. Наличие правил обращения с отходами. Управление речными бассейнами (водосборами) Political will and commitment. Provision of water facilities and infrastructure. Technology transfer and human development. Regulations on waste management. Catchment management	Дефицит воды и изменчивость стока. Низкий экономический рост. Демографическое давление и конкуренция водопользователей. Отсутствие действующих законов о воде. Отсутствие научного обеспечения деятельности органов власти. Недостаточная координация между заинтересованными сторонами. Низкая эффективность реализации проектов Water scarcity and variability. Low economic growth. Population pressure and user competition. Absence of enacted water laws. No scientific support for the activities of authorities. Insufficient coordination among concerned parties. Low efficiency of project implementation

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

		Возможности / Opportunities	Угрозы / Threats
Внешние факторы / External factors	Национальный / National	<p>Скоординированная реализация плана ИУВР. Программы адаптации к изменению климата и смягчению его последствий. Повышение эффективности использования и продуктивности водных ресурсов. Интеграция элементов систем экологического менеджмента. Политическая стабильность Coordinated implementation of IWRM plan. Climate change adaptation and mitigation programmes. Increasing efficiency in use and productivity of water resources. Integration of elements of environmental management systems. Political stability</p>	<p>Экологическая, экономическая, военная и политическая нестабильность. Водные опасности (угрозы и риски) и высокий коэффициент зависимости. Давление загрязняющих веществ. Низкий уровень соблюдения нормативных актов и законодательства. Взаимозависимость водных ресурсов и экологических систем. Слабые механизмы государственного финансирования Environmental, economic, military, and political insecurity. Water security and high dependence ratio. Pollutant pressure. Low level of compliance with regulation and legislation. Interdependence of water resources and environment systems. Weak public financing mechanisms</p>
	Международный International	<p>Мировой опыт в области управления водными ресурсами и экосистемами. Региональное сотрудничество в области интегрированного управления (или комплексного использования) водными ресурсами World experience in water resources and ecosystem management. Regional cooperation on shared water resources utilization</p>	<p>Воздействие трансграничного нерационального управления на водные ресурсы. Глобальные угрозы (например, изменение климата, последствия изменения климата и т.д.) Impacts of transboundary basins mismanagement on water resources system. Global threats (e.g., climate change, its consequences, etc.)</p>

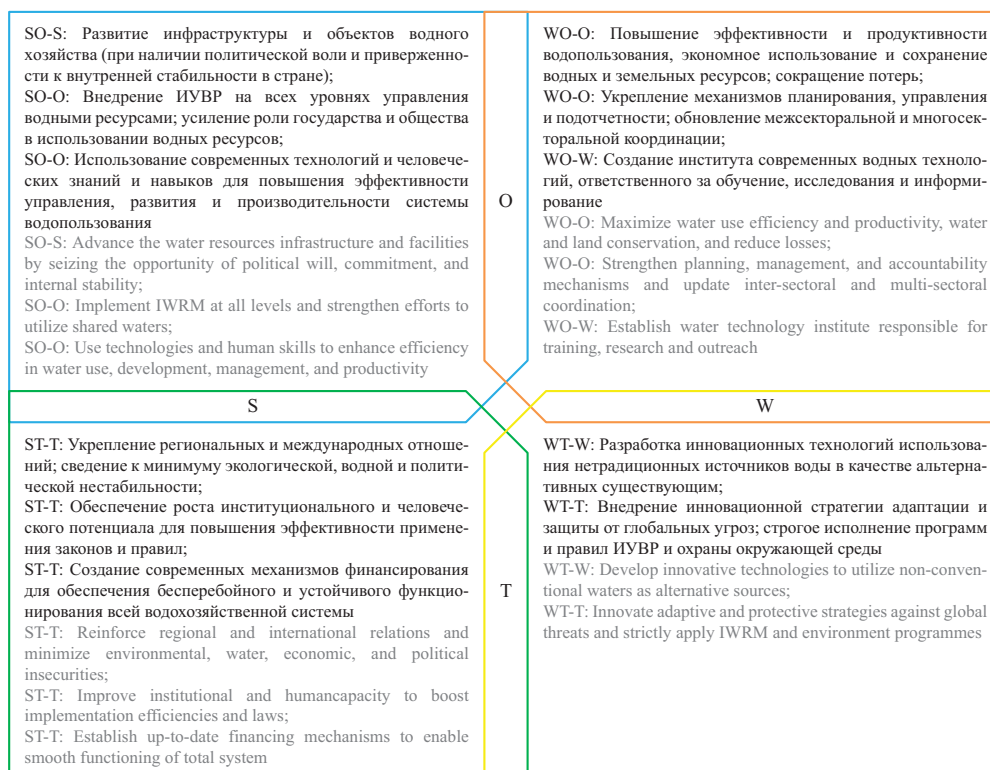


Рис. 3. Стратегия улучшения состояния системы водных ресурсов

Fig. 3. Proposed strategies for improving the condition of the water resources system

Модель стока, основанная на отдельном событии

Гидрологическая модель схематизирует речной бассейн, структурируя его на водотоки различных порядков с учетом зарегулированности стока, используя средства GIS-технологий на основе цифровых моделей рельефа. Формирование речной сети зависит от выбора алгоритмов гидрологической коррекции ЦМР, а качество структурирования сети, в свою очередь, влияет на эффективность модели Нэша на базе GIUH для моделирования речного стока на основе отдельного события (например, дождевого ливня). Поскольку данная модель зависит от характеристик водосбора, исследовано взаимное влияние ЦМР и алгоритмов формирования речной сети, используя четыре наиболее часто применяемых ЦМР с открытым исходным кодом: две из SRTM и по одной из ASTER и ALOS.

Геоморфологическая база данных исследуемой территории Эритреи была создана с применением двух алгоритмов QGIS: системы поддержки анализа географических ресурсов (GRASS) и системы автоматизированного геонаучного анализа (SAGA). При анализе выбранных ЦМР выявлены заметные расхождения и неопределенности в геоморфологических характеристиках речного бассейна. Кроме того, большинство физико-географических параметров, полученных при более низком разрешении, оказались выше, чем при более высоком разрешении.

Несмотря на несоответствие между физико-географическими параметрами и профилями высот, полученными из различных ЦМР для суббассейна Дебарва, их влияние на результаты расчета стока, основанные на модели GIUH-Nash, оказалось незна-

чительным в отличие от других моделей, таких как TOPModel [13] и SWAT [14]. С другой стороны, расчетные (смоделированные) гидрографы, полученные на основе SAGA, показали значительное несоответствие с наблюдаемыми гидрографами. Результат более низких значений параметров Нэша, полученных с использованием алгоритма SAGA, был значительным. Расчеты стока, выполненные на основе GRASS, оказались менее зависимы от исходного источника и разрешения ЦМР, чем на основе SAGA.

Алгоритм GRASS генерировал гидрографы паводковых расходов с требуемой точностью до наблюдаемых значений как визуально, так и количественно (рис. 4, а), тогда как эффективность модели, построенной на основе алгоритма SAGA, была признана неудовлетворительной, главным образом, для ЦМР с более высоким разрешением. Напротив, ЦМР с более низким разрешением и модель Нэша, построенная на основе SAGA, моделировали сток так же хорошо, как и модель, основанная на алгоритме GRASS. Более низкое разрешение обеспечило относительно стабильную и приемлемую эффективность, чем более высокое разрешение, что соответствует выводам, сделанным в других исследованиях [15]. То есть исходный источник и разрешение ЦМР незначительно повлияли на эффективность модели GIUH-Nash по сравнению с выбором алгоритма (рис. 4, б).

Коэффициент Маннинга является одним из наиболее чувствительных параметров, сильно влияющим на общую эффективность модели GIUH-Нэша. Следовательно, наиболее подходящее значение этого коэффициента, соответствующее рассматриваемой морфометрии водосбора, должно быть определено до его использования в модели речного стока.

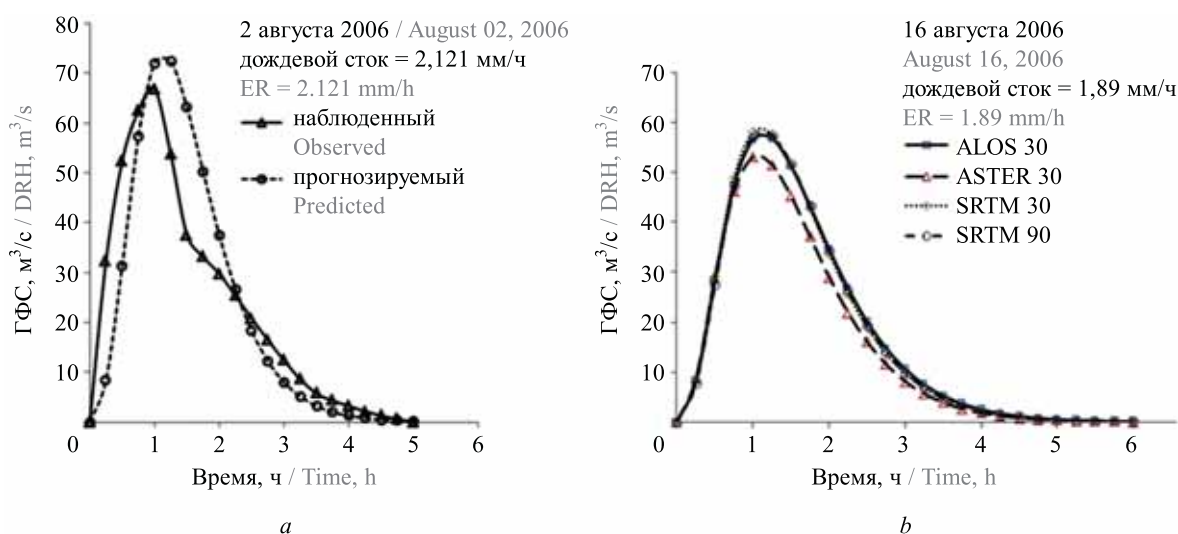


Рис. 4. Сравнение расчетного гидрографа фактического стока для заданных эффективных осадков (ER) по GRASS: а — с данными наблюдений и б — между различными вариантами ЦМР

Fig. 4. Comparison of the calculated hydrographs of the direct surface runoff for a given effective rainfall (ER) using GRASS: а — with observational data and б — between different DEMs

Таким образом, выбор ЦМР при расчете гидрографа стока оказывает незначительное влияние на расчет речного стока по модели GIUH-Nash, и поэтому их можно использовать без существенных ограничений по источнику. Но следует проявлять большую осторожность при выборе алгоритмов генерации речной сети, особенно для водосборов, основные русла которых соединяются вблизи места слияния двух крупных рек.

Статистический анализ и тенденции климатических характеристик

Статистический анализ массивов ежедневных данных об осадках выполнялся для оценки временной (месячной, сезонной и годовой) изменчивости. Количество осадков оказалось весьма изменчивым, варьируясь от более чем 1100 мм в верхнем течении до менее чем 700 мм в нижнем и среднем течении Мереб-Гаша. На территории бассейна Мереб-Гаш наблюдались преимущественно монотонные тенденции основных климатических характеристик почти на всех станциях наблюдений. Установлено, что для относительной влажности и осадков характерна тенденция к их уменьшению, тогда как для температуры воздуха и потенциальной эвапотранспирации — тенденция к постоянному росту.

Оценка статистической значимости климатических данных выполнялась с использованием непараметрического теста Манна-Кендалла (МК) и модифицированного теста Манна-Кендалла (ММК), а также оценочной функции Сена (SS), основанных на ранговых статистиках и используемых для оценки достоверности без предположения о характере распределения исходной выборки.

На основании обзора расчетных методов для определения PET в исследовании с использованием доступного R-статистического программного обеспечения были выбраны три наиболее известных алгоритма, встроенных в пакет SPEI: Торнтуэйта, Харгривза и Пенмана – Монтейта. Анализ состояния засухи проводился с использованием стандартизованного индекса осадков-испарения (SPEI) и индекса аномалий осадков (RAI). Положительные значения индексов характеризуют различную интенсивность влажности в рассматриваемый период времени, а отрицательные — интенсивность засушливых условий.

Сравнивая результаты, полученные с использованием МК-теста и ММК-теста, установлено, что последний, возможно вследствие исключения автокорреляции из временных рядов, показал значительные улучшения в принятии нулевой гипотезы, что подтверждает результаты других исследований [16]. Значения оценок наклона тренда по критерию SS годовых осадков для всех станций наблюдений указали на наличие нисходящего тренда, в то время как временные ряды температуры и PET/P продемонстрировали восходящий тренд. Соотношение PET/P обычно используется для классификации климати-

ческих условий исследуемой местности по уровню влажности. Выявлено, что в бассейне Мереб-Гаш в значительной степени (на 68,8 %) преобладает ползасушливый тип климата.

Потенциальная эвапотранспирация (PET) и индекс засухи являются обязательными входными параметрами гидрологической модели. PET — один из важнейших параметров, методы расчета которого могут существенно повлиять на достоверность выходных результатов модели. Второй использует потенциальную эвапотранспирацию и другие климатические переменные для оценки условий засухи на исследуемой территории.

На рис. 5 представлено сравнение результатов расчета среднегодовых и среднемесячных значений потенциальной эвапотранспирации по методам Торнтуэйта, Харгривза и Пенмана – Монтейта. В то время как методы Торнтуэйта и Пенмана – Монтейта дают наименьшие и наибольшие значения PET, метод Харгривза демонстрирует результаты расчетов в интервале значений между ними. В итоге метод Торнтуэйта был признан недостаточно надежным, а полученные результаты хорошо согласуются с выводами Шаттлворта [17] и других исследователей [18], которые не рекомендуют для расчета PET методы Харгривза и Блейни – Кридла, основанные на информации о температуре воздуха. Почти во всех расчетных сериях метод Пенмана – Монтейта (PM) продемонстрировал самые высокие оценки. Многочисленные исследования показали, что в условиях влажных природно-климатических зон [18] оценки PET по методу Харгривза дают более высокие значения, чем по методу PM, и наоборот, в засушливых и ползасушливых климатических условиях [19]. Параболическая модель регрессии, построенная для результатов расчета по методам Харгривза и Торнтуэйта, оказалась справедливой и для метода Пенмана – Монтейта. Однако это не означает, что одни и те же соотношения могут быть установлены для районов с различными природно-климатическими условиями. Анализ пространственной изменчивости среднегодовой потенциальной эвапотранспирации в бассейне Мереб-Гаш показал, что расчетные значения PET варьировались от 1500 мм в верховьях реки до 2400 мм на равнинах в нижнем течении.

Статистический и пространственный анализ глобальных климатических данных CFSR (с 1979 по 2013 гг.) для бассейна Мереб-Гаш выполнен по 32 метеостанциям. На рис. 6 представлена информация об условиях засухи в виде стандартизованного индекса SPEI для разных временных масштабов на метеостанции Дебарва. До конца 1990-х гг. климат бассейна характеризовался непрерывными влажными условиями ($SPEI > 1,0$) с несколькими небольшими по продолжительности периодами засух. Напротив, с 2000 по 2010 гг. наблюдались непрерывные и устойчивые засушливые условия, о чем свидетельствуют значения $SPEI < -1,0$ для всех временных

масштабов. Самые влажные и сухие условия наблюдались в 1998 и 2003 гг. соответственно. Условия на водосборе считаются нормальными и умеренно влажными, когда $SPEI \geq 0,30$. Именно такие условия преобладают в бассейне р. Мереп-Гаш. Также исследовано пространственно-временное распределение месячного, сезонного и годового индекса RAI и его корреляция с SPEI для всех метеостанций. Положительные значения RAI соответствуют влажным периодам, а отрицательные — засушливым с разной степенью интенсивности. Обнаружено, что в период с 1979 по конец 1990-х гг. значения RAI были преимущественно положительными, что соответствует влажным условиям, варьируясь от экстремально влажных ($RAI = 5,0$ в 1998 г.) до умеренно влажных с несколькими засушливыми годами. Напротив, с конца 1990-х и до 2013 гг. значения RAI были преимущественно отрицательными, что соответствовало засушливым условиям, варьируясь от экстремально сухих лет до умеренно засушливых с незначительной влажностью. В то время как верхняя и нижняя трети бассейна Мереп-Гаш испытывали исключительно засушливые условия, большая часть средней

трети бассейна находилась в относительно влажных условиях в течение всего рассматриваемого периода. Для большинства метеостанций значения RAI и SPEI показали устойчивую линейную корреляцию. Полученные в оценках условия засухи в бассейне Мереп-Гаш достаточно хорошо согласуются с глобальными и региональными исследованиями на Африканском Роге [20].

Причины устойчивых и значимых тенденций большинства климатических характеристик и сильных продолжительных засух, наблюдавшихся в последние годы в бассейне Мереп-Гаш в частности и в регионе в целом, скорее всего связаны с активной хозяйственной деятельностью человека и глобальными изменениями климата. Поэтому в ближайшее время должны быть приняты эффективные меры, разработанные на основе имеющихся знаний, для решения актуальных проблем опустынивания, деградации земель и продовольственной безопасности при одновременной поддержке более долгосрочных мероприятий незамедлительного реагирования, направленных на адаптацию и смягчение последствий изменения климата.

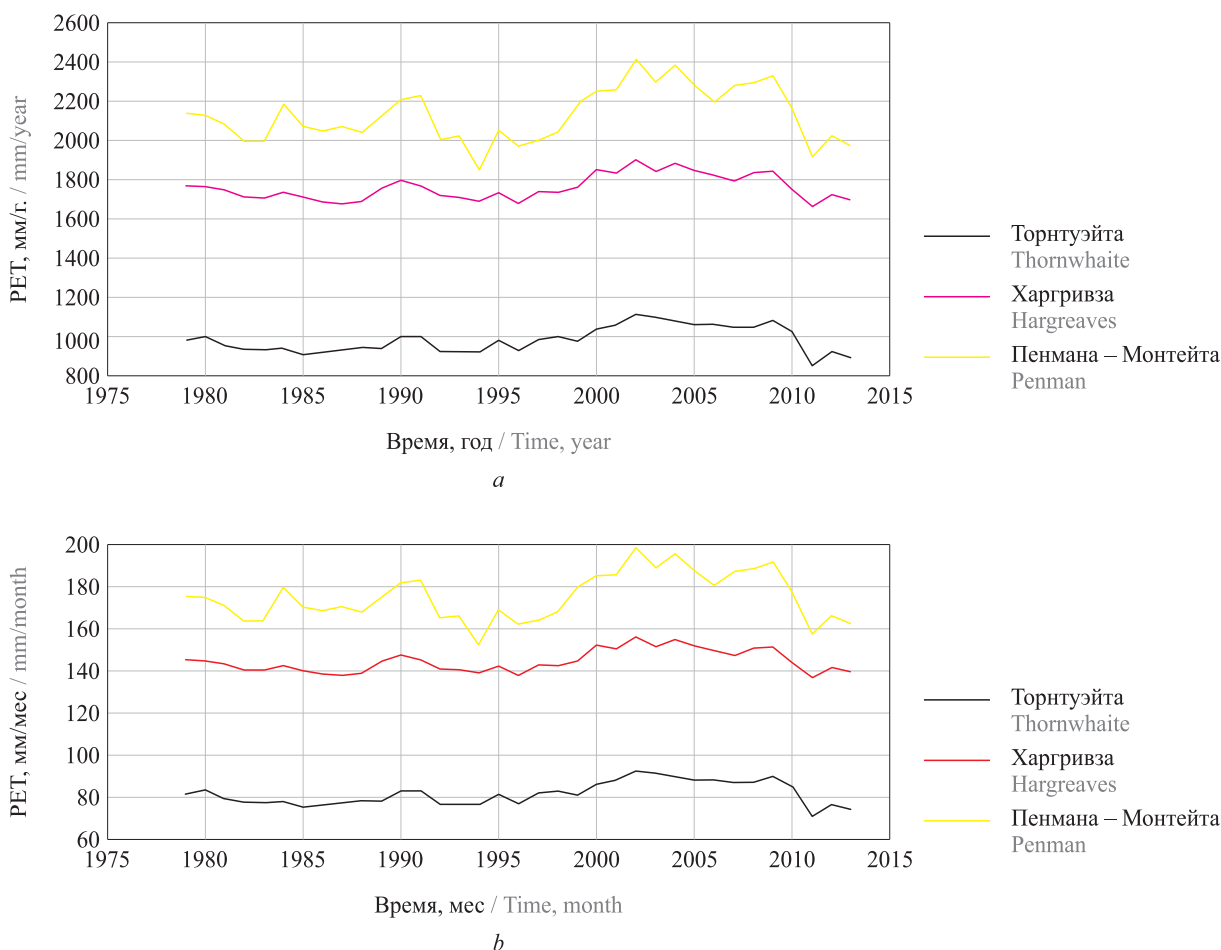


Рис. 5. Сравнение результатов расчета потенциальной эвапотранспирации: *a* — годовой; *b* — месячной, полученных разными методами

Fig. 5. Comparison of the potential evapotranspiration methods: *a* — annual; *b* — monthly

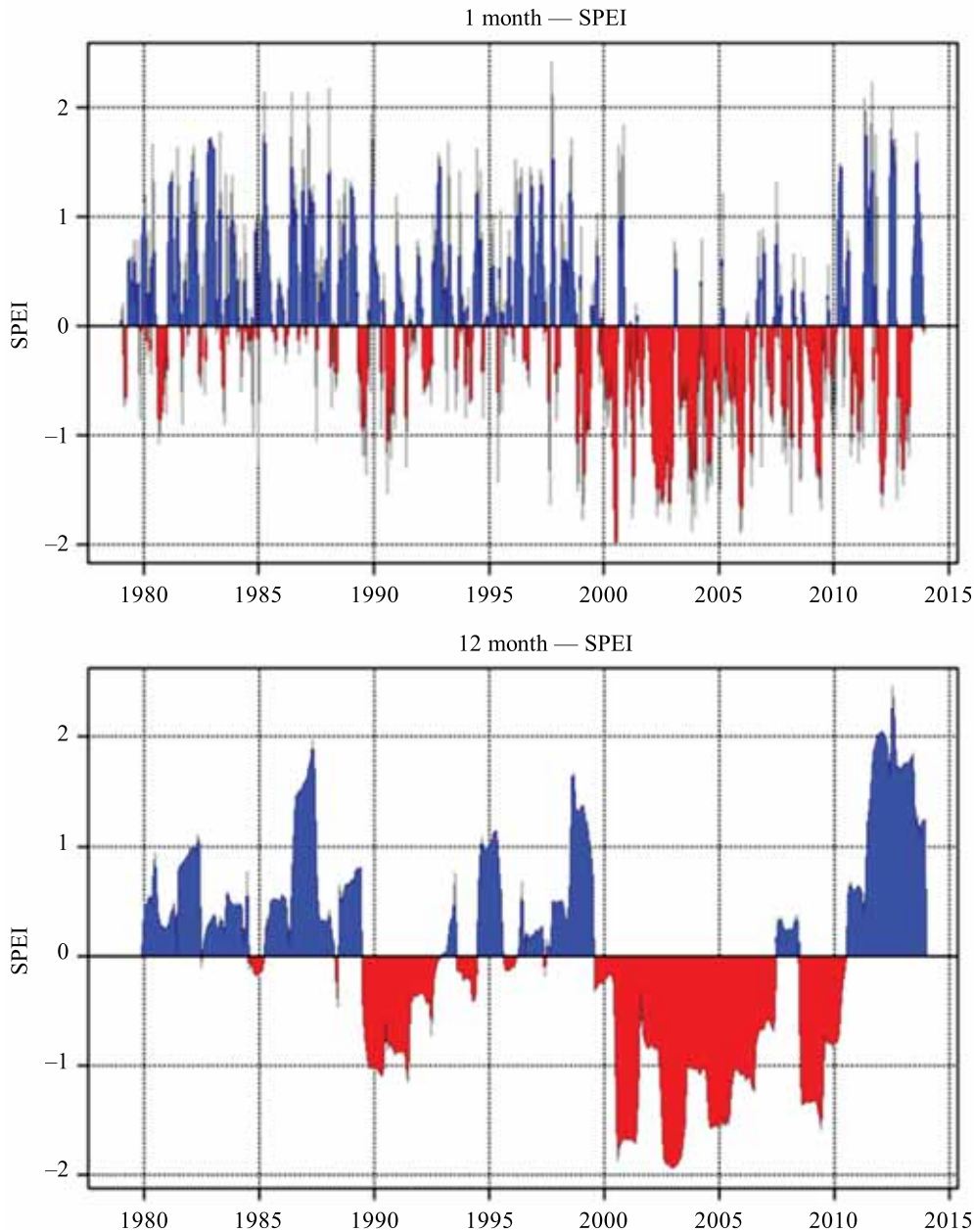


Рис. 6. Индекс SPEI, характеризующий условия засухи в суббассейне Дебарва, в разных временных масштабах
Fig. 6. SPEI index characterizing drought conditions with different time scales in the Debarwa sub-basin

Физически обоснованные математические модели стока

Многочисленные исследования продемонстрировали применимость концептуальной математической модели дождевого стока NAM в структуре MIKE 11 для расчета стока как в изученных с гидрологической точки зрения бассейнах, так и в неизученных с различными природно-климатическими условиями, включая использование массивов данных реанализа CFSR.

Структура модели NAM представляет собой различные компоненты гидрологического цикла, учитывающие состояние воды в четырех разных, но вза-

имосвязанных средах. Эти процессы представлены в модели девятью стокоформирующими параметрами.

Была исследована возможность применения NAM для моделирования речного стока и оценки составляющих водного баланса в пределах бассейна Мероб-Гаш. Результатом работы модели являются такие выходные данные, как сток с водосбора, а также информация о других элементах земной фазы гидрологического цикла: эвапотранспирации, содержании влаги в почве, подпитке и уровне грунтовых вод. К основным стокоформирующим параметрам, контролирующим количество воды, относятся влажность почвы; показатели, относящиеся к компонентам трансформации половодья (коэффициент

поверхностного стока, максимальный (пиковый) и минимальный (меженный) расходы), и другие характеристики (топографические, почвенно-геологические, растительные и другие условия).

В отсутствие подробной информации некоторые стокоформирующие параметры назначены интуитивно. Например, меньшие значения коэффициента стока назначались для относительно ровных с морфологической точки зрения участков водосбора с крупнозернистыми песчаными грунтами и большой ненасыщенной водой зоной (в основном, это территория нижнего Мероб-Гаша), тогда как большие значения коэффициента стока применялись для суббассейнов с водонепроницаемыми грунтами, такими как глины и голые скалы (районы верховья Мероб-Гаша). Пиковый сток вызван большим объемом поверхностного стока, который в модели регулировался путем изменения коэффициента поверхностного стока, тогда как форма пика зависела от постоянной времени, используемой в «маршрутизации» стока.

Аналогичным образом максимальные поверхностный сток и содержание воды в подповерхностной зоне аккумуляции (влажность почвенного корневого слоя) служат основными параметрами, влия-

ющими на величину эвапотранспирации: чем выше эти значения, тем выше скорость эвапотранспирации, и наоборот. Точно так же на величину суммарного стока влияют другие его компоненты, уменьшение поверхностного стока или инфильтрация приводят к увеличению меженного стока, и наоборот. Форма спада меженного стока является функцией постоянной времени меженного стока. Графическая оценка эффективности модели NAM включала визуальное сравнение смоделированного и наблюдаемого гидрографов, а также сравнение смоделированного и наблюдаемого суммарных объемов стока.

На рис. 7, а показаны смоделированные и наблюдаемые гидрографы стока в створе Гала-Ади-Нфас, расчетный суммарный сток и накопленные объемы речного стока для того же створа представлены на рис. 7, б. Результаты моделирования в створе Гала-Ади-Нфас (рис. 7, а) в целом отражают сезонность стока, но с существенным несоответствием его объема и пиковых значений (максимальных и минимальных). Эти несоответствия усиливаются в результатах расчета суммарного стока (рис. 7, б), а также в наличие меженного стока в течение всего расчетного периода, даже в засушливые сезоны (рис. 7, а).

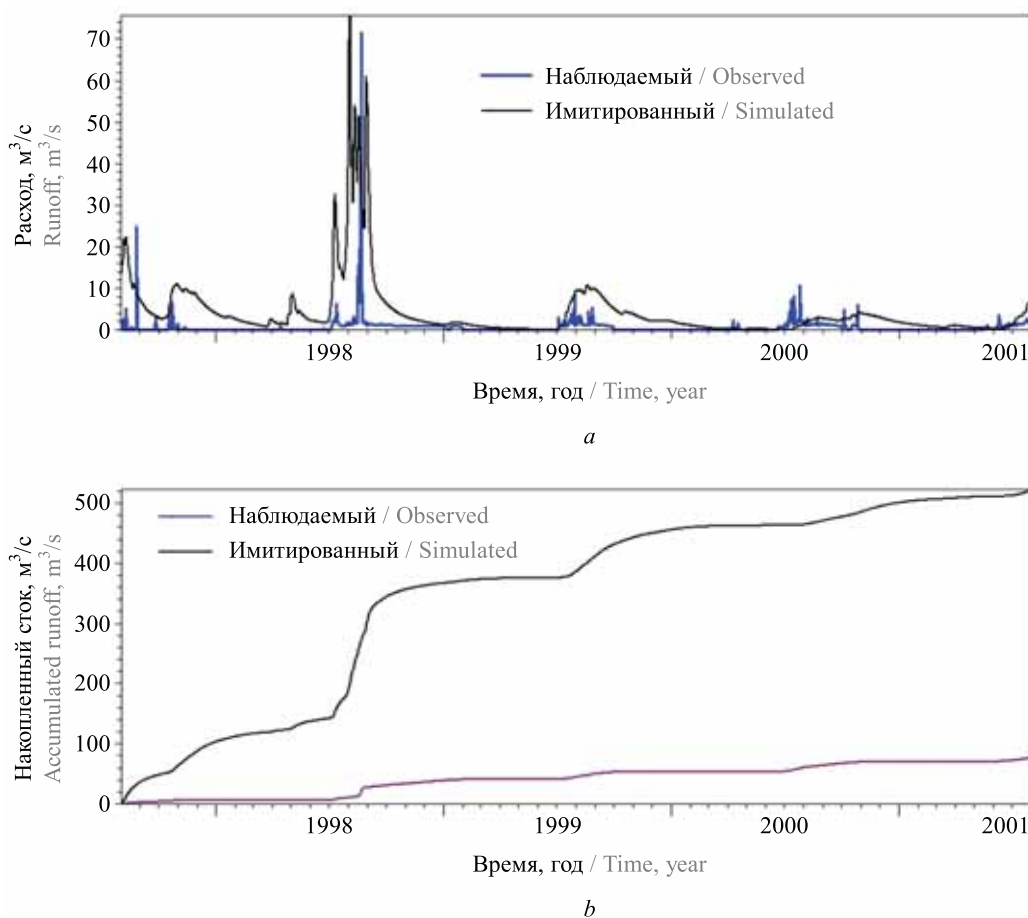


Рис. 7. Смоделированные (NAM) и наблюдаемые значения речного стока и соответствующие объемы стока для суббассейна Гала-Ади-Нефас из процедуры калибровки: а — гидрографы стока; б — накопленный сток

Fig. 7. Simulated (NAM) and observed values of river runoff and corresponding volumes of runoff for the Gala-Adi-Nefas sub-basin during the calibration procedure: а — flow hydrographs; б — accumulated runoff

Калибровка и валидационный анализ показали несоответствие между смоделированными и наблюдаемыми гидрографами, а также то, что продолжительность, интенсивность высоких и низких пиков, объем и форма гидрографов сильно отличаются от соответствующих наблюдаемых данных о реальном стоке. Критерии оценки эффективности модели Нэша – Сатклиффа (NSE), количественные значения коэффициента детерминации (R^2 или bR^2), PBIAS, общей ошибки водного баланса и среднеквадратичной ошибки (RMSE) калибровки (табл. 2) не показали отличий с выводами, сделанными на основе визуального графического сравнения результатов моделирования и наблюдений за фактическим стоком.

Данная ситуация стимулировала к продолжению поиска лучшей модели для прогнозирования речного стока в тех же условиях, поэтому было предложено применение модели SWAT — одной из наиболее широко используемых физически обоснованных математических моделей. Для настройки и параметризации модели использовался интерфейс QSWAT-2012 в QGIS. На основе ЦМР и имеющейся сети водотоков была выбрана изогелия для дискретизации речного бассейна на более мелкие 13 суббассейнов, которые в дальнейшем были разделены на 61 «гидрологическую единицу реагирования» (HRU) в зависимости от типа почвы, вида землепользования и рельефа. Распределение воды в речном русле моделировалось в каждой HRU методом переменного коэффициента накопления Уильямса.

Рассмотрены два расчетных сценария: использование в качестве входной информации данных ре-

анализа CFSR без каких-либо изменений и с частичной модификацией. В последнем случае информация об осадках для выбранных станций глобальной сети пересчитана путем наложения на цифровую электронную карту годового количества осадков в Эритрее, чтобы сбалансировать занижение и/или завышение оценок данных реанализа. Определялись поправочные коэффициенты для 32 метеостанций внутри и вблизи исследуемого бассейна. Понимая взаимосвязь климатических переменных, была сделана корректировка только для данных об осадках на основе ранее выполненной статистической оценки и возможности моделирования большинства других переменных с использованием SWAT.

Полученные результаты оценены с помощью статистического соответствия целевых функций, значения которых для калибровки приведены в табл. 2. Основываясь на статистических оценках, установлено, что в процессе калибровки модель SWAT (не забывая о проблеме неопределенности) по своей эффективности значительно превзошла модель MIKE 11-NAM. Результаты моделирования показали, что исходные данные об осадках были явно завышены, это, в свою очередь, могло повлиять на другие зависимые переменные (например, эвапотранспирацию), что привело к значительному несоответствию между расчетными и наблюдаемыми гидрографами. Поэтому, хотя и преждевременно делать выводы, основанные только на настоящей работе, пригодность данных спутникового реанализа CFSR в качестве входных параметров в NAM является в целом неудовлетворительной.

Табл. 2. Оценка эффективности калибровки для моделирования стока в SWAT и NAM

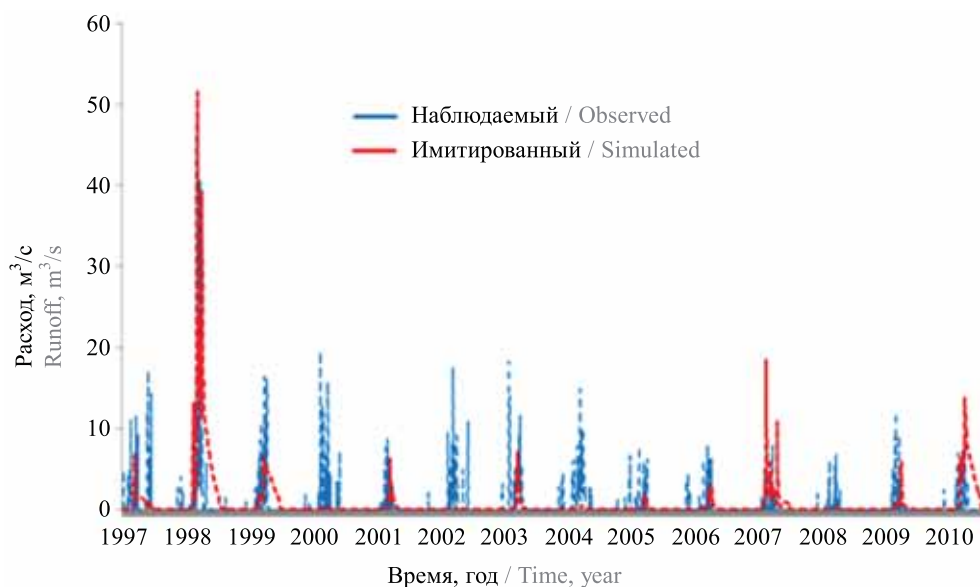
Table 2. Evaluation of the performance of SWAT and NAM models during calibration

Модель / Model	Целевая функция / Objective function				
	R^2	bR^2	NS	RSR	$PBIAS$
SWAT	0,80	0,77	0,73	0,52	-42
MIKE 11-NAM	0,20	0,19	-1,62	1,61	188

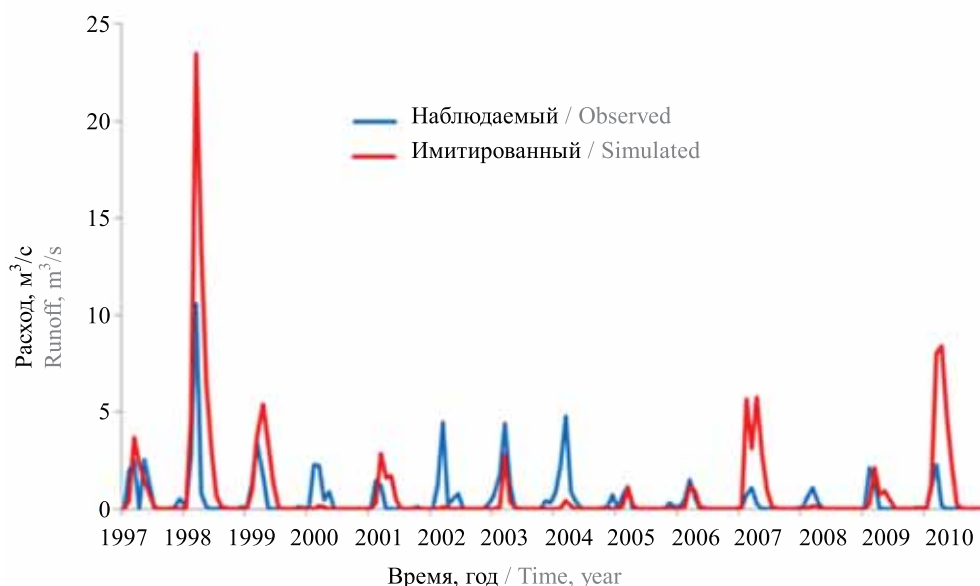
В модели SWAT произошли значительные улучшения по сравнению с моделью NAM. Это касается, например, смоделированного межлетнего стока, который в результатах расчета по NAM наблюдается в течение всего расчетного периода, даже в засушливые сезоны, а по SWAT максимально приближен к картине наблюдаемых минимальных расходов. Общая форма расчетных гидрографов, сезонность и другие характеристики стока, полученные с использованием SWAT, кажутся более реалистичными, чем полученные по NAM, причем не только визуально, но и статистически. Этот аргумент дополнительно подтверждается суточными и среднемесячными смоделированными значениями речного стока в суббассейне Дебарва (рис. 8). Более подробный анализ результатов моделирования по SWAT и NAM приведен в работах [21–23].

Следует отметить, что улучшение результатов моделирования, скорее всего, связано с корректировкой массивов данных спутникового реанализа CFSR с учетом доступной информации о фактических наблюдениях за осадками. Имеющиеся данные об осадках и возможности модели SWAT генерировать большинство других переменных позволили получить лучшие результаты моделирования для бассейна Мероб-Гаш, чем по модели NAM.

Статистическая оценка годовых осадков продемонстрировала, что большинство метеостанций глобальной сети завышали количество осадков по сравнению с наземными наблюдениями (66 % станций из 32 показали завышение, 28 % — занижение и только 6 % показали одинаковые результаты; причем на 31 % станций данные об осадках превышали наблюдаемые в два и более раза).



a



b

Рис. 8. Смоделированные и наблюдаемые значения стока в Дебарве: *a* — суточные и *b* — месячные

Fig. 8. Computed and observed runoff in the Debarwa sub-basin: *a* — daily and *b* — monthly

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обсуждение результатов

Общая ситуация с системой управления водными ресурсами в Эритрее в настоящее время усугубляется слабым социально-экономическим и экологическим развитием общества, а также организационными, правовыми и политическими проблемами в стране. Некоторые из них обусловлены природой водных ресурсов, характеризующихся количественным дефицитом, пространственно-временной изменчивостью и высокой степенью зависимости

от различных факторов. Кроме того, высока вероятность возникновения опасных природных гидрологических явлений (наводнений, засух), напрямую связанных с трансграничными водными объектами, развитием экстремальных ситуаций, сопряженных в том числе с неблагоприятными последствиями изменения климата.

Статистический анализ массивов спутниковых глобальных климатических данных CFSR за период с 1979 по 2013 гг. показал, что на территории бассейна Мереб-Гаш наблюдались преимущественно монотонные тенденции основных климатических

характеристик почти на всех станциях наблюдений. Для осадков характерна тенденция к их уменьшению, тогда как для температуры воздуха и потенциальной эвапотранспирации характерна тенденция к постоянному росту. Индексы засухи SPEI и RAI на всех станциях наблюдений продемонстрировали устойчивые засушливые и сильно засушливые условия в течение 2000–2013 гг. и преимущественно влажные условия с 1979 по конец 1990-х гг. Причины устойчивых и значимых тенденций большинства климатических характеристик и сильных продолжительных засух, наблюдавшихся в последние годы в бассейне Мереб-Гаш в частности и в регионе в целом, скорее всего связаны с активной хозяйственной деятельностью человека и глобальными изменениями климата. Эти тенденции полностью согласуются с глобальными и региональными прогнозами о том, что повышение температуры воздуха на поверхности суши и испарения, а также уменьшение количества осадков во взаимодействии с изменчивостью климата и антропогенной деятельностью привели к опустыниванию в Африке к югу от Сахары.

Политическая воля и приверженность правительства Эритреи в отношении создания современной системы управления водными ресурсами, проявленные за последние два десятилетия, внесли значительный вклад в улучшение водохозяйственной инфраструктуры и состояние водных экосистем, что создало возможности для передачи современных технологий и развития человеческого и институционального потенциалов. Очевидна необходимость воспользоваться возможностью политической воли и социальной мобилизации населения для дополнительного расширения инфраструктуры национальной водохозяйственной системы. Именно этот стратегический сценарий будет способствовать дальнейшему расширению трансфера современных технологий, наращиванию водохозяйственного потенциала и внедрению системы ИУВР.

Кроме того, для предотвращения регионального экологического дисбаланса, вызванного антропогенной деятельностью и климатическими изменениями, крайне необходимы согласованные действия всех заинтересованных сторон. В качестве первоочередных текущих мероприятий должны быть рассмотрены предложения по строительству новых гидроузлов и водохранилищ на притоках крупных рек, террасированию и облесению, созданию резерваций для животных.

Сравнительный анализ методов оценки потенциальной эвапотранспирации показал, что метод Торнтуэйта оказался несовместим с методами Харгривза и Пенмана – Монтейта. Несмотря на то что последние два метода не показали существенных различий, при оценке выбранных моделей использовался метод Пенмана – Монтейта.

Применимость модели NAM для моделирования стока дождевых осадков в бассейне р. Мереб-Гаш с использованием массива данных реанализа

CFSR оказалась весьма неопределенной. Сравнение физически обоснованных моделей с распределенными и полураспределенными параметрами, в которых в качестве входных параметров использовались массивы данных CFSR, показало, что модель SWAT несколько превзошла по своей эффективности модель MIKE 11-NAM, особенно на суббассейновом уровне. В случае использования SWAT для моделирования стока следует обязательно учитывать размеры бассейна и суббассейнов. Несмотря на то что большинство целевых функций подтвердило приемлемую эффективность SWAT на уровне суббассейна, в периоды калибровки и валидации наблюдалась их значительная неопределенность. В дополнение к ошибкам, вызванным вводимыми данными (климатическими переменными), еще больше усугубил ошибки моделирования, так называемый, «принцип правильного пренебрежения». Это означает, что неучтенные в расчетах водохранилища и пруды, откачка подземных вод, ирригационные мероприятия и условия выращивания сельскохозяйственных культур, вероятнее всего, усугубили недостаточную эффективность рассмотренных моделей.

Заключение

В современной водохозяйственной системе Эритреи слабые стороны преобладают над сильными сторонами, и ожидается, что в ближайшее время угрозы будут диктовать системе больше, чем возможности, если только скорость, с которой система может адекватно реагировать, не превысит скорость происходящих изменений. Общая ситуация в Эритрее усугубляется и слабым социальным, экономическим и экологическим развитием, а также организационными, правовыми и политическими проблемами.

Взвесив все сильные стороны, следует подчеркнуть необходимость воспользоваться политической волей и социальной мобилизацией населения для дальнейшего расширения инфраструктуры национальной водохозяйственной системы с тем, чтобы способствовать трансферу современных технологий, наращиванию водохозяйственного потенциала и внедрению элементов интегрированного управления водными ресурсами. Улучшенная экосистема определена создаст более устойчивую и разнообразную среду, снизит уязвимость населения и хозяйствующих субъектов, расширит возможности сообществ и институтов государства, позволяя им успешно и своевременно реагировать на множество эколого-экономических проблем, а также укрепит адаптационный потенциал, дающий возможность успешно справляться с меняющимися внешними и внутренними условиями.

Сравнение математических моделей SWAT и MIKE 11-NAM, в которых в качестве входных параметров использовались массивы данных реанализа CFSR, показало, что модель SWAT несколько превзошла по своей эффективности модель MIKE

11-NAM. В случае использования модели SWAT для моделирования речного стока в условиях Эритреи на основе массивов данных CFSR, следует обратить особое внимание на размеры моделируемых бассейна и суббассейнов по двум причинам. Во-первых, на небольших водосборах (как суббассейн Дебарва) в отличие от крупных наблюдаются меньшие пространственно-временные изменения климатических переменных, почвенных и геоморфологических характеристик водосбора. А во-вторых, ошибки, возникающие в каждом суббассейне, накапливаются при «объединении» нескольких небольших водосборов. Кроме того, массивы данных CFSR имеют большое преимущество перед наземными наблюдениями с точки зрения их простоты и доступности. Однако результаты настоящей работы продемонстрировали, что для минимизации неопределенностей моделей и, как следствие, улучшения возможностей прогнозирования не существует качественной альтернативы восстановлению существующих систем сбора наземной информации и созданию новых станций гидрометеорологических наблюдений.

Учитывая простоту разработки и применимости модели GIUH-Nash для решения практических задач, доступность данных ЦМР и инструментов обработки информации, соответствие теоретических и практических результатов в зависимости от выбранных алгоритмов и согласованность результатов моделирования из-за ее незначительной зависимости от источника и разрешения ЦМР, модель GIUH-Nash без-

условно является полезным инструментом для решения проблем, связанных с прогнозированием речного стока в регионах с дефицитом исходных данных.

Важно учитывать ограничения в применимости подхода единичного гидрографа для водосборных бассейнов, имеющих устьевой створ, расположенный выше по течению вблизи слияния двух крупных рек, которые, возможно, могут давать меньшие значения длины водотоков более высокого порядка, что может сказаться на окончательных результатах моделирования. Чтобы получить более широкое представление о применимости GIUH-Nash для эффективного моделирования стока на основе единичных событий в исследуемом регионе, предлагается провести взаимное сравнение модели GIUH-Nash с другими методами и доступными справочными информационными системами.

Проектирование сооружений водохозяйственных систем должно осуществляться с учетом ограниченных водных ресурсов рек и озер, отсутствия комплексных исследований водных объектов, а также отсутствия достоверных исходных данных: гидрологической, метеорологической, геологической, геодезической и экологической информации. В этих условиях наиболее эффективными инструментами, скорее всего, будут методы и технологии инженерной гидрологии, основанные на математическом моделировании и прогнозировании гидрологических процессов в речных бассейнах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гебрехивот А.А., Козлов Д.В. Runoff irrigation practices and challenges in western lowlands of Eritrea // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 8. С. 1065–1076. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1065-1076
2. Singh V.P., Frevert D.K. Watershed models. Boca Raton : CRC Press, 2006.
3. Chowdhury K.R., Eslamian S. Climate change and hydrologic modeling // Handbook of Engineering Hydrology. 2014. Pp. 87–102. DOI: 10.1201/b16683-9
4. Гебрехивот А.А., Козлов Д.В. Hydrological modelling for ungauged basins of arid and semiarid regions: review // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 8. С. 1023–1036. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1023-1036
5. Refsgaard J.C. Terminology, modelling protocol and classification of hydrological model codes // Distributed Hydrological Modelling. 1990. Pp. 17–39. DOI: 10.1007/978-94-009-0257-2_2
6. Singh V.P., Woolhiser D.A. Mathematical modeling of watershed hydrology // Journal of Hydrologic Engineering. 2002. Vol. 7. Issue 4. Pp. 270–292. DOI: 10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(270)
7. Гебрехивот А.А., Козлов Д.В. Оценка применимости гидрологического модуля MIKE 11-NAM для моделирования дождевого стока в малоизученном речном бассейне // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 7. С. 1030–1046. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1030-1046
8. Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index // Journal of Climate. 2010. Vol. 23. Issue 7. Pp. 1696–1718. DOI: 10.1175/2009jcli2909.1
9. Van Rooy M.P. A rainfall anomaly index independent of time and space // Notos. 1965. Vol. 14. Pp. 43–48.
10. Abbaspour K.C., Rouholahnejad E., Vaghefi S., Srinivasan R., Yang H., Kløve B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model // Journal of Hydrology. 2015. Vol. 524. Pp. 733–752. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.027
11. Abbaspour K.C., Vaghefi S.A., Yang H., Srinivasan R. Global soil, landuse, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT

Applications // Scientific Data. 2019. Vol. 6. Issue 1. DOI: 10.1038/s41597-019-0282-4

12. *Debesai M.G.* Factors affecting vulnerability level of farming households to climate change in developing countries: Evidence from Eritrea // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1001. Issue 1. P. 012093. DOI: 10.1088/1757-899x/1001/1/012093

13. *Wolock D.M., Price C.V.* Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model // Water Resources Research. 1994. Vol. 30. Issue 11. Pp. 3041–3052. DOI: 10.1029/94wr01971

14. *Chaplot V.* Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions // Journal of Hydrology. 2005. Vol. 312. Issue 1–4. Pp. 207–222. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.017

15. *Wechsler S.P.* Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: A review // Hydrology and Earth System Sciences. 2007. Vol. 11. Issue 4. Pp. 1481–1500. DOI: 10.5194/hess-11-1481-2007

16. *Yue S., Wang C.Y.* The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series // Water Resources Management. 2004. Vol. 18. Issue 3. Pp. 201–218. DOI: 10.1023/b:warm.0000043140.61082.60

17. *Shuttleworth W.J.* Evaporation // Handbook of Hydrology. NY, USA : McGraw-Hill Inc., 1993. P. 4.18.

18. *Pandey P.K., Pandey V.* Evaluation of temperature-based Penman–Monteith (TPM) model under the humid environment // Modeling Earth Systems and Environment. 2016. Vol. 2. Issue 3. DOI: 10.1007/s40808-016-0204-9

19. *Jabloun M., Sahli A.* Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data // Agricultural Water Management. 2008. Vol. 95. Issue 6. Pp. 707–715. DOI: 10.1016/j.agwat.2008.01.009

20. *Ghebregabher M.G., Yang T., Yang X.* Long-term trend of climate change and drought assessment in the Horn of Africa // Advances in Meteorology. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2016/8057641

21. *Ghebrehiwot A., Kozlov D.* Reanalysis dataset-based hydrologic predictions for ungauged basins // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 264. P. 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/202126401001

22. *Kozlov D.V., Ghebrehiwot A.A.* Intercomparison of process-based physical and mathematical models in data-scarce semi-arid region of Eritrea // Water sector of Russia: problems, technologies, management. 2021. Issue 1. Pp. 86–112. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-6

23. *Гебрехивот А.А.* Особенности моделирования речного стока Мереба-Гаша в интересах водохозяйственного строительства в Эритрее : дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 217 с.

Поступила в редакцию 6 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 16 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 29 ноября 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Ангхесом Алемнугус Гебрехивот** — кандидат технических наук, преподаватель; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 57210796140, ORCID: 0000-0002-0128-4653; bahghi2012@gmail.com;

Дмитрий Вячеславович Козлов — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5878-6674, Scopus: 36787104800, ResearcherID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341; KozlovDV@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Runoff irrigation practices and challenges in western lowlands of Eritrea. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(8):1065-1076. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1065-1076

2. Singh V.P., Frevert D.K. *Watershed Models*. Boca Raton, CRC Press, 2006.

3. Chowdhury K.R., Eslamian S. Climate change and hydrologic modeling. *Handbook of Engineering Hydrology*. 2014; 87-102. DOI: 10.1201/b16683-9.

4. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Hydrological modelling for ungauged basins of arid and semi-arid regions: review. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(8):1023-1036. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1023-1036

5. Refsgaard J.C. Terminology, modelling protocol and classification of hydrological model codes. *Distributed Hydrological Modelling*. 1990; 17-39. DOI: 10.1007/978-94-009-0257-2_2

6. Singh V.P., Woolhiser D.A. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2002; 7(4):270-292. DOI: 10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(270)
7. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Assessment of applicability of mike 11-nam hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(7):1030-1046. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.7.1030-1046
8. Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. A Multiscalar Drought Index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. 2010; 23(7):1696-1718. DOI: 10.1175/2009jcli2909.1
9. Van Rooy M.P. A rainfall anomaly index independent of time and space. *Notos*. 1965; 14:43-48.
10. Abbaspour K.C., Rouholahnejad E., Vaghefi S., Srinivasan R., Yang H., Kløve B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*. 2015; 524: 733-752. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.027
11. Abbaspour K.C., Vaghefi S.A., Yang H., Srinivasan R. Global soil, landuse, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT Applications. *Scientific Data*. 2019; 6(1). DOI: 10.1038/s41597-019-0282-4
12. Debesai M.G. Factors affecting vulnerability level of farming households to climate change in developing countries: Evidence from Eritrea. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 1001(1):012093. DOI: 10.1088/1757-899x/1001/1/012093
13. Wolock D.M., Price C.V. Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model. *Water Resources Research*. 1994; 30(11):3041-3052. DOI: 10.1029/94wr01971
14. Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions. *Journal of Hydrology*. 2005; 312(1-4): 207-222. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.017
15. Wechsler S.P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: A review. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2007; 11(4):1481-1500. DOI: 10.5194/hess-11-1481-2007
16. Yue S., Wang C.Y. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management*. 2004; 18(3):201-218. DOI: 10.1023/b:warm.0000043140.61082.60
17. Shuttleworth W.J. Evaporation. *Handbook of Hydrology*. NY, USA : McGraw-Hill Inc., 1993; 4.18.
18. Pandey P.K., Pandey V. Evaluation of temperature-based Penman–Monteith (TPM) model under the humid environment. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2016; 2(3). DOI: 10.1007/s40808-016-0204-9
19. Jabloun M., Sahli A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data. *Agricultural Water Management*. 2008; 95(6):707-715. DOI: 10.1016/j.agwat.2008.01.009
20. Ghebregabher M.G., Yang T., Yang X. Long-term trend of climate change and drought assessment in the Horn of Africa. *Advances in Meteorology*. 2016; 2016:1-12. DOI: 10.1155/2016/8057641
21. Ghebrehiwot A., Kozlov D. Reanalysis dataset-based hydrologic predictions for ungauged basins. *E3S Web of Conferences*. 2021; 264:01001. DOI: 10.1051/e3sconf/202126401001
22. Kozlov D.V., Ghebrehiwot A.A. Intercomparison of process-based physical and mathematical models in data-scarce semi-arid region of Eritrea. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2021; 1, 2021:86-112. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-6
23. Gebrekhiwot A.A. *Peculiarities of Mereba-Gash River Flow Modeling in the Interests of Water Management Construction in Eritrea : diss. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 2022; 217. (rus.).

Received September 6, 2022.

Adopted in revised form on November 16, 2022.

Approved for publication on November 29, 2022.

B I O N O T E S : **Anghesom A. Ghebrehiwot** — Candidate of Technical Sciences, Lecturer; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 57210796140, ORCID: 0000-0002-0128-4653; bahghi2012@gmail.com;

Dmitriy V. Kozlov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5878-6674; Scopus: 36787104800, ResearcherID: B-4808-2016, ORCID: 0000-0002-9440-0341; KozlovDV@mgsu.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.984

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1707-1715

Организационно-экономические подходы и методы развития строительной отрасли в условиях санкционного давления

Наталья Юрьевна Яськова¹, Инесса Галеевна Лукманова²,
Лариса Игоревна Зайцева¹

¹ Российская академия народного хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС); г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В сложившихся условиях основной фокус поддержки и развития строительства сосредоточен на комплектации пакета антикризисных мер. В первом квартале текущего года их было семнадцать, напрямую влияющих на строительную отрасль и ЖКХ, и сорок, оказывающих косвенное влияние. Масштаб стоящих задач актуализирует поиск новых форм отраслевого управления и экспериментальной апробации возможных методов решения обострившихся в условиях санкционного давления проблем.

Материалы и методы. Авторский взгляд на обеспечение фронтальных изменений отрасли фокусируется на: необходимости реструктуризации органов отраслевого управления и формировании трех основных министерств по строительству, городскому хозяйству и коммунальной инфраструктуре; востребованности альтернативных моделей решения жилищной проблемы и экспериментальной проверки ссудо-сберегательной и арендной модели; мерах импортозамещения и процедур ценообразования; формировании комфортной бизнес-среды с соответствующими механизмами внесудебного разрешения споров; установлении новых требований к отраслевой науке. Значение последней столь велико, что все без исключения меры поддержки и развития должны стать предметом научного обоснования, обеспечения вариативности решения проблем, экспериментальной проверки разработанных механизмов и методов, а также их масштабирования.

Результаты. В условиях мобилизационной экономики отработка на практике тех или иных моделей организации, инвестирования, цифровизации инвестиционно-строительной деятельности в оперативном режиме времени позволит получить не только объективную картину их эффективности, но и выявить узкие места практической реализации. Вне методологии создания экосистем и использования платформенных решений отраслевые центры будут не в состоянии решать задачи развития в условиях санкционного давления.

Выводы. Учитывая региональный опыт жилищного строительства, а также сформированные и зарекомендовавшие себя требования Евросоюза к ценообразованию в строительстве, перспективы информационного моделирования инвестиционно-строительной деятельности и фактический уровень готовности отраслевой науки, перед отраслевыми центрами управления стоит задача воспроизводства отраслевого научного потенциала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, стратегия развития, инвестиционная программа, санкции, организационно-экономические методы, антикризисные меры, импортозамещение, отраслевые центры управления, комфортная бизнес-среда, отраслевая наука, экономический эксперимент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Яськова Н.Ю., Лукманова И.Г., Зайцева Л.И. Организационно-экономические подходы и методы развития строительной отрасли в условиях санкционного давления // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1707–1715. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1707-1715

Автор, ответственный за переписку: Инесса Галеевна Лукманова, lukmanova@mgsu.ru.

Organizational and economic approaches and methods of development of the construction industry in a climate of sanctions pressure

Natalya Yu. Yaskova¹, Inessa G. Lukmanova², Larisa I. Zaytseva¹

¹ Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA);
Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. In the current climate, a central focus in supporting the development of Russia's construction industry is on what measures are included in the government's crisis package. In the first quarter of 2022, it included 17 measures directly

and 40 measures indirectly impacting the nation's construction and housing-and-utilities sectors. The prompt passage of such measures, which are to be implemented based on relevant resolutions, enactments, and laws, is aimed at creating a barrierless environment with a focus on accelerating construction, keeping down building materials prices, and adjusting the prices of existing contracts for supply of building materials in a timely manner. The ever-mounting sanctions pressure is only raising the bar on objectives to be achieved in the area of residential construction, infrastructural transformations, and improvements in construction process innovation, including the implementation of digitalization and use of platform-based solutions to communications issues. Given the scale of the work that lies ahead, there is a need to search for new forms of managing the sector, with a focus on experimental testing of potential methods for resolving the issues in the construction sector that have exacerbated in the conditions of external sanctions pressure.

Materials and methods. The authors' view of transformations in Russia's construction sector is focused on the following: 1) the need to restructure the nation's construction authorities and establish three separate ministries — one for construction, one for municipal services, and one for utility infrastructure; 2) the need to employ alternative models for tackling the housing problem and the need to experimentally test the savings-and-loan and rent models; 3) the need for sound import substitution measures and price-setting procedures; 4) the need to create a comfortable business environment with relevant out-of-court settlement mechanisms in place; 5) the need to establish new requirements for applied research. The last item is of particular significance, for any support and development measures need to be scientifically substantiated through the utilization of a variety of problem solving methods and experimental testing and scaling up of newly developed mechanisms and methods.

Results. Best practices related to seeking effective solutions indicate that in a mobilization economy testing a particular organizational, investment, or digitalization model in real time will help to not only obtain an objective picture of its effectiveness but also identify the bottlenecks to its application in practice. Moreover, the authors' analysis suggests that, if the nation's expertise centers are to resolve most of the development objectives for the construction sector in the current climate of external sanctions pressure, they must not overlook the benefits of creating ecosystems and employing platform-based solutions.

Conclusions. Given regional best practices in residential construction, the use of long established EU requirements for price-setting in construction, the inevitable shift to Building Information Modeling, and the current level of applied research in Russia, it appears to be worth focusing on maximizing the industry's research potential. The shortest route is by way of concerted efforts in the development, experimental testing, and implementation of new models for the development of the construction, municipal services, and utility infrastructure sectors.

KEYWORDS: construction, strategy for development, investment program, sanctions, anti-crisis measures, import substitution, expertise center, comfortable business environment, applied research, economic experiment

FOR CITATION: Yaskova N.Yu., Lukmanova I.G., Zaytseva L.I. Organizational and economic approaches and methods of development of the construction industry in a climate of sanctions pressure. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(12):1707-1715. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1707-1715 (rus.).

Corresponding author: Inessa G. Lukmanova, lukmanova@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап тотального противостояния моделей цивилизационного развития и жизнедеятельности активировал не только специальную военную операцию, осуществляемую РФ, но и продолжающийся пополняться беспрецедентный масштаб санкций. Они коснулись абсолютно всех жизненно важных отраслей и сфер национальной экономики, вынуждая мобилизовывать ресурсы для поддержки важнейших отраслей [1]. Их цель — обеспечить решение поставленных национальными проектами задач^{1, 2}. Для инвестиционно-строительной сферы стратегически важно в сложившихся условиях:

- сохранить темпы дорожного строительства, укрепляя, с одной стороны, транзитный потенциал России, с другой, ускоряя грузооборот и удешевляя перевозки внутри страны;
- не допустить консервацию объектов промышленного, энергетического и других видов инфраструктурного строительства как за счет решения проблем кредитования коммерческихстроек, так на основе эффективного импортозамещения;

¹ Указ о национальных целях развития России до 2030 года. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/63728>

² Национальные проекты: ожидания, результаты, перспективы. URL: https://raexpert.ru/researches/national_project_2020

- продолжить программу жилищного строительства и капитального ремонта жилых домов с учетом мер государственной поддержки (субсидирования ипотечных ставок, роста лимитов кредитования и др.), а также увеличения объемов авансирования работ по капитальному ремонту;

- реализовать задачи замены изношенных труб и инженерных сетей и др.

Как заявил вице-премьер РФ М. Хуснуллин³, подготовлена новая Федеральная адресная инвестиционная программа. Ее особенность заключается в принятом трехлетнем формате с прогнозом на пятилетний период и возможностях гибкого регулирования и изменения параметров даже в годовом разрезе. Очевидно, что задачи импортозамещения или изменения логистических коридоров поставок строительных материалов в той же мере, что и реализация ряда проектов нового строительства должны своевременно корректироваться [2].

В сложившихся условиях главный фокус поддержки и развития строительства сосредоточен на комплектации пакета антикризисных мер [3–5]. В первом квартале текущего года их было семнадцать, напрямую влияющих на строительную отрасль и ЖКХ, и сорок, оказывающих косвенное влияние.

³ Совещание Президента РФ с членами Правительства 23.03.2022. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/68037>

Их исполнение регламентируется постановлениями, законами и нормативными актами^{4,5,6}, а оперативное принятие нацелено на создание безбарьерной среды ускорения строительства, удержания цен на строительные материалы и своевременную корректировку стоимости существующих контрактов на их поставку. Так, при наличии экспертизы она может быть скорректирована до 30 %. Наряду с оперативными решениями Правительства РФ ряд проблем, в том числе носящих хронический характер, остается за пределами предпринимаемых мер.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка шагов купирования санкционного давления показала, что для принятых мер характерна фокусировка на поддержке строительства. В то время как, невзирая на сложную ситуацию, они должны носить развивающий характер. Для этого состав указанных мер необходимо расширить.

Анализ мер продемонстрировал следующее.

1. Они, по существу, не затрагивают структуру управления строительной отраслью. А она, как показывают предшествующие исследования авторов [6–8], как минимум состоит из четырех основных подотраслей: наземного строительства, объединяющего создание и ликвидацию зданий различного назначения; линейного строительства, создающего коммунальную инфраструктуру; жилищного хозяйства, осуществляющего эксплуатационные функции объектов жилищной и социальной сферы; специализированных сегментов эксплуатации недвижимости (промышленной, энергетической и др.) [9]. Специализированный сегмент рассредоточен по отраслям национальной экономики и является составной частью их стратегических установок. Вместе с тем каждая из первых трех подотраслей обладает не только спецификой пространственной локализации, но и абсолютно несопоставимыми технологическими особенностями, сопровождаемыми различными видами используемых строительных машин и механизмов, кадровым составом, нормативной базой и т.д. [10]. Упрощение подходов к структуре механизмов управления и предположение, что они могут быть универсальны для нового строительства и эксплуатации недвижимости жилищной и социальной сферы, для сетей и стадионов или многофункциональной

недвижимости и т.д., приводит к множеству проектных просчетов, потере ритма строительства, сбоям циклического развития, бесконтрольности инвестиционно-строительных процессов и другим последствиям, недопустимым в сложившейся ситуации санкционного давления [11, 12]. Очевидный выход из сложившейся ситуации — создание специализированных отраслевых центров управления, а именно освобождение Минстроя РФ от функций управления жилищно-коммунальной сферой и создание Министерства городского хозяйства и Министерства коммунальной инфраструктуры. Это позволит максимально полно интегрировать научно-практические заделы в указанных предметных областях. Фокус их экономического развития в сложных условиях санкционного давления сводится к обеспечению управляемости процессов поддержки развития нового строительства, городского хозяйства и сетевого строительства на основе структурирования зон подотраслевого роста и модернизации систем управления, информатизации производственных процессов, импортозамещения всех недостающих элементов замкнутого технологического цикла, эффективного кадрового наполнения и т.п. с учетом специфики объекта управления.

2. Анализ мер поддержки и развития строительства показывает, что ключевой задачей остается «сохранение ипотечного портфеля»³. Именно так Правительство РФ пытается сохранить объемы ввода объектов жилищного строительства прошлого года. Первые месяцы года дают определенный запас прочности за счет опережающего прошлогодние показатели объема строительства. Несомненно, ипотека занимает в экономике нашей страны огромное место. Только за 2021 г. было выдано 1,9 млн кредитов на 5,7 трлн руб.^{7,8} Ставка кредитования при этом не превышала 5,9 %. Нужно понимать, что в настоящее время ипотечный портфель превысил 13 трлн руб., обеспечивая 11 % ВВП страны и 15 % общего объема банковского кредитования экономики. Жилищное строительство с привлечением ипотечного кредита и механизма проектного финансирования позволил обеспечивать граждан страны жильем с минимумом рисков. А вот цена платы за риск оказалась весьма высокой. Как демонстрирует анализ

⁷ Аналитический Центр по ипотечному кредитованию и секьюритизации. URL: http://rusipoteka.ru/ipoteka_v_rossii/ipoteka_statistika/

⁸ О выделении из резервного фонда Правительства РФ бюджетных ассигнований в 2022 году в связи с увеличением цен на строительные ресурсы и необходимостью изменения цен заключенных контрактов, предметом которых является выполнение работ по строительству, реконструкции, капитальному ремонту, сносу объекта капитального строительства, проведению работ по сохранению объектов культурного наследия, и сроков исполнения контрактов : Распоряжение Правительства РФ от 18.02.2022 № 292-р. URL: <https://www.zakonrf.info/rasporiazhenie-pravitelstvorf-292-r-18022022/>

⁴ О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд : Федеральный закон от 05.04.2013 № 44-ФЗ (последняя редакция). URL: http://www.consultant.ru/document/Cons_doc_LAW_144624/

⁵ Антикризисные изменения строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства // Минстрой России. URL: https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/fae/Mery_Podderzhki_stroitelstva_ZHKKH_01_05_V1.pdf

⁶ Перечень мер по поддержке строительной отрасли. URL: <https://nostroy.ru/nostroy/operativnyy-shtab/supports/>

результатов деятельности застройщиков и коммерческих банков, именно они оказались основными бенефициарами замены экономических механизмов с долевого на проектное финансирование жилищного строительства. Так, в результате перехода к новой модели строительства, лидер отрасли ПИК только за первое полугодие 2021 г. в 4 раза увеличил чистую прибыль, а его годовая рентабельность продаж превысила 30%-ный уровень⁹. Авторы многократно поднимали тему эффективности современных моделей жилищного строительства [13, 14]. Ценовые издержки проектного финансирования хорошо известны. Их, безусловно, можно и нужно смягчать. К мерам субсидирования ипотечных ставок, льготных ипотечных программ и увеличения лимитов по субсидированной ипотеке целесообразно приобщить поэтапное раскрытие эскроу-счетов, расширение обмена квартир, находящихся в ипотеке и др. Но это фрагментарные и временные меры. За пределами сложившихся и практически используемых моделей по-прежнему остаются ссудо-сберегательные, кооперативные и арендные модели, модели социального найма жилья, его служебного использования и т.п. Рецепты решения жилищной проблемы многократно обсуждались [15], а в ряде регионов: Белгородской, Волгоградской и других областях прошли апробацию. Их эффективность в 2020 г. подтверждена практикой, но до сих пор задача масштабирования не поставлена. В то время как угроза ипотечных дефолтов в столь нестабильных внешних условиях, торможение мобильности трудовых ресурсов и снижение их деловой активности в условиях ипотечных обременений, обострение негативных демографических процессов требуют, как минимум, уравнивания значимости различных подходов и моделей решения жилищной проблемы.

3. В части ресурсного обеспечения строительства акцент усилий делается на регулирование цен на строительные материалы¹⁰. Их импортная составляющая в отрасли по различным оценкам колеблется от 10 до 25 %¹¹. Но это в среднем и в основном касательно строительных материалов. Главным вызовом, по мнению представителей застройщиков¹²,

⁹ Хомайко Л. Как государство останавливает рост цен на стройматериалы и поддерживает жилищное строительство. URL: <https://www.forumhouse.ru/journal/articles/10598-kak-gosudarstvo-ostanavlivaet-rost-cen-na-stroymaterialy-i-podderzhivaet-zhilishchnoe-stroitelstvo>

¹⁰ Меры Правительства по повышению устойчивости экономики и поддержке граждан в условиях санкций. URL: http://government.ru/sanctions_measures/

¹¹ Санкции и экономическая зависимость России. URL: <https://vestnikburi.com/sankezii-i-ekonomicheskaya-zavisimost-rossii/>

¹² Подключение к инженерным сетям глазами застройщиков. URL: <http://www.vedomosti.ru/partner/articles/2020/12/07/849723-podklyuchenie-inzhenernim>

являются поставки инженерных систем (кондиционирования воздуха, теплоснабжения, лифтового обеспечения и др.). Импортёры лифтов отказались от поставок в Россию, а на их долю приходилась треть рынка. Российские или китайские лифты требуют перепроектирования. Продукцию новых поставщиков необходимо сертифицировать, а это — время и, соответственно, сдвиг сроков. Кроме инженерных систем также следует заместить строительную технику. Будучи импортной, ее необходимо поддерживать в работоспособном режиме, а это поиск заменителей запчастей и т.д. В целом эта проблема не сложнее импортозамещения керамики или приборов массового освещения, но ее решение требует системных решений на государственном уровне [16]. В настоящее время известен лишь единственный частный проект «ПИК-Инновации» по строительству в г. Орле завода для производства компонентов «умных домов»¹³.

4. Мораторий на штрафы, пени, неустойки в случае переноса сроков строительства, допуск корректировок контрактов по поставкам также решает лишь часть давно назревшей проблемы формирования комфортной бизнес-среды в строительстве. Заметим, что, если комфортность городской среды не только системно исследована [17], но и стандартизирована¹⁴, то понятие «комфортной бизнес-среды в строительстве» до сих пор только «нащупывается» рынком. Проблема поднимается на ежегодных Всероссийских научно-практических конференциях «Судебная строительная-техническая и стоимостная экспертиза: актуальные проблемы и пути их решения» (НИУ МГСУ) [18], но, несомненно, требует проведения специального исследования. Это важно, имея в виду также необходимость учета особенностей инвестиционно-строительной деятельности. А они естественным образом затрагивают и проблемы ценообразования строительной продукции и услуг по эксплуатации, и нормы конкурсного размещения государственного строительного заказа, и практику контрактинга субподрядчиков, и механизмы разрешения споров, и многие другие проблемы. Зарубежный опыт показывает, что в соответствии с Директивой ЕС о закупках 2014 г. отказ от ценового критерия выбора застройщика в пользу репутационных критериев (по надежности и качеству выполнения работ), критерия минимизации негативного воздействия на окружающую среду и вклада в устойчивое развитие строительной отрасли¹⁵ [19] сняло множество

¹³ ПИК построит завод для производства компонентов «умных домов». URL: https://obzor78.ru/posts/domostroy_channel/5642

¹⁴ Стандарт комплексного развития территорий. URL: <https://xn--d1aqf.xn--p1ai/urban/standards/printsipy-kompleksnogo-razvitiya-territoriy/>

¹⁵ Директива Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 2014/23/ЕС о заключении концессионных соглашений. URL: <https://base.garant.ru/71832112/>

противоречий и повысило качество исполнения государственных строительных заказов. На фоне использования множества разнообразных внесудебных методов разрешения споров инвестиционно-строительный цикл был существенно ускорен. Таким образом, можно констатировать, что попытки фрагментарного разрешения проблемы некомфортной бизнес-среды с помощью ресурсного метода ценообразования, или проведения «открытых аукционов», или введения временного моратория на банкротство и другие несомненно ослабляют влияние негативных процессов, но не купируют источники возникновения противоречий развития, требуя в числе прочих использования платформенных решений.

5. Среди оперативно принятых мер на отраслевом уровне^{16, 17} отсутствует даже упоминание о поддержке отраслевой науки. Какие разработки востребованы? Какие коллективы способны их выполнить? Какие инструменты и механизмы эффективного внедрения разработок в условиях мобилизационной экономики будут востребованы? Вопросы, остающиеся пока без ответов. Имея в виду, что основные отраслевые НИИ были фактически ликвидированы, а вузовская наука в сложившихся условиях объективно не готова принять вызов научного обоснования и продуцирования нового практико-ориентированного знания, актуализируется задача формирования экспертного высококвалифицированного сообщества, способного не только ставить цели научного поиска, но и обеспечивать организационную и инфраструктурную поддержку работы теоретиков, экспериментаторов, технологов и инженеров. Указанная задача архисложная, ибо последние годы Минобрнауки РФ проводило политику укрепления международного сотрудничества. Вузы боролись то за непрерывное переформатирование программ обучения, то за рейтинги и публикации, то за «омоложение» профессорско-преподавательского состава и уровни заработной платы за счет ликвидации неполных ставок и т.д. Таким образом, фактически было ликвидировано время на самообразование преподавательского состава, а инновационные подразделения университетов только косвенно влияли на отчетные показатели, их значение обнулялось, а самые талантливые выпускники вузов устремились в коммерческую сферу или предпочитали участие в международных программах и проектах зарубежной локации. Вновь принятая программа «Приоритет 2030»¹⁸, нацеленная на обеспечение «достойного места в мировом экономическом сообществе», также далека от практики,

как предшествующая и ничего не давшая инновационной сфере национальной экономики программа «5-100»¹⁹. В этой связи отраслевая наука, сосредоточенная в профильных вузах, функционирующих в форме научно-образовательных учреждений, должна «не ждать милости от природы», а в инициативном порядке корректировать программы обучения и тематику НИР. Обладающие исследовательскими навыками преподаватели смогут корректно поставить задачи, подобрать самые эффективные методы их решения, спрогнозировать и оценить ожидаемые результаты. Возможно после «экономикс» и «рыночных закономерностей» их необходимо переориентировать и повысить квалификацию, но это реальный резерв организации научного поиска. Конечно, для его активизации совершенно обязательно использовать действенные стимулы и новые оценочные показатели деятельности вузов. Все это укладывается в рамки новой отраслевой программы научной поддержки развития строительства. Контуры такой отраслевой программы должны включать:

- системно изложенные (возможно структурированные в соответствии с Проектом стратегии развития строительной отрасли и ЖКХ Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года²⁰) направления НИР;
- объемы и структуру финансирования научных исследований;
- результаты апробации научных и опытно-конструкторских разработок;
- инфраструктурное обеспечение (информационное, организационное, техническое и др., способные поддерживать функционирование системы, производящей новые знания и обеспечивающей их внедрение в практику);
- подготовку исследовательских кадров во всех сегментах научного поиска и внедрения его результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный анализ дал возможность выявить пять основных проблем, без разрешения которых ожидать перелома стабилизационных тенденций на развивающиеся не приходится. Для осуществления сказанного востребована систематизация методов решения установленных проблем.

По первой проблеме — реструктуризации отраслевого центра управления отметим, что методология реструктуризации и ее методическое обеспечение

¹⁶ Минстрой России. Антикризисные изменения строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства. URL: https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/fae/Mery_Podderzhki_stroitelstva_ZHKKH_01_05_V1.pdf

¹⁷ Перечень мер по поддержке строительной отрасли. URL: <https://nostroy.ru/nostroy/operativnyy-shtab/supports/>

¹⁸ Приоритет 2030. URL: <https://priority2030.ru>

¹⁹ 5-100. Проект повышения конкурентоспособности ведущих российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров. URL: <https://www.stop100.ru/>

²⁰ Проект стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/18723/>

в инвестиционно-строительной сфере исследовались неоднократно [20]. Также нелишним окажется ретроспективный анализ структуры управления строительной отраслью в СССР с характерной двухуровневой системой отраслевого управления: Госкомитет по строительству и специализированные министерства строительства. Их состав отражал масштаб преобразований, требующий выделения не только территорий опережающего развития, например Минсевзапстрой, отвечающий за развитие северо-запада страны, но и учета непрерывного технологического обновления специализированных сегментов отраслевого развития, например Минмонтажспецстрой, Минпром или Миннефтегазстрой. В рамках профессионально сфокусированных на предметную область кадров во взаимодействии с отраслевой наукой реализовывались планы научно-технического развития и задавалась соответствующая тематика научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Современный уровень совершенствования строительного рынка с характерно высокой долей крупных застройщиков позволяет отраслевым органам в диалоговом режиме с ними и другими представителями бизнес-среды ставить и решать актуальные проблемы развития отрасли. Между тем рецептура развития не может быть оторвана от специфики нового строительства, особенностей городского хозяйства или технологических способов обновления коммунальной инфраструктуры. Тем более, что масштаб указанных сфер не просто ускоренно растет, но должен обновляться не только на новой инновационной платформе, но и в новой, в связи с санкциями, коммуникационной среде.

Вопросы решения жилищной проблемы, импортозамещения, создания комфортной бизнес-среды и подключения имеющегося научного потенциала к решению практических задач развития инвестиционно-строительной сферы, по мнению авторов, лежат в области *методологии создания вариативного пространства*. Поясним, что в условиях высокой неопределенности невозможно априори предпочесть тот или иной вариант/метод решения проблемы. Более того, эскалация использования того или иного метода, его ресурсная поддержка в ущерб альтернативным вариантам чреваты не только прямым снижением уровня эффективности, но и далеко идущими последствиями. Так, исследования кафедры инвестиционно-строительного бизнеса и управления недвижимостью РАНХиГС [21] показали, что ипотечные обременения тормозят рождаемость. Несмотря на льготы и материнский капитал, они также непомерно обременяют семейные бюджеты, ограничивают экономическую свободу и инициативы, исключая даже минимальные риски деятельности. Между тем, например, ссудосберегательные модели ипотечно-накопительной программы «Жилстройсбережения» (Республика Башкортостан) или модели проекта «Небанковский фонд поддержки индивидуального жилищного строительства» (Белгородская область) и многие другие

до сих пор не оценены как возможная альтернатива. Это свидетельствует о необходимости инвентаризации региональных инициатив с целью отбора и масштабирования максимально эффективных.

Говоря о методах импортозамещения, в том числе на основе государственно-частного партнерства, отметим — они требуют экспериментальной апробации и только по итогам — возможного масштабирования. Аналогично востребован эксперимент по отбору способов внесудебного разрешения споров в инвестиционно-строительной сфере, ценообразованию в рамках государственного строительного заказа, а также по цифровизации с выходом на платформенные решения. Напомним, что используемый по сей день экспедиционно-вахтовый метод или осуществление линейного строительства комплексными механизированными потоками в рамках реализации программ строительства, осуществляемых Миннефтегазстроем СССР, явились следствием научных разработок отраслевого научного центра ВНИИПКтехоргнефтегазстрой, которые были экспериментально апробированы в процессе создания трубопровода «Уренгой – Помары – Ужгород». Альянс ученых, строителей и представителей отраслевого центра управления позволил убедиться в их эффективности, но, что самое главное — систематизировать условия внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Синтезируя сформированные подходы и методы решения проблем развития строительства в условиях санкций, с точки зрения авторов, незаслуженно забыт потенциал экономического эксперимента, способного сузить возможность ошибок выбора единственной модели и пути купирования проблем. Следовательно, актуализируется необходимость экспериментальной отработки тех или иных способов решения проблем развития. В современной, достаточно пестрой, картине преобразований отсутствует научно обоснованный и методически проработанный способ экспериментальной проверки той или иной модели будущего отрасли. До сих пор нет внятных критериев оценки результатов эксперимента, норм защиты авторских прав и поощрения разработчиков. Реорганизация отраслевого управления по типу самостоятельных отраслевых экосистем с использованием потенциала информационных платформ, снижающих транзакционные издержки, также требует проведения широкомасштабного эксперимента для снятия возможных нестыковок и противоречий.

Исторический опыт научного поиска эффективных решений [22, 23] показал, что в условиях мобилизационной экономики отработка на практике тех или иных моделей организации, инвестирования, цифровизации и других инвестиционно-строительной деятельности в оперативном режиме времени даст возможность получить не только объективную картину их эффективности, но и выявить узкие места

практической реализации. Отметим, что в настоящее время именно те регионы, которые решились на использование платформенных решений (например, Татарстан или Пермский край) [24], кооперативные модели нового строительства (Белгородская область, Башкортостан и др.), оказались подготовленными к вызовам продолжающегося нарастать санкционного давления. При этом подчеркнем, что экспериментировать, ничего не умея, без методического обеспечения, профессиональной подготовки и глубокого понимания инвестиционно-строительных процессов, недопустимо. Нужны отбор и оценка пула инициатив для экспериментальной проверки. В трех предполагаемых отраслевых центрах управления соот-

ветственно должны быть сформированы бюджеты и инфраструктура отбора, проведения апробации, осуществления оценки перспективного преимущества научно-исследовательских разработок по приоритетным направлениям стратегического развития отрасли. Следует понимать, что битву за умного потребителя и опережающе умного производителя не выиграть без цифровизации и платформенных решений. Наличие поисковых работ и параметров их экспериментальной проверки целесообразно использовать в качестве оценочных показателей деятельности отраслевых органов управления. А право на эксперимент должны иметь профессионалы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Rindova V.P., Martins L.L.* Shaping possibilities: A design science approach to developing novel strategies // *Academy of Management Review*. 2021. Vol. 46. Issue 4. Pp. 800–822. DOI: 10.5465/amr.2019.0289
2. *Minakir P.A.* Strategies for Russia and Russia // *Spatial Economics*. 2021. Vol. 17. Issue 1. Pp. 7–17. DOI: 10.14530/se.2021.1.007-017
3. *Friz K., Gunther J.* Innovation and economic crisis in transition economies // *Eurasian Business Review*. 2021. Vol. 11. Issue 4. Pp. 537–563. DOI: 10.1007/s40821-021-00192-y
4. *Gogokhia T., Berulava G.* Business environment reforms, innovation and firm productivity in transition economies // *Eurasian Business Review*. 2021. Vol. 11. Issue 2. Pp. 221–245. DOI: 10.1007/s40821-020-00167-5
5. *Qerimi Q.* The quest for operational priorities: Areas in need of strategic development intervention // *Law and Development Review*. 2018. Vol. 11. Issue 1. Pp. 1–29. DOI: 10.1515/ldr-2017-0007
6. *Яськова Н.Ю.* Строительство в контексте новых взглядов на цели экономического развития // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2018. Т. 8. № 1 (24). С. 133–142.
7. *Яськова Н.Ю., Волошин А.В.* Управленческие тренды малого бизнеса в новой экономике // *Научное обозрение*. 2014. № 7–1. С. 388–391.
8. *Yaskova N., Kolosova T.* The Investment and Construction activities transformation at the modern development stage of Russia // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. Issue 6. P. 062050. DOI: 10.1088/1757-899x/869/6/062050
9. *Ermolenko A.A., Naumov S.V.* Transformation of the relationship between public production and consumption' means: the imperatives of the new reality // *Spatial Economics*. 2021. Vol. 17. Issue 1. Pp. 163–189. DOI: 10.14530/se.2021.1.163-189
10. *Alekhin B.I.* Human Capital and Regional Economic Growth in Russia // *Spatial Economics*. 2021. Vol. 17. Issue 2. Pp. 57–80. DOI: 10.14530/se.2021.2.057-080
11. *Bezzina F., Camilleri E., Marmara V.* Policy making, coordination and implementation government reforms // *Public Administration, Governance and Globalization*. 2021. Pp. 159–176. DOI: 10.1007/978-3-030-74357-4_7
12. *Silva E., Hassem A., Ottonicar S.L.C., Mallavazi V.S.* Strategies in innovation policies: A comparative study // *European Public & Social Innovation Review*. 2020. Vol. 5. Issue 1. Pp. 10–21. DOI: 10.31637/epsir.20-1.2
13. *Викторов М.Ю., Яськова Н.Ю.* Анализ влияния коронакризиса на проблемный контур развития жилищного строительства // *Экономика и предпринимательство*. 2020. № 10 (123). С. 1093–1096. DOI: 10.34925/EIP.2020.123.10.217
14. *Зайцева Л.И., Бельский М.Д.* Меры правовой поддержки хозяйствующих субъектов в условиях пандемии: отечественный и зарубежный опыт // *Вестник Арбитражного суда Московского округа*. 2020. № 3. С. 98–107. DOI: 10.46279/ASMO.2020.36.77.005
15. *Алексеев С.А., Викторов М.Ю., Грабовый П.Г., Зайцева Л.И., Казанский Н.В., Каминский М.А. и др.* Пространственная реструктуризация. Новые смыслы и правила инвестиционно-строительной деятельности. М. : Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2019. 454 с.
16. *Mayssa H., Hamida A., Hadhek Z., Mrad F., Haouat F.* Shadow Economy and Economic Growth // *Review of Economics and Finance*. 2021. Vol. 19. Pp. 246–254. DOI: 10.55365/1923.x2021.19.25
17. *Астафьев С.А., Сарченко В.И., Хиревич С.А., Саенко И.А., Пухова В.В., Ширинкина А.Ю. и др.* Экономическое обоснование градостроительных решений и повышения комфортности городской среды. М. : Изд-во АСВ, 2021. 256 с.
18. Судебная строительно-техническая и стоимостная экспертиза: актуальные проблемы и пути их

решения : Всероссийская научно-практическая конференция. URL: https://mgsu.ru/news/Universitet/Sud_ebnayastroitelnotekhnicheskayaistoimostnayaekspertizaaktualnyeproblemyiputiikhresheniya-2019/

19. Kirkwood H. Perspectives: revisited // *Business Information Review*. 2021. Vol. 38. Issue 2. Pp. 75–78. DOI: 10.1177/02663821211018288

20. Верстина Н.Г. Реструктуризация предприятий инвестиционно-строительной сферы: теория, методология, механизмы реализации, эффективность. М. : МГСУ, 2002. 338 с.

21. Альтернативные механизмы разрешения споров в строительстве как фактор практической реализации Национальных проектов развития

России: научно-исследовательская работа. М. : РАНХиГС, 2022. 98 с.

22. Галушка А.С., Ниязметов А.К., Окулов М.О. Кристалл роста. К русскому экономическому чуду. М. : Наше Завтра, 2021. 360 с.

23. Whyte J. How digital information transforms project delivery models // *Project Management Journal*. 2019. Vol. 50. Issue 2. Pp. 177–194. DOI: 10.1177/8756972818823304

24. Бурлуцкий Н.А. Перспективы фирм-платформ на современном этапе развития национальной экономики // *Экономика и предпринимательство*. 2022. № 2 (139). С. 1239–1241. DOI: 10.34925/EIP.2022.139.2.248

Поступила в редакцию 24 июня 2022 г.

Принята в доработанном виде 9 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 10 ноября 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Наталья Юрьевна Яськова** — доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой инвестиционно-строительного бизнеса и управления недвижимостью; **Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС)**; 119571, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 82; ORCID: 0000-0001-8962-3420; yaskova-ny@ranepa.ru;

Инесса Галеевна Лукманова — доктор экономических наук, профессор кафедры экономики и управления в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-2835-8181; lukmanova@mgsu.ru;

Лариса Игоревна Зайцева — доцент, профессор, заместитель заведующего кафедрой инвестиционно-строительного бизнеса и управления недвижимостью; **Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС)**; 119571, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 82; mcua3@yandex.ru.

Вклад авторов:

Яськова Н.Ю. — разработка концепции исследования, написание текста статьи, подготовка итоговых выводов.

Лукманова И.Г. — научное редактирование.

Зайцева Л.И. — нормативно-методическое обеспечение.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Rindova V.P., Martins L.L. Shaping possibilities: A design science approach to developing novel strategies. *Academy of Management Review*. 2021; 46(4):800-822. DOI: 10.5465/amr.2019.0289.
2. Minakir P.A. Strategies for Russia and Russia. *Spatial Economics*. 2021; 17(1):7-17. DOI: 10.14530/se.2021.1.007-017
3. Friz K., Gunther J. Innovation and economic crisis in transition economies. *Eurasian Business Review*. 2021; 11(4):537-563. DOI: 10.1007/s40821-021-00192-y
4. Gogokhia T., Berulava G. Business environment reforms, innovation and firm productivity in transition economies. *Eurasian Business Review*. 2021; 11(2): 221-245. DOI: 10.1007/s40821-020-00167-5
5. Qerimi Q. The quest for operational priorities: Areas in need of strategic development intervention. *Law and Development Review*. 2018; 11(1):1-29. DOI: 10.1515/ldr-2017-0007
6. Yaskova N.Yu. Construction in the context of new views on the goals of economic development. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2018; 8(1):133-142. (rus.).
7. Yaskova N.Y., Voloshin A.V. Management trends of small business in the new economy. *Scientific Review*. 2014; 7-1:388-391. (rus.).
8. Yaskova N., Kolosova T. The Investment and Construction activities transformation at the modern development stage of Russia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(6):062050. DOI: 10.1088/1757-899x/869/6/062050

9. Ermolenko A.A., Naumov S.V. Transformation of the Relationship between Public Production and Consumption' Means: The Imperatives of the New Reality. *Spatial Economics*. 2021; 17(1):163-189. DOI: 10.14530/se.2021.1.163-189
10. Alekhin B.I. Human capital and regional economic growth in Russia. *Spatial Economics*. 2021; 17(2):57-80. DOI: 10.14530/se.2021.2.057-080
11. Bezzina F., Camilleri E., Marmara V. Policy making, coordination and implementation government reforms. *Public Administration, Governance and Globalization*. 2021; 159-176. DOI: 10.1007/978-3-030-74357-4_7
12. Silva E., Hassem A., Ottonicar S.L.C., Mallavazi V.S. Strategies in innovation policies: A comparative study. *European Public & Social Innovation Review*. 2020; 5(1):10-21. DOI: 10.31637/epsir.20-1-2
13. Viktorov M.Yu., Yaskova N.Yu. Housing construction problematic vector of development: analysis of "coronacrisis" impact. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2020; 10(123):1093-1096. DOI: 10.34925/EIP.2020.123.10.217 (rus.).
14. Zaitseva L.I., Belsky M.D. Measures of legal support for business entities in a pandemic: domestic and foreign experience. *Bulletin of the Arbitration Court of the Moscow District*. 2020; 3:98-107. DOI: 10.46279/ASMO.2020.36.77.005 (rus.).
15. Alekseev S.A., Viktorov M.Yu., Grabovy P.G., Zaitseva L.I., Kazansky N.V., Kaminsky M.A. et al. *Spatial restructuring. New meanings and rules of investment and construction activities*. Moscow, Delo Publishing House, RANEPА, 2019; 454. (rus.).
16. Mayssa H., Hamida A., Hadhek Z., Mrad F., Haouat F. Shadow economy and economic growth. *Review of Economics and Finance*. 2021; 19:246-254. DOI: 10.55365/1923.x2021.19.25
17. Astafiev S.A., Sarchenko V.I., Khirevich S.A., Saenko I.A., Pukhova V.V., Shirinkina A.Yu. et al. *Economic substantiation of urban planning solutions and improving the comfort of the urban environment*. Moscow, ASV Publishing House, 2021; 256. (rus.).
18. *Judicial Construction, Technical and Cost Expertise: Current Problems and Ways to Solve Them : All-Russian Scientific and Practical Conference*. URL: <https://mgsu.ru/news/Universitet/Sudebnayastroitelnotekhnicheskayaistoimostnayaekspertizaaktualnyeproblemyiputiikhresheniya-2019/> (rus.).
19. Kirkwood H. Perspectives: Revisited. *Business Information Review*. 2021; 38(2):75-78. DOI: 10.1177/02663821211018288
20. Verstina N.G. *Restructuring of enterprises in the investment and construction sector: theory, methodology, implementation mechanisms, efficiency*. Moscow, MGSU, 2002; 338. (rus.).
21. *Alternative dispute resolution mechanisms in construction as a factor in the practical implementation of the National Development Projects of Russia : research work*. Moscow, RANEPА, 2022; 98. (rus.).
22. Galushka A.S., Niyazmetov A.K., Okulov M.O. *Growth crystal. To the Russian economic miracle*. Moscow, Our Tomorrow, 2021; 360. (rus.).
23. Whyte J. How digital information transforms project delivery models. *Project Management Journal*. 2019; 50(2):177-194. DOI: 10.1177/8756972818823304
24. Burlutsky N.A. Prospects for platform firms at the present stage of development of the national economy. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2022; 2:1239-1241. DOI: 10.34925/EIP.2022.139.2.248 (rus.).

Received June 24, 2022.

Adopted in revised form on November 9, 2022.

Approved for publication on November 10, 2022.

B I O N O T E S : **Natalya Yu. Yaskova** — Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Investment and Construction Business and Real Estate Management; **Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPА)**; 82 Vernadsky avenue, Moscow, 119571, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8962-3420; mcua3@yandex.ru;

Inessa G. Lukmanova — Doctor of Economics, Professor of the Department of Economics and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2835-8181; lukmanova@mgsu.ru;

Larisa I. Zaytseva — Associate Professor, Professor, deputy Head of the Department of Investment and Construction Business and Real Estate Management; **Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPА)**; 82 Vernadsky avenue, Moscow, 119571, Russian Federation; mcua3@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Natalya Yu. Yaskova — development of the research concept, writing the text of the article, preparation of final conclusions.

Inessa G. Lukmanova — scientific editing, normative and methodological support.

Larisa I. Zaytseva — regulatory and methodological support.

The authors declare no conflict of interest.

Наукометрический анализ направлений исследований в области индустриального домостроения

Виталий Юрьевич Гуринович¹, Сергей Николаевич Леонович²,
Дмитрий Александрович Поздняков³

¹ Филиал Белорусского национального технического университета
«Научно-исследовательский политехнический институт» (Филиал БНТУ НИПИ);
г. Минск, Республика Беларусь;

² Белорусский национальный технический университет (БНТУ); г. Минск, Республика Беларусь;

³ Институт жилища — НИПТИС им. Атаева С.С.; г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Государственная политика в области жилищного строительства, предусматривающая наращивание объемов возведения жилья и снижение его стоимости, способствует развитию индустриального домостроения в отечественной строительной практике. Рост доли возведения жилья в индустриальном исполнении требует исследования и внедрения современных организационно-технологических решений строительства зданий и производства сборных железобетонных изделий (ЖБИ), определения направлений совершенствования индустриального домостроения.

Материалы и методы. Для исследований развития и эффективности индустриального домостроения, актуальных направлений и тенденций научных исследований в области индустриального домостроения, структуры цитирования, ключевых исследователей, институтов, стран и периодических научных изданий использован наукометрический анализ в аналитической системе SciVal с применением инструментов визуализации, количественных и качественных наукометрических показателей.

Результаты. Анализ тенденций исследований в сфере строительства и строительных технологий в мире показал, что индустриальное домостроение является одним из наиболее интенсивно развивающихся и перспективных направлений научных исследований. Основные тематики — проектирование и информационное моделирование, организация строительства и производства сборных конструкций, доставка конструкций на строительную площадку и их монтаж. Исследованиям в области технологий производства ЖБИ в заводских условиях и управления производством уделяется меньшее внимание, для чего требуются дальнейшие исследования в данных направлениях. Эффективность индустриального домостроения необходимо рассматривать в контексте конкретной страны или региона и оценивать, применяя системный анализ затрат и выгод.

Выводы. Результаты проведенного наукометрического анализа позволяют выявить тенденции, определить приоритетные направления научных исследований и их связь с другими областями науки и могут стать базой для обнаружения пробелов в текущих исследованиях в области индустриального домостроения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: жилищное строительство, индустриальное домостроение, предприятия индустриального домостроения, производство сборных железобетонных конструкций, наукометрический анализ, библиографический поиск, наукометрические показатели, сборные железобетонные конструкции

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гуринович В.Ю., Леонович С.Н., Поздняков Д.А. Наукометрический анализ направлений исследований в области индустриального домостроения // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1716–1731. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1716-1731

Автор, ответственный за переписку: Виталий Юрьевич Гуринович, Gurinovich@bntu.by.

Scientometric analysis of research in the field prefabricated construction

Vitaliy Yu. Gurinovich¹, Sergey N. Leonovich², Dmitriy A. Pozdnyakov³

¹ Branch of the Belarusian National Technical University “Research Polytechnic Institute”
(Branch of the BNTU RPI); Minsk, Republic of Belarus;

² Belarusian National Technical University (BNTU); Minsk, Republic of Belarus;

³ Institute of housing — NIPTIS named after Atayev S.S.; Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. State policy in the field of housing construction, providing the increase in the volume and decrease in the cost of housing construction, promotes to the development of prefabricated construction. In its turn, the increase in the prefabricated construction requires studying and introducing modern organizational and technological solutions for the erection of buildings and production of precast reinforced concrete structures, determining the directions of improvement of prefabricated construction.

Materials and methods. To study the development and effectiveness of prefabricated construction, actual directions and tendencies of scientific research in the field of prefabricated construction, the structure of citation of publications, key researchers, leading countries, institutions, scientific journals a scientometric analysis was carried out based on the SciVal analytical system using visualization tools, quantitative and qualitative scientometric metrics.

Results. Analysis of research trends in the field of construction and building technologies in the world has shown that prefabricated construction is one of the most intensively developing and promising areas of research. The main subjects of research in the field of prefabricated construction are design and information modeling, organization of prefabricated construction and production, delivery of structures to the building site and their assembling, at that, less attention is paid to the research in the field of production technologies of precast reinforced concrete structures in the factory conditions and production management, for which further research in these directions is needed. Studies of the development of industrial house-building in the practice of housing construction have shown that the efficiency of prefabricated construction must be considered in the context of a particular country or region and evaluated by applying a systematic analysis of costs and benefits.

Conclusions. The results of the executed scientometric analysis make it possible to identify trends, priority areas for further scientific research and their relationship with other areas of science, and can be a scientific basis for identifying gaps in current research in the field of prefabricated construction.

KEYWORDS: housing construction, prefabricated construction, precast construction plants, precast production, scientometric analysis, bibliographic search, scientometric metrics, precast reinforced concrete structures

FOR CITATION: Gurinovich V.Yu., Leonovich S.N., Pozdnyakov D.A. Scientometric analysis of research in the field prefabricated construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(12):1716-1731. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1716-1731 (rus.).

Corresponding author: Vitaliy Yu. Gurinovich, Gurinovich@bntu.by.

ВВЕДЕНИЕ

Индустриальное домостроение в последнее время является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в мировой практике исследований в области строительства и строительных технологий. Технология возведения зданий из железобетонных изделий (ЖБИ) и элементов известна давно, но только в последнее десятилетие данное направление привлекает все больше внимания ученых и практикующих специалистов [1–6]. Обзор литературы в международных базах научного цитирования показал значительный рост количества публикаций по данной тематике, начиная с 2015 г. [7].

Индустриальное строительство в зарубежной практике рассматривается как инструмент оптимизации строительства за счет развития производства строительных изделий вне строительной площадки [8, 9], а сборный железобетон как один из методов строительства, использующий принципы индустриализации в строительном процессе. Строительство из сборных конструкций применяется в ряде стран в различной терминологии: современный метод строительства (MMC) — в Великобритании; внеплощадочное производство (OSM) — в Великобритании, США и Австралии; индустриализованная строительная система (IBS) — в Малайзии и проч.

Возведение зданий и сооружений из ЖБИ — один из основных методов строительства во многих европейских странах и в последнее время интенсивно развивается в азиатском регионе (Китай, Малайзия, Индия, Южная Корея, Иран и др.). Средняя доля зданий из сборного железобетона в странах Европейского Союза составляет 20–25 %, в странах Северной Европы она достигает 40–50 %, а на долю Китая приходится более 30 % мирового рынка индустриально-

го строительства. Несмотря на ряд преимуществ, индустриальному строительству, как и другим методам возведения зданий, присущи недостатки, которые сдерживают его интенсивное развитие. Так, в США и Турции строительство зданий из сборного железобетона от общего объема строительства составляет всего 6 и 2 % соответственно [8, 10].

Среди главных сдерживающих факторов развития индустриального домостроения G. Polat, Z. Wang и соавт. [8, 11] в своих исследованиях привели отсутствие квалифицированных рабочих и специалистов, опыта проектирования зданий из ЖБИ, ограниченное архитектурное разнообразие зданий, сложность доставки крупногабаритных конструкций на стройплощадки в городских условиях, полную зависимость темпов строительства от производительности и эффективности организации производства предприятий индустриального домостроения, низкую сейсмостойчивость зданий из сборного железобетона, а также государственную политику в области развития индустриального строительства. Следует отметить, что на развитие индустриального домостроения в отдельных регионах оказывают влияние климатические условия, определяющие приоритет выбора альтернативных методов строительства, имеющих преимущества по срокам и стоимости строительства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве ключевого метода изучения направлений и результативности научных исследований, определения ведущих стран, учреждений, научных журналов и уровня развития индустриального домостроения принят наукометрический анализ на базе аналитической системы SciVal. Наукометрический анализ позиционируется как главный инструмент

изучения отдельных направлений науки, сетей научных коммуникаций, средств оценки результативности научных исследований [7, 12]. Анализ результативности научных исследований проводился на основе количественных и качественных наукометрических показателей по состоянию на декабрь 2021 г.

На первом этапе исследований был осуществлен библиографический поиск научной литературы в трех тематических кластерах аналитической системы SciVal, включающих более 250 отдельных предметных категорий в области строительства.

На втором этапе выполнен наукометрический анализ результатов исследований, тематик, ключевых слов, цитирования, журналов, авторов, институтов и оценка результативности научных исследований в отобранных предметных категориях в области индустриального домостроения.

На завершающем этапе проведено обсуждение результатов наукометрического анализа, закономерностей и тенденций в области индустриального домостроения.

Схема исследований представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема проведения исследований

Fig. 1. The workflow of study

По результатам проведенного библиографического поиска в аналитической системе SciVal были определены две предметные категории T.26767 «Сборные здания, заводское производство, сборный железобетон» (Prefabricated Buildings, Off-Site, Precast Concrete) и T.57073 «Готовые бетонные изделия, производство/планирование, управление» (Ready Mixed Concrete, Production/Scheduling, Dispatching), непосредственно отражающие результаты исследований в области индустриального домостроения.

В рассматриваемых категориях для повышения качества исследований были отобраны только статьи в научных рецензируемых журналах, как демонстрирующие более полное и качественное представление результатов исследований в предметной области, и исключены книжные обзоры, тезисы, препринты и проч. Также дополнительно исключены публикации по областям исследований, которые входят в анализируемые

предметные категории, но по направлению не относятся к индустриальному домостроению (биология, медицина, сельское хозяйство, наука о Земле и т.д.). В результате установленным критериям соответствовали 474 статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах предметных категорий T.26767 и T.57073.

По итогам библиографического поиска на следующем этапе исследований выполнен наукометрический анализ с использованием показателей, позволяющих оценить результативность научных исследований в анализируемой предметной области. В качестве основных выбраны наукометрические показатели, определяющие производительность, влияние, значимость исследований и вовлеченность в исследования, которые, в свою очередь, были условно разделены на количественные (количество публикаций, цитирований и просмотров публикаций, вовлеченность в исследования стран, институтов

и научных изданий) и качественные (нормализованный по области индекс цитирования, актуальность темы исследований, доля публикаций на квартальные журналы) показатели.

В качестве временного интервала проведения наукометрического анализа принят период с 2016 по 2020 гг., как период наибольшей публикационной активности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обсуждение результатов исследования количественных метрик

На рис. 2 представлен график, демонстрирующий показатели количества публикаций результатов исследований в области индустриального строительства.

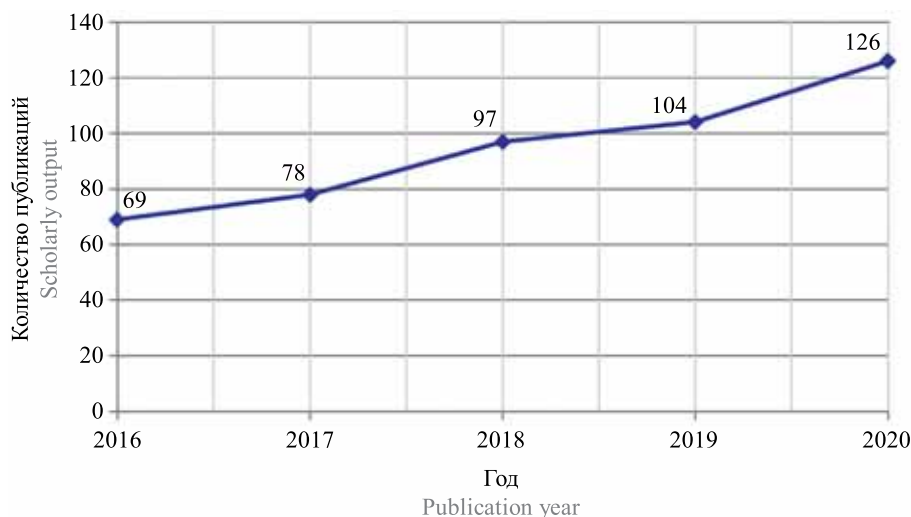


Рис. 2. Общее количество публикаций в предметных категориях Т.26767 и Т.57073

Fig. 2. Scholarly Output in topics T.26767 and T.57073

Представленные на графике данные демонстрируют практически двукратный рост ежегодного количества публикаций за период 2016–2020 гг. Следует отметить, что общее количество публикаций показывает только публикационную активность, но не отражает значимости исследования и интереса к результатам исследований. В свою очередь, зна-

чимось публикаций в научных исследованиях и интерес к публикациям определяется показателями цитируемости и количества просмотров публикаций.

Результаты анализа количества просмотров и цитирования публикаций представлены на рис. 3, 4 соответственно.

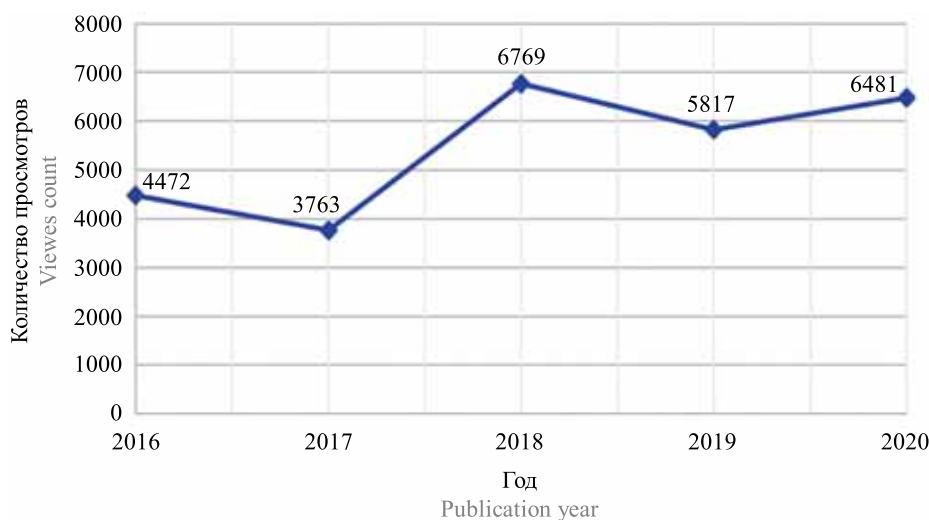


Рис. 3. Количество просмотров статей в предметных категориях Т.26767 и Т.57073

Fig. 3. Views count of publications in topics T.26767 and T.57073

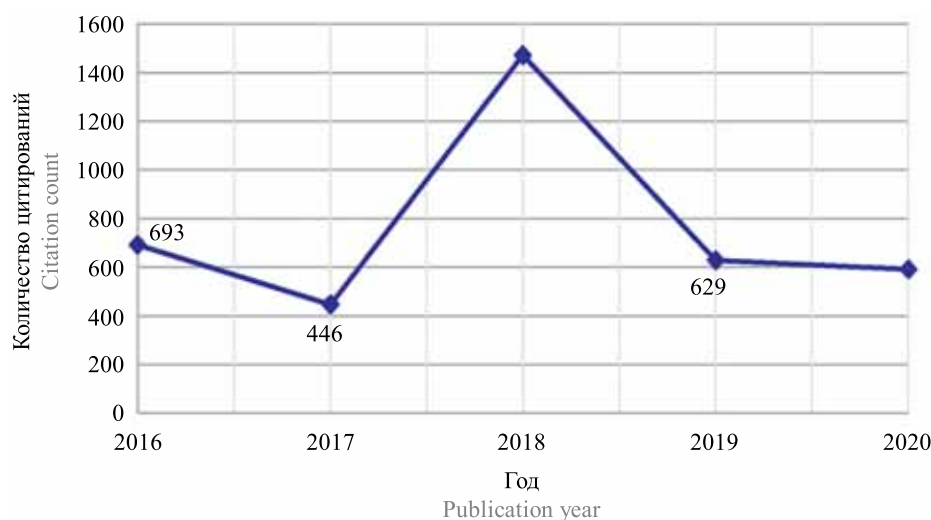


Рис. 4. Количество цитирования статей в предметных категориях Т.26767 и Т.57073

Fig. 4. Citation count of publications in topics T.26767 and T.57073

Анализ данных, представленных на графиках, показывает достаточно высокий уровень просмотров и цитирований публикаций в исследуемых предметных категориях.

По данным работ [1, 3, 13] важную роль при проведении наукометрического анализа играет определение ведущих стран, учреждений и изданий по вовлеченности в исследования анализируемой области.

В соответствии с этим для исследований были отобраны и распределены по анализируемому показателю в области индустриального домостроения 20 стран, 20 учреждений и 20 научных журналов. Показатели научной результативности стран, учреждений и научных журналов в предметных категориях Т.26767 и Т.57073 за период 2016–2020 гг. приведены в табл. 1–3.

Табл. 1. Ведущие страны по результативности исследований в области индустриального строительства

Table 1. TOP countries in studies of prefabricated construction

Страна/Регион Country/Region	Количество публикаций Scholarly Output	Количество просмотров Views count	Нормализованный индекс цитирования Field-Weighted Citation Impact	Количество цитирований Citation count
Китай China	120	7796	1,61	1626
Австралия Australia	69	6815	2,01	1245
Малайзия Malaysia	58	3943	0,83	254
Великобритания Great Britain	53	3922	1,15	521
США USA	40	3095	2,32	544
Гонконг Hong Kong	33	3990	3,06	786
Индия India	24	835	0,31	35
Канада Canada	18	1050	1,16	254
Швеция Sweden	18	852	1,47	89

Окончание табл. 1 / End of the Table 1
















Страна/Регион Country/Region		Количество публикаций Scholarly Output	Количество просмотров Views count	Нормализованный индекс цитирования Field-Weighted Citation Impact	Количество цитирований Citation count
	Иран Iran	13	716	1,89	102
	Германия Germany	11	537	0,33	32
	Российская Федерация Russian Federation	11	174	0,49	6
	Сингапур Singapore	9	1410	3,3	218
	Словакия Slovakia	8	480	1,03	23
	Египет Egypt	7	330	0,54	45
	Индонезия Indonesia	7	263	0,11	4
	Новая Зеландия New Zealand	7	378	1,42	31
	Южная Корея South Korea	7	588	1,41	65
	Чешская Республика Czech Republic	6	224	0,69	18
	Италия Italy	6	520	0,87	41

Низший  Наивысшее значение метрики
The lowest  The highest metric value

Табл. 2. Ведущие учреждения по результативности исследований в области индустриального строительства

Table 2. TOP institutions in studies of prefabricated construction

Учреждение Institution		Количество публикаций Scholarly Output	Количество просмотров Views count	Нормализованный индекс цитирования Field-Weighted Citation Impact	Количество цитирований Citation count
	Харбинский технологический институт Harbin Institute of Technology	25	756	0,66	90
	Гонконгский политехнический университет Hong Kong Polytechnic University	25	2652	2,58	572
	Мельбурнский университет The University of Melbourne	16	1734	2,17	407
	Исследовательский университет Малайзии Universiti Sains Malaysia	14	1109	0,82	74
	Чунцинский университет Chonqqing University	12	1355	2,48	360

Учреждение Institution		Количество публикаций Scholarly Output	Количество просмотров Views count	Нормализованный индекс цитирования Field-Weighted Citation Impact	Количество цитирований Citation count
	Университет Технологии МАРА Universiti Teknologi MARA	12	764	0,35	22
	Технологический университет Лулео Luleå University of Technology	11	436	1,34	38
	Университет Кертин Curtin University	10	1056	2,71	216
	Университет Нового Южного Уэльса University of New South Wales	10	665	0,98	105
	Университет Тун Хусейн Онн Малайзия Universiti Tun Hussein Onn Malaysia	9	699	0,79	40
	Университет Альберты University of Alberta	8	289	1,46	28
	Университет Утара Малайзия Universiti Utara Malaysia	8	463	0,23	18
	Университет Западного Сиднея Western Sydney University	8	553	1,84	63
	Технический университет Кошице Technical University of Košice	7	370	0,84	21
	Университет Цинхуа Tsinghua University	7	616	4,22	181
	Министерство образования, Китай Ministry of Education of the People's Republic of China	6	269	0,7	22
	Национальный университет Сингапура National University of Singapore	6	1323	4,96	218
	Квинслендский технологический университет Queensland University of Technology	6	767	2,15	86
	Королевский Мельбурнский технологический институт Royal Melbourne Institute of Technology University	6	792	3,38	284
	Раггерский университет Нью-Джерси Rutgers University	6	872	4,1	200

Низший  Наивысшее значение метрики
The lowest  The highest metric value

Наукометрический анализ исследований в области индустриального домостроения за период 2016–2020 гг. в разрезе стран/регионов, учреждений и исследователей по количественным показателям показал общее лидерство Китая, на долю которого

приходится 38 % публикаций, отобранных для анализа в предметных категориях T.26767 и T.57073. В топ-20 учреждений по количеству публикаций вошло 4 китайских учреждения. Однако по нормализованному индексу цитирования Китай занимает

только 6 место, при этом для Министерства образования и Харбинского технологического института показатель нормализованного индекса цитирования оказался ниже среднего мирового уровня и составляет 0,7 и 0,66 соответственно. Лидерами среди стран по нормализованному индексу цитирования

являются Сингапур, Гонконг и Австралия, а среди учреждений — Национальный университет Сингапура (Сингапур), университет Цинхуа (Китай) и Ратгерский университет (США), уровень цитирования публикаций которых в 4 раза выше среднего мирового.

Табл. 3. Ведущие журналы по публикациям в области индустриального строительства

Table 3. TOP Scopus Source in studies of prefabricated construction

Издание Publication	Количество публикаций Scholarly Output	Количество просмотров Views count	Нормализованный индекс цитирования Field-Weighted Citation Impact	Количество цитирований Citation count
Journal of Cleaner Production ¹	30	4534	2,88	1115
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering ²	29	839	0,81	36
Journal of Construction Engineering and Management ¹	15	1470	1,41	189
Malaysian Construction Research Journal ¹	15	470	0,1	4
Automation in Construction ¹	14	1916	3,27	559
International Journal of Construction Management ¹	12	986	2,19	159
Procedia Engineering ²	12	706	2,28	153
Engineering, Construction and Architectural Management ¹	9	675	2,37	93
Lecture Notes in Civil Engineering ³	9	518	0,89	7
Architectural Engineering and Design Management ¹	8	1259	3,46	147
ICCREM 2020 ²	8	23	0,76	2
Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering ¹	8	345	0,6	31
Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology ⁴	7	88	0	0
ICCREM 2017 ²	7	176	1,09	8
International Journal of Civil Engineering and Technology ¹	7	375	0,09	9
Jurnal Teknologi ¹	7	640	0,61	35
Buildings ¹	6	328	1,58	60
Construction Innovation ¹	6	736	1,86	123
ICCREM 2018 ²	6	152	0,53	4
ICCREM 2019 ²	6	144	2,08	8

Низший  Наивысшее значение метрики
The lowest  The highest metric value

Примечание: ¹ — журналы; ² — материалы конференций; ³ — сборник статей; ⁴ — отраслевой журнал.

Note: ¹ — Journal; ² — Conference Proceeding; ³ — Book Series; ⁴ — Trade Journal.

Среди отобранных журналов наибольшее количество опубликованных статей и самая высокая частота цитирования публикаций за период 2016–2020 гг. отмечена в журналах Journal of Cleaner

Production и IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Самый высокий показатель нормализованного индекса цитирования публикаций наблюдается в журнале Architectural Engineering and

Design Management, что отражает востребованность и актуальность публикаций в области индустриального домостроения, издающихся в этом журнале.

Для определения учреждений и стран, активно публикующих результаты исследований в наиболее влиятельных журналах, из общего перечня были отобраны 5 рейтинговых журналов по показателю количества публикаций и 5 рейтинговых журналов по показателю нормализованного индекса цитирования публикаций. После сопоставления анализируемых

наукометрических показателей и исключения дублирования журналов отобраны 7 ведущих изданий (Journal of Cleaner Production, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Journal of Construction Engineering and Management, Malaysian Construction Research Journal, Automation in Construction, Architectural Engineering and Design Management, Procedia Engineering). Рейтинг отобранных журналов по метрике CiteScore представлен на рис. 5.

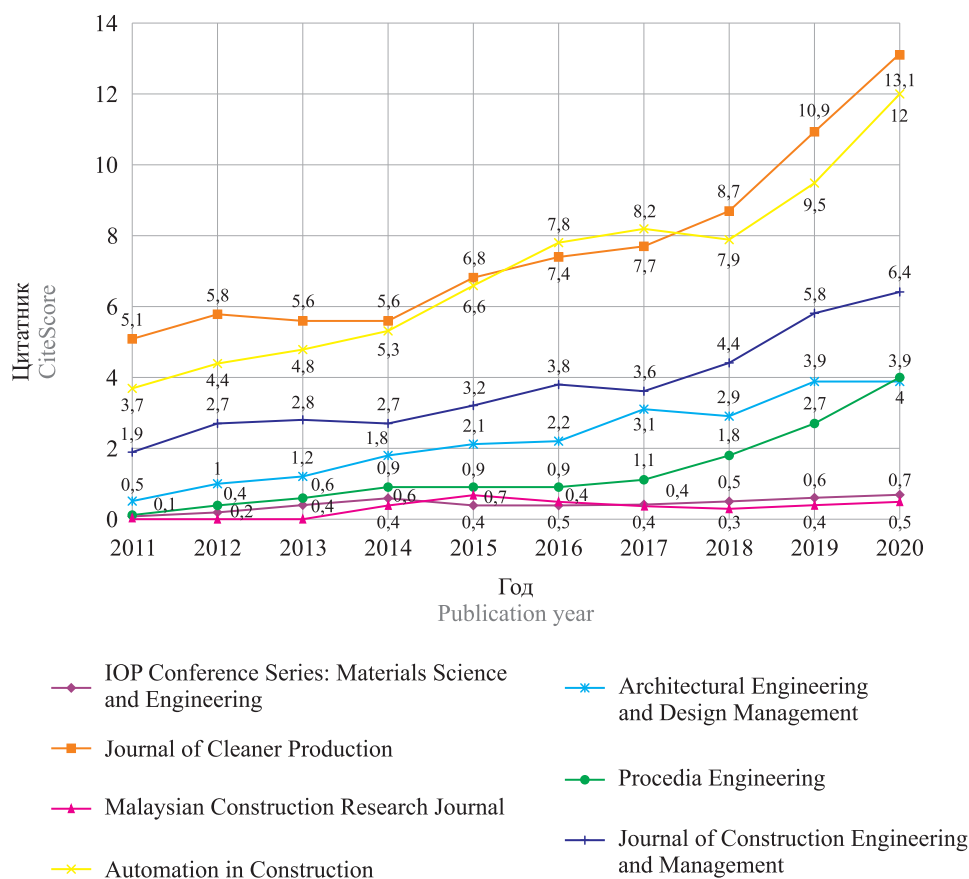


Рис. 5. Рейтинг журналов по показателю CiteScore

Fig. 5. Journal ranking by CiteScore

Наиболее влиятельными журналами по метрике CiteScore являются Journal of Cleaner Production, Automation in Construction и Journal of Construction Engineering and Management, в которых за период 2016–2020 гг. опубликовано 59 статей из общего количества анализируемых публикаций предметных категорий Т.26767 и Т.57073. В данных журналах представлены публикации 67 учреждений из 17 стран мира. Наибольшее количество публикаций представлено исследователями Гонконгского политехнического университета (Гонконг) — 12 статей, Шанхайского университета Джао Тонг (Китай) и Ратгерского университета Нью-Джерси (США) — по 5 статей соответственно. Среди стран наибольшее количество публикаций представлено

Китаем — 30 статей, Гонконгом — 17 статей и Австралией — 17 статей.

Обсуждение результатов исследования качественных метрик

На рис. 6 представлена динамика изменения показателя нормализованного по области индекса цитирования (Field-Weighted Citation Impact), который определяет научный уровень публикаций в исследуемой предметной области. Для предметных категорий Т.26767 и Т.57073 за период 2016–2020 гг. среднее значение данного показателя составляет 1,15, что указывает на цитируемость публикаций выше мирового уровня на 15 %.

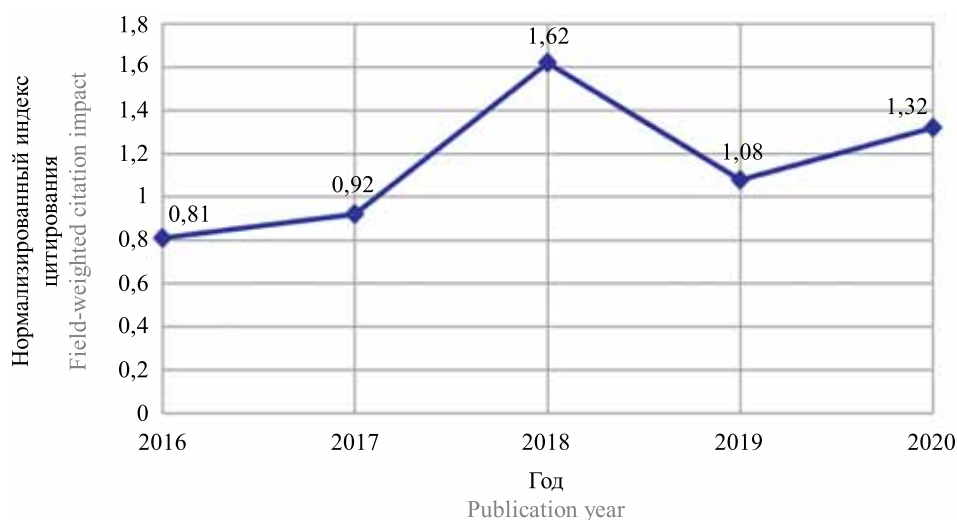


Рис. 6. Динамика изменения нормализованного показателя цитирования публикаций в предметных категориях T.26767 и T.57073

Fig. 6. Dynamics change Field-Weighted Citation Impact of publications in topics T.26767 and T.57073

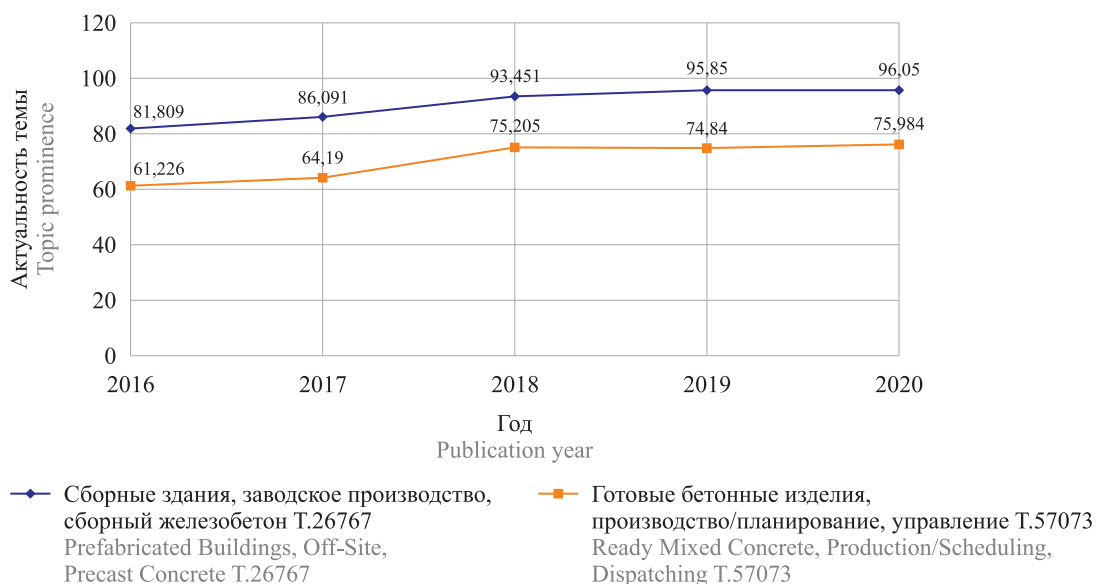


Рис. 7. Актуальность предметных категорий T.26767 и T.57073

Fig. 7. Topic Prominence T.26767 and T.57073

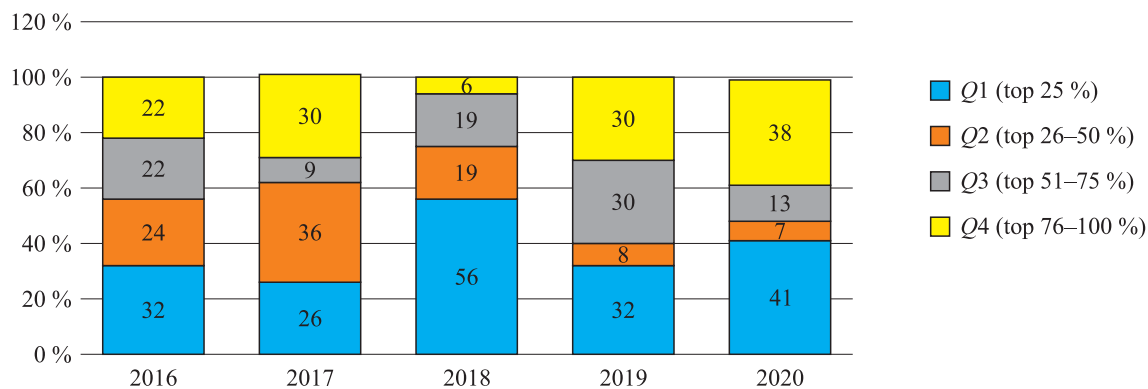


Рис. 8. Доля публикаций предметных категорий T.26767 и T.57073 в квартильных журналах

Fig. 8. Proportion of publications of topics T.26767 and T.57073 in journal quartiles

Особую роль в определении значимости исследований играет показатель актуальности темы исследований (Topic Prominence), который демонстрирует популярность (известность) темы или тематического кластера. В соответствии с графиком (рис. 7), для предметных категорий Т.26767 и Т.57073 данный показатель увеличился с 2016 г. более чем на 14,2 и 14,7 % соответственно.

В установившейся практике авторитетность публикации определяется квартилем научного издания. По результатам анализа установлено, что доля публикаций предметных категорий Т.26767 и Т.57073 за анализируемый период в журналах первого квартиля в среднем составила около 38 %. На рис. 8 представлено распределение публикаций анализируемых предметных категорий по квартилям журналов за период 2016–2020 гг.

Результаты анализа тенденций научных исследований в области индустриального домостроения

Проведенный анализ тематик публикаций предметных категорий Т.26767 и Т.57073 позволил установить наиболее востребованные тематики исследований в области индустриального домостроения, среди которых следует выделить проектирование

и информационное моделирование, организацию производства сборных конструкций, доставку конструкций на строительную площадку и их монтаж, в том числе надежность, экономичность, экологичность индустриального домостроения и проч.

Для анализа тенденций в области исследований индустриального домостроения был построен график публикационной активности в отдельности для предметных категорий Т.26767 и Т.57073 (рис. 9).

График (рис. 9) подтверждает выводы, приведенные в работе [3], что интерес к индустриальному домостроению из ЖБИ в мире возрастает, но в исследованиях преобладают темы, ориентированные на изучение архитектурных и конструктивных решений зданий, железобетонных конструкций заводского изготовления и их свойств, организации строительства в условиях строительной площадки и т.д., а тематикам в области организации производства ЖБИ, управления производством, исследований технологий производства изделий в заводских условиях уделяется меньшее внимание, что требует дальнейших исследований в данных направлениях. Результаты исследований, представленные в трудах [11, 14, 15], показали, что эффективная организация производства сборных ЖБИ служит главным фактором, обеспечивающим достижение всех основных преимуществ индустриального домостроения.



Рис. 9. Количество публикаций в предметных категориях Т.26767 и Т.57073

Fig. 9. Number of publications in topics T.26767 and T.57073

В ходе анализа публикаций установлены наиболее авторитетные исследователи и востребованные тематики в сфере индустриального домостроения. Наиболее рейтинговыми по нормализованному индексу цитирования являются публикации в области исследований ресурсосбережения и экологичности индустриального строительства на примере строительной практики Китая [16]; организации, оптими-

зации и моделирования цепочки поставок ЖБИ «предприятие – строительная площадка» [17], анализа затрат и определения направлений снижения стоимости индустриального домостроения [18]. Показатель нормализованного по области индекса цитирования данных публикаций более 10.

Среди публикаций с наибольшим количеством просмотров выделяются работы по моделированию

процессов индустриального домостроения [19]; оптимизации индустриального домостроения путем разработки инновационных решений монтажных соединений и организации монтажа конструкций [20]; изучению тенденций и выявлению проблемных вопросов развития индустриального домостроения в США [21], нормализованный по области индекс просмотра публикаций которых составил 22,63; 15,25 и 13,85 соответственно.

Ведущее направление исследований в Китае — изучение воздействия развития индустриального домостроения на окружающую среду. Приоритет данного направления обусловлен государственной политикой в области экологической безопасности Китая, в том числе сокращения вредных выбросов в строительной промышленности.

Интенсивный прогресс исследований по индустриальному домостроению в Великобритании, Австралии, Гонконге и Малайзии определяется государственной политикой развития высокотехнологичных методов строительства в этих странах. Так, в Великобритании разработаны программы поддержки и финансирования мероприятий, направленных на удовлетворение растущего спроса в доступном жилье и модернизацию технологий строительства с низкими качеством и производительностью на высокотехнологичные методы строительства, одним из которых является внеплощадочное строительство (OSM). В Малайзии росту индустриального домостроения способствовала принятая в 2003 г. Дорожная карта IBS, направленная на обеспечение создания индустриализированного строительного сектора. Развитие индустриального домостроения среди застройщиков в Малайзии мотивируется и освобождением от уплаты строительных налогов при строительстве зданий с применением сборных конструкций заводского производства (IBS) в объеме более 50 % [2].

Результаты анализа эффективности индустриального домостроения

Результаты сравнения эффективности индустриального домостроения с традиционными методами строительства, предусматривающими проведение всего цикла строительства в условиях стройплощадки, оказались весьма противоречивыми. Так, авторы публикации [22] определили, что сборное строительство индивидуальных жилых домов в Индии по типовым проектам может быть эффективно для массового строительства жилья свыше 100 зданий площадью более 25 м², а строительство одного индивидуально-двухэтажного жилого дома со сборным каркасом привело к увеличению стоимости на 21 %, но сокращению продолжительности строительства на 49 %. Однако, согласно исследованиям [23], строительство из ЖБИ в строительной практике Гонконга обеспечивает сокращение сроков строительства до 15 % и по-

требность в рабочей силе на стройплощадке до 16 %, при этом стоимость строительства увеличивается незначительно, в среднем на 1,4 %. Также отмечено, что количество несчастных случаев на стройплощадке снизилось на 63 %, а строительных отходов до 65 %.

Исследования индустриального домостроения в Китае [17] показали, что себестоимость сборных зданий на 26,3–72,1 % выше, в сравнении с монолитными зданиями. В то же время, по данным анализа [24], стоимость строительства 1 м² зданий из ЖБИ оказалась на 32,7 % больше, чем для зданий из монолитного железобетона, но с учетом снижения стоимости отделочных работ и затрат на строительство сборных зданий общие затраты оказались выше в целом на 21 %. При этом авторы публикации [25] установили, что производство сборных ЖБИ, транспортировка и проектирование дизайна зданий — самые трудоемкие и затратные технологические периоды индустриального домостроения, а стоимость отделочных работ, сроки строительства и общее количество рабочих на стройплощадке определяют экономическую эффективность индустриального домостроения.

Анализ трудов [26–28] показал экономическую эффективность индустриального домостроения при условии применения передовых конструктивных и технологических решений, корректной организации работ на всех технологических этапах строительства. В то же время авторы публикаций [29, 30] указывают на примере развития индустриального домостроения в Великобритании и Китае, что внедрение современных технологий и инновационных подходов в индустриальном домостроении ограничивается недостаточным уровнем подготовки и нехваткой профессиональных навыков у руководителей и рабочих.

В отечественной строительной практике на высокоорганизованных и оснащенных средствами механизации строительных площадках при возведении крупнопанельных жилых зданий, по данным работ [31, 32], суммарные трудовые затраты на 1 м² общей площади сокращаются почти вдвое по сравнению с традиционными методами строительства, а в заводские условия переносится до 60 % общих затрат труда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Государственная политика в области жилищного строительства в части строительства доступного жилья, обеспечения прогнозных показателей средней стоимости 1 м² жилья и объемов строительства способствует росту индустриального домостроения, как основного метода возведения жилья с минимальными затратами и в кратчайшие сроки. Обзор литературы показал, что в ряде стран (Китай, Великобритания, Австралия, Малайзия и др.) развитие индустриального домостроения также определяется

государственной политикой, связанной с внедрением высокотехнологичных, экологических и экономических методов строительства.

Исследования эффективности индустриального домостроения продемонстрировали большой разброс показателей эффективности в зависимости от региона строительства и критериев общей оценки эффективности. Стоит отметить, что эффективность индустриального домостроения достигается, прежде всего, применением передовых конструктивных и технологических решений, корректной организацией работ на всех технологических этапах строительства, внедрением современных технологий и инновационных подходов строительства. При этом эффективность индустриального домостроения необходимо рассматривать в контексте конкретной страны или региона и оценивать, применяя системный анализ затрат и выгод.

Среди основных сдерживающих факторов интенсивного развития индустриального домостроения в мировой строительной практике следует выделить: отсутствие опыта проектирования зданий из ЖБИ и недостаточную квалификацию рабочих и специалистов, ограниченное архитектурное разнообразие зданий, сложность доставки крупногабаритных конструкций на стройплощадки в городских условиях, низкую сейсмоустойчивость зданий из сборного железобетона и др.

В ходе проведенного наукометрического анализа установлен рост интереса к исследованиям по индустриальному домостроению, что подтверждается ежегодным увеличением количества публикаций в данной области и ростом иных количественных и каче-

ственных наукометрических показателей, включающих в том числе актуальность, значимость и авторитетность исследований. Но несмотря на общемировое увеличение исследований в области индустриального домостроения, по результатам анализа вовлеченности стран, организаций и журналов определено, что в России и Беларуси исследования в данном направлении ведутся недостаточно активно.

Общее лидерство по количеству публикаций в данной области занимает Китай, на долю которого приходится 38 % публикаций, отобранных для анализа, при этом в топ-20 учреждений по количеству публикаций вошло 4 китайских учреждения. Однако следует отметить, что по нормализованному индексу цитирования, который определяет научный уровень публикаций в исследуемой предметной области, лидерами являются Сингапур, Гонконг и Австралия, а среди учреждений — Национальный университет Сингапура (Сингапур), университет Цинхуа (Китай) и Ратгерский университет (США), уровень цитирования публикаций которых в 4 раза выше среднего мирового.

Установлено, что основными тематиками исследований по индустриальному домостроению являются проектирование и информационное моделирование, организация производства сборных конструкций, доставка конструкций на строительную площадку и их монтаж. При этом тематикам в области организации производства ЖБИ, управления производством, исследований технологий производства изделий в заводских условиях уделяется меньшее внимание, для чего требуются дальнейшие исследования в данных направлениях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Liu W., Zhang H., Wang Q., Hua T., Xue H. A Review and Scientometric Analysis of Global Research on Prefabricated Buildings // *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Pp. 1–18. DOI: 10.1155/2021/8869315
2. Azman M.N.A., Ahamad M.S.S., Wan Husain W.M.A. Comparative Study on Prefabrication Construction Process // *International Surveying Research Journal*. 2012. Vol. 2. Issue 1. Pp. 45–58.
3. Hosseini M.R., Martek I., Zavadskas E.K., Aibinu A.A., Arashpour M., Chileshe N. Critical evaluation of off-site construction research: A Scientometric analysis // *Automation in Construction*. 2018. Vol. 87. Pp. 235–247. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.002
4. Wuni I.Y., Shen G.Q. Critical success factors for modular integrated construction projects: a review // *Building Research & Information*. 2020. Vol. 48. Issue 7. Pp. 763–784. DOI: 10.1080/09613218.2019.1669009
5. Razkenari M., Fenner A., Shojaei A., Hakim H., Kibert C. Perceptions of offsite construction in the Uni-

ted States: An investigation of current practices // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 29. P. 101138. DOI: 10.1016/j.job.2019.101138

6. Hussein M., Eltoukhy A.E.E., Karam A., Shaban I.A., Zayed T. Modelling in off-site construction supply chain management: A review and future directions for sustainable modular integrated construction // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 310. P. 127503. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127503

7. Гуринович В.Ю. Комплексное исследование развития индустриального домостроения // *Наука и техника*. 2022. Т. 21. № 5. С. 397–409. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-5-397-409

8. Polat G. Precast concrete systems in developing vs. industrialized countries // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2010. Vol. 16. Issue 1. Pp. 85–94. DOI: 10.3846/jcem.2010.08

9. Alinaitwe H.M., Mwakali J., Hansson B. Assessing the degree of industrialisation in construction — a case of Uganda // *Journal of Civil Engineering and*

- Management. 2006. Vol. 12. Issue 3. Pp. 221–229. DOI: 10.3846/13923730.2006.9636396
10. Ay I., Ayalp G.G. Prefabrikte Yapıların Tasarım, Üretim, Depolama, Nakliye Ve Yapım Süreçlerini Etkileyen Kriterler // Teknik Dergi. 2021. Vol. 32. Issue 3. Pp. 10907–10917. DOI: 10.18400/tekderg.647272
11. Wang Z., Hu H., Gong J. Framework for modeling operational uncertainty to optimize offsite production scheduling of precast components // Automation in Construction. 2018. Vol. 86. Pp. 69–80. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.026.
12. Акоев М.А., Маркусова В.А., Москалева О.В., Писляков В.В. Руководство по наукометрии: индикаторы развития науки и технологии. Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2014. 249 с.
13. Cao X., Li X., Zhu Y., Zhang Z. A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 109. Pp. 131–143. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.120
14. Kim T., Kim Y.W., Cho H. Dynamic production scheduling model under due date uncertainty in precast concrete construction // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 257. P. 120527. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120527
15. Yuan Z., Qiao Y., Guo Y., Wang Y., Chen C., Wang W. Research on lean planning and optimization for precast component production based on discrete event simulation // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–14. DOI: 10.1155/2020/8814914
16. Chang Y., Li X., Masanet E., Zhang L., Huang Z., Ries R. Unlocking the green opportunity for prefabricated buildings and construction in China // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 139. Pp. 259–261. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.08.025
17. Wang Z., Hu H., Gong J., Ma X., Xiong W. Precast supply chain management in off-site construction: a critical literature review // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 232. Pp. 1204–1217. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.229
18. Hong J., Shen G., Li Z., Zhang B., Zhang W. Barriers to promoting prefabricated construction in China: A cost-benefit analysis // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 172. Pp. 649–660. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.171
19. Goh M., Goh Y. Lean production theory-based simulation of modular construction processes // Automation in Construction. 2019. Vol. 101. Pp. 227–244. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2018.12.017
20. Liew J., Richard Y. Innovation in modular building construction // 9th International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS 2018). 2018. DOI: 10.18057/ICASS2018.K.05
21. Grosskopf K., Elliott J., Killingsworth J. Offsite construction — U.S. market trends in pre-fabrication // Challenges for Technology Innovation: An Agenda for the Future. 2017. Pp. 393–397. DOI: 10.1201/9781315198101-69
22. Jaillon L., Poon C. Sustainable construction aspects of using prefabrication in dense urban environment: A Hong Kong case study // Construction Management and Economics. 2008. Vol. 26. Issue 9. Pp. 953–966. DOI: 10.1080/01446190802259043
23. Chippagiri R., Gavali H., Ralegaonkar R., Riley M., Shaw A., Bras A. Application of sustainable prefabricated wall technology for energy efficient social housing // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 3. P. 1195. DOI: 10.3390/su13031195
24. Wang S., Zhang H., Wang C., Wu Y. Cost Analysis between Prefabricated Buildings and Traditional Buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 768. Issue 5. P. 052090. DOI: 10.1088/1757-899X/768/5/052090
25. Mao C., Xie F., Hou L., Wu P., Wang J., Wang X. Cost analysis for sustainable off-site construction based on a multiple-case study in China // Habitat International. 2016. Vol. 57. Pp. 215–222. DOI: 10.1016/j.habitatint.2016.08.002
26. Pan W., Sidwell R. Demystifying the cost barriers to offsite construction in the UK // Construction Management and Economics. 2011. Vol. 29. Issue 11. Pp. 1081–1099. DOI: 10.1080/01446193.2011.637938
27. Li Z., Shen G., Xue X. Critical review of the research on the management of prefabricated construction // Habitat International. 2014. Vol. 43. Pp. 240–249. DOI: 10.1016/j.habitatint.2014.04.001
28. Tam V., Fung I., Sing M., Ogunlana S. Best practice of prefabrication implementation in the Hong Kong public and private sectors // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 109. Pp. 216–231. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.045
29. Nadim W., Goulding J. Offsite production in the UK: the way forward? A UK construction industry perspective // Construction Innovation. 2010. Vol. 10. Issue 2. Pp. 181–202. DOI: 10.1108/14714171011037183
30. Zhai X., Reed R., Mills A. Factors impeding the offsite production of housing construction in China: an investigation of current practice // Construction Management and Economics. 2014. Vol. 32. Issue 1–2. Pp. 40–52. DOI: 10.1080/01446193.2013.787491
31. Коршунова А.П., Муштаева Н.Е., Николаев В.А., Сенаторов Н.Я., Стрункин Н.П., Фомин Г.Н. Технология строительного производства и охрана труда. М. : Архитектура-С, 2007. 376 с.
32. Ефименко А.З. Развитие и выявление резервов мощности предприятий стройиндустрии. М. : МГСУ, 2012. 198 с.

Поступила в редакцию 17 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 24 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 24 ноября 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Виталий Юрьевич Гуринович** — заведующий отделом научно-технической информации и маркетинга; **Филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт» (Филиал БНТУ НИПИ)**; 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65; РИНЦ ID: 1022649, ResearcherID: F-6856-2019, ORCID: 0000-0001-8773-6149; Gurinovich@bntu.by;

Сергей Николаевич Леонович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов и технологии строительства; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65; РИНЦ ID: 367165, Scopus: 44661420200, ResearcherID: D-8864-2018, ORCID: 0000-0002-4026-820X; Sleonovich@mail.ru;

Дмитрий Александрович Поздняков — заместитель директора — главный инженер; **Институт жилища — НИПТИС им. Атаева С.С.**; 220076, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Ф. Скорины, д. 15; ResearcherID: FTQ-3992-2022, ORCID: 0000-0003-1247-5655; pozddzm@tut.by.

Вклад авторов:

Гуринович В.Ю. — идея, планирование исследований, сбор материала, обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Леонович С.Н. — научное руководство и редактирование текста.

Поздняков Д.А. — сбор и анализ материалов, обработка материалов, оформление текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Liu W., Zhang H., Wang Q., Hua T., Xue H. A Review and scientometric analysis of global research on prefabricated buildings. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 2021:1-18. DOI: 10.1155/2021/8869315
2. Azman M.N.A., Ahamad M.S.S., Wan Husin W.M.A. Comparative study on prefabrication construction process. *International Surveying Research Journal*. 2012; 2(1):45-58.
3. Hosseini M.R., Martek I., Zavadskas E.K., Aibinu A.A., Arashpour M., Chileshe N. Critical evaluation of off-site construction research: A scientometric analysis. *Automation in Construction*. 2018; 87:235-247. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.002
4. Wuni I.Y., Shen G.Q. Critical success factors for modular integrated construction projects: a review. *Building Research & Information*. 2020; 48(7):763-784. DOI: 10.1080/09613218.2019.1669009
5. Razkenari M., Fenner A., Shojaei A., Hakim H., Kibert C. Perceptions of offsite construction in the United States: An investigation of current practices. *Journal of Building Engineering*. 2020; 29:101138. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101138
6. Hussein M., Eltoukhy A.E.E., Karam A., Shaban I.A., Zayed T. Modelling in off-site construction supply chain management: A review and future directions for sustainable modular integrated construction. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 310:127503. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127503
7. Gurinovich V.Yu. The comparative study of the development on prefabricated construction. *Science and Technique*. 2022; 21(5):397-409. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-5-397-409 (rus.).
8. Polat G. Precast concrete systems in developing vs. industrialized countries. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2010; 16(1):85-94. DOI: 10.3846/jcem.2010.08
9. Alinaitwe H.M., Mwakali J., Hansson B. Assessing the degree of industrialisation in construction — a case of Uganda. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2006; 12(3):221-229. DOI: 10.3846/13923730.2006.9636396
10. Ay I., Ayalp G.G. Prefabrike Yapıların Tasarım, Üretim, Depolama, Nakliye Ve Yapım Süreçlerini Etkileyen Kriterler. *Teknik Dergi*. 2021; 32(3):10907-10917. DOI: 10.18400/tekderg.647272
11. Wang Z., Hu H., Gong J. Framework for modeling operational uncertainty to optimize offsite production scheduling of precast components. *Automation in Construction*. 2018; 86:69-80. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.026
12. Akoyev M.A., Markusova V.A., Moskaleva O.V., Pislyakov V.V. *Guide to Scientometry: indicators of the development of science and technology*. Ekaterinburg, Ural University Press, 2014; 249. (rus.).
13. Cao X., Li X., Zhu Y., Zhang Z. A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China. *Journal of Cleaner Production*. 2015; 109:131-143. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.120
14. Kim T., Kim Y.W., Cho H. Dynamic production scheduling model under due date uncertainty in precast concrete construction. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 257:120527. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120527.
15. Yuan Z., Qiao Y., Guo Y., Wang Y., Chen C., Wang W. Research on lean planning and optimization for precast component production based on discrete event simulation. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020: 1-14. DOI: 10.1155/2020/8814914
16. Chang Y., Li X., Masanet E., Zhang L., Huang Z., Ries R. Unlocking the green opportunity for prefabricated buildings and construction in China.

- Resources, Conservation and Recycling*. 2018; 139: 259-261. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.08.025
17. Wang Z., Hu H., Gong J., Ma X., Xiong W. Precast supply chain management in off-site construction: a critical literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 232:1204-1217. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.229
18. Hong J., Shen G., Li Z., Zhang B., Zhang W. Barriers to promoting prefabricated construction in China: a cost-benefit analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 172:649-660. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.171
19. Goh M., Goh Y. Lean production theory-based simulation of modular construction processes. *Automation in Construction*. 2019; 101:227-244. DOI: 10.1016/J.AUTCON.2018.12.017
20. Liew J., Richard Y. Innovation in modular building construction. *9th International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS 2018)*. 2018. DOI: 10.18057/ICASS2018.K.05
21. Grosskopf K., Elliott J., Killingsworth J. Offsite construction — U.S. market trends in prefabrication. *Challenges for Technology Innovation: An Agenda for the Future*. 2017; 393-397. DOI: 10.1201/9781315198101-69
22. Jaillon L., Poon C. Sustainable construction aspects of using prefabrication in dense urban environment: A Hong Kong case study. *Construction Management and Economics*. 2008; 26(9):953-966. DOI: 10.1080/01446190802259043
23. Chippagiri R., Gavali H., Ralegaonkar R., Riley M., Shaw A., Bras A. Application of sustainable prefabricated wall technology for energy efficient social housing. *Sustainability*. 2021; 13(3):1195. DOI: 10.3390/su13031195
24. Wang S., Zhang H., Wang C., Wu Y. Cost analysis between prefabricated buildings and traditional buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 768(5):052090. DOI: 10.1088/1757-899X/768/5/052090
25. Mao C., Xie F., Hou L., Wu P., Wang J., Wang X. Cost analysis for sustainable off-site construction based on a multiple-case study in China. *Habitat International*. 2016; 57:215-222. DOI: 10.1016/j.habitatint.2016.08.002
26. Pan W., Sidwell R. Demystifying the cost barriers to offsite construction in the UK. *Construction Management and Economics*. 2011; 29(11):1081-1099. DOI: 10.1080/01446193.2011.637938
27. Li Z., Shen G., Xue X. Critical review of the research on the management of prefabricated construction. *Habitat International*. 2014; 43:240-249. DOI: 10.1016/j.habitatint.2014.04.001
28. Tam V., Fung I., Sing M., Ogunlana S. Best practice of prefabrication implementation in the Hong Kong public and private sectors. *Journal of Cleaner Production*. 2015; 109:216-231. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.045
29. Nadim W., Goulding J. Offsite production in the UK: the way forward? A UK construction industry perspective. *Construction Innovation*. 2010; 10(2): 181-202. DOI: 10.1108/14714171011037183
30. Zhai X., Reed R., Mills A. Factors impeding the offsite production of housing construction in China: an investigation of current practice. *Construction Management and Economics*. 2014; 32(1-2):40-52. DOI: 10.1080/01446193.2013.787491
31. Korshunova A.P., Mushtayeva N.E., Nikolayev V.A., Senatorov N.YA., Strunkin N.P., Fomin G.N. *Insurance Policy Construction and Interpretation*. Moscow, Architecture-C, 2007; 376. (rus.).
32. Yefimenko A.Z. *Development and identification of reserves of capacity of enterprises in the building industry*. Moscow, MGSU, 2012; 198. (rus.).

Received October 17, 2022.

Adopted in revised form on November 24, 2022.

Approved for publication on November 24, 2022.

B I O N O T E S : **Vitaliy Yu. Gurinovich** — Head of the Department of Scientific and Technical Information and Marketing; **Branch of the Belarusian National Technical University “Research Polytechnic Institute” (Branch of the BNTU RPI)**; 65 prospekt Nezavisimosti, Minsk, 220013, Republic of Belarus; ID RISC: 1022649, ResearcherID: F-6856-2019, ORCID: 0000-0001-8773-6149; Gurinovich@bntu.by;

Sergey N. Leonovich — Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Construction Materials and Construction Technology; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 prospekt Nezavisimosti, Minsk, 220013, Republic of Belarus; ID RISC: 367165, Scopus: 44661420200, ResearcherID: D-8864-2018, ORCID: 0000-0002-4026-820X; Sleonovich@mail.ru;

Dmitriy A. Pozdnyakov — Deputy Director — Chief Engineer; **Institute of housing — NIPTIS named after Atayev S.S.**; 15 F. Skorina st., Minsk, 220076, Republic of Belarus; ResearcherID: FTQ-3992-2022, ORCID: 0000-0003-1247-5655; Pozddzm@tut.by.

Contribution of the authors:

Vitaliy Yu. Gurinovich — conceptualization, research planning, data gathering and processing, writing of the article, conclusions.

Sergey N. Leonovich — scientific editing of the text, supervision.

Dmitriy A. Pozdnyakov — data gathering and analyzing materials, processing of materials, text layout.

The authors declare no conflict of interest.

Исследование потенциального спроса на некоммерческий найм жилья

Анастасия Игоревна Магина, Марина Юрьевна Мишланова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующие рыночные, регуляторные, организационно-экономические механизмы не справляются с актуальными задачами в жилищной сфере России. Недоступность покупки жилья и ипотечного кредитования для значительной части населения приводит к необходимости искать иные формы решения жилищной проблемы, в частности реализовать данную потребность путем найма жилья. Исследование посвящено одной из социально-экономических задач национального развития — формированию цивилизованного рынка некоммерческого найма жилья.

Материалы и методы. Метод социологического опроса студентов, обучающихся в Москве, позволил получить мнение людей, которые в будущем останутся работать в этом регионе. Для определения параметров социологического опроса применялись основные принципы метода квотной выборки с взаимосвязанными параметрами. При обработке полученной информации использовались известные методы выбраковки результатов опроса, анализ линейных распределений, корреляционный анализ. С целью визуализации результатов использованы таблицы, круговые диаграммы и гистограммы, которые дают возможность выполнить сравнительный анализ.

Результаты. Для социологического опроса разработана программа исследования. Изучен ранжированный список потребителей рынка найма жилой недвижимости. Представлена оценка сегментов социального и некоммерческого найма жилья и перспектив их развития. Среди потребителей обоснованно выделены молодые специалисты, дана характеристика данной группы с позиций потенциального спроса на рынке некоммерческого найма жилья. Идентифицирована социально-экономическая проблема и определено направление исследования — рассмотрение будущих выпускников вузов в качестве потенциальных потребителей наемного жилья. Проведенное исследование позволило выявить направления формирования цивилизованного рынка найма жилья, в частности перспективы государственного регулирования.

Выводы. Определено наличие и варианты реализации будущими выпускниками потребности в жилье, исследованы характеристики потенциального спроса будущих выпускников на некоммерческий найм жилья. Обобщение полученных результатов дало возможность установить ключевые направления развития рынка некоммерческого найма жилья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: найм жилой недвижимости, потребность в найме жилья, некоммерческий найм жилья, молодые специалисты, социологический опрос, регулирование рынка найма жилой недвижимости

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Магина А.И., Мишланова М.Ю. Исследование потенциального спроса на некоммерческий найм жилья // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1732–1746. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1732-1746

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Игоревна Магина, coldrain96@mail.ru.

Research on the potential demand for non-commercial rental housing

Anastasia I. Magina, Marina Yu. Mishlanova

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

ABSTRACT

Introduction. Existing market, regulatory, organizational and economic mechanisms do not cope with the urgent tasks in the housing sphere of Russia. Inaccessibility of housing purchase and mortgage lending for a large part of the population leads to the need to seek other forms of solving the housing problem, in particular, to realize this need by renting housing. The article is devoted to one of the socio-economic objectives of national development — the formation of a civilized market of non-commercial rental housing.

Materials and methods. The method of sociological survey used for students studying in Moscow allowed us to obtain the opinion of people who will stay to work in this region in the future. To determine the parameters of the sociological survey, the study used the basic principles of the quota sampling method with interrelated parameters. When processing the obtained information, the well-known methods of culling the results of the survey, the analysis of linear distributions, correlation analysis were used. Tables, pie charts and histograms were used to visualize the results of the obtained data, which allow making a comparative analysis.

Results. In order to conduct a sociological survey, the research program presented in the article was developed. The authors studied the ranked list of consumers of the residential real estate rental market. The assessment of the segments of social

and non-commercial rental housing and the prospects for their development is presented. Among the consumers the authors have reasonably singled out young professionals and characterized this group from the position of potential demand on the market of non-commercial rental housing. The authors identified the socio-economic problem and determined the direction of the study — the consideration of future university graduates as potential consumers of rental housing. In addition, the study allowed the authors to identify the directions of formation of a civilized housing rental market, in particular, the prospects of state regulation.

Conclusions. As a result of the study the availability and options for future graduates to realize the need for housing, the characteristics of the potential demand of future graduates for non-profit housing rental were investigated. The generalization of the results allowed the authors to identify the main directions of development of the market of non-commercial rental housing.

KEYWORDS: residential real estate rental, the need for rental housing, non-profit rental housing, young professionals, sociological survey, regulation of the residential real estate rental market

FOR CITATION: Magina A.I., Mishlanova M.Yu. Research on the potential demand for non-commercial rental housing. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(12):1732-1746. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1732-1746 (rus.).

Corresponding author: Anastasia I. Magina, coldrain96@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из социально-экономических задач национального развития — создание условий для роста предложений на рынке жилья, соответствующего потребностям различных групп населения, и повышения доступности жилья для всех категорий граждан Российской Федерации¹. Однако существующие рыночные, регуляторные, организационно-экономические механизмы не справляются с актуальными задачами в жилищной сфере России. Недоступность покупки жилья и ипотечного кредитования для значительной части населения приводит к необходимости искать иные формы решения жилищной проблемы, в частности реализовать данную потребность путем найма жилья.

Примерно 10 млн россиян или 9 % от всего населения нанимают жилье², по разным экспертным оценкам общий рынок наемного жилья составляет до 30 % жилищного фонда страны [1, 2]. Порядка 9,8 % жилищного фонда, находящегося в государственной и муниципальной собственности, используется в форме социального найма [3]. По нашим приблизительным оценкам, около 3 % населения страны являются потребителями рынка социального найма жилья. Согласно мировой практике, для комфортного проживания доход человека или общий доход семьи должен быть в два раза выше, чем плата за жилье или найм жилья [4–19]. Поэтому наибольшая доля российских потребителей готова рас-

сматривать бюджетные варианты с невысокой стоимостью найма, меньшая часть — жилье бизнес- и элит-класса. Гармоничное развитие всех рыночных сегментов как отражение микроэкономического равновесия «спрос – предложение» предполагает цивилизацию рынка наемного жилья с регулирующей ролью государства.

Особую значимость государственное регулирование имеет в отношении сегмента некоммерческого найма — формирования организационно-экономических отношений между государством или собственником дома специального использования и гражданином, который по закону соответствует критериям нуждающегося в улучшении жилищных условий, с возможностью оплаты за найм в размере, не превышающем ограничения, установленные органами государственной власти субъектов РФ. К целевой аудитории по некоммерческому найму жилья можно отнести граждан с уровнем дохода выше, чем у малоимущих, но в то же время не имеющих возможности решить свои жилищные проблемы за счет собственных или заемных средств на рыночных условиях.

Авторы статьи выдвигают гипотезу о многосторонних перспективах развития рыночного сегмента некоммерческого найма жилья и ожидаемых синергетических эффектах:

- удовлетворение потребностей и развитие определенной экономически активной и перспективной группы населения;
- наиболее эффективное распределение и использование трудовых ресурсов;
- рациональное территориальное управление;
- легализация рыночных взаимоотношений;
- увеличение налоговых поступлений и др.

Для целей настоящего исследования рассмотрим ранжированный в первом приближении состав генеральной совокупности потребителей услуг всех видов найма жилой недвижимости:

- трудовые мигранты из ближнего зарубежья;
- приезжие на заработки из других регионов РФ;
- молодые специалисты;
- иногородние студенты;

¹ О Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года (вместе с «Концепцией долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года»: Распоряжение Правительства РФ от 17.11.2008 № 1662-р (ред. от 28.09.2018)). П. 7. Повышение доступности жилья. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/50ec8a398adbe732eea59ba9ccde81e999673c6f/

² 10 миллионов россиян арендуют жилье // Аналитический центр НАФИ. 2019. URL: <https://nafi.ru/analytics/10-millionov-rossiyan-zhivut-v-semnom-zhile/>

- молодые семьи, отделяющиеся от родителей;
- приезжие из дальнего зарубежья;
- командировочные, отпускники, туристы;
- семьи, переезжающие временно ближе к работе, родственникам и др.;
- семьи, сдающие свою большую квартиру;
- люди, принципиально не желающие покупать квартиру.

Молодежь традиционно нанимает жилье в два раза чаще, чем остальные наниматели: люди в возрасте до 25 лет — 41 %, до 35 лет — 21 %. По данным реализации АО «ДОМ.РФ» пилотных проектов строительства жилья коммерческого найма за первое полугодие 2021 г. основная группа потребителей — молодые люди в возрасте до 35 лет³. Именно молодежь имеет острую потребность в жилье для дальнейшего развития, мобильна, не консервативна, не владеет накоплениями и готова принимать арендный образ жизни. Востребован найм жилья у выпускников вузов — молодых специалистов, которые проявляют особенную активность и заинтересованность в получении жилья, как одном из базовых условий начала трудовой деятельности.

Понятие «молодой специалист» закреплено в ст. 2 Федерального закона от 30.12.2020 № 489-ФЗ «О молодежной политике в Российской Федерации»: «молодой специалист — гражданин Российской Федерации в возрасте до 35 лет включительно (за исключением случаев, предусмотренных частью 3 статьи 6 настоящего Федерального закона), завершивший обучение по основным профессиональным образовательным программам и (или) по программам профессионального обучения, впервые устраивающийся на работу в соответствии с полученной квалификацией»⁴. Также понятие «молодой специалист» косвенно затрагивается в ст. 70 Трудового кодекса РФ⁵. В региональном законодательстве статус молодого специалиста прописывается вместе с пакетами льгот в зависимости от потребности в определенных профессиях. Статус действует в течение трех лет с момента заключения трудового договора и применяется к лицам до 35, иногда до 30 лет.

Молодые специалисты являются специфической группой трудовых ресурсов страны, которая характеризуется проблемами с трудоустройством, отсут-

ствием собственного жилья и резервных накоплений, невысокой заработной платой, проблемами трудовой социализации и др. Наряду с этим молодые специалисты — мобильная и динамично развивающаяся часть общества, нацеленная на самореализацию, освоение новых территорий и технологий. Именно молодые специалисты — образованная и амбициозная молодежь — становятся акторами дальнейшего развития российского государства. В связи с этим возникает объективная потребность в создании условий для благоприятного входа молодых специалистов в самостоятельную трудовую жизнь.

Таким образом, может быть идентифицирована социально-экономическая проблема и определено направление исследования — рассмотрение будущих выпускников вузов в качестве потенциальных потребителей наемного жилья. Данная группа потребителей выбрана в качестве приоритетной в результате оценки имеющейся информации, качественного анализа портрета потребителя и ранжирования потребителей рынка найма жилой недвижимости.

В программе исследования обоснован выбор группы респондентов — сегодняшних студентов, которые в будущем станут молодыми специалистами и в настоящем и будущем статусах обладают неким единством, идентичностью характеристик:

- однозначное сходное социальное положение;
- определенный квалификационный уровень;
- отсутствие или небольшой стаж работы;
- начальный этап развития карьеры;
- сходные характеристики базовых потребностей;
- определенная нацеленность на поставленные жизненные задачи;
- социальная мобильность и низкая степень консервативности;
- отсутствие личных накоплений и личного имущества.

Данный факт общности является обоснованием характеристической однородности выбранной группы респондентов, т.е. одним из аргументированных параметров программы социологического опроса.

Следующим программным параметром был обоснован регион исследования. По данным НИУ ВШЭ выделена группа регионов высокой востребованности среди выпускников школ (больше 1,1) и при этом относительно низкого показателя послевузовской миграции (меньше 0,305). В эту группу вошли регионы с развитой образовательной инфраструктурой и развитой экономикой, способные предоставить конкурентоспособные рабочие места выпускникам: г. Санкт-Петербург с Ленинградской областью, г. Москва с Московской областью, Новосибирская область и ряд других областей [20]. Выпускники вузов крупных регионов часто остаются жить и работать в регионах обучения, где больше предложений на рынке труда и возможностей самореализации.

³ Отношение молодежи к жилью // Социологическое исследование ВЦИОМ и ДОМ.РФ. 2020. URL: <https://дом.рф/upload/iblock/70f/70f4cc52dc2299fda39b7fa463608582.pdf>

⁴ О молодежной политике в Российской Федерации : Федеральный закон от 30.12.2020 № 489-ФЗ. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012300003>

⁵ Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 07.10.2022). Ст. 70. Испытание при приеме на работу. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/cc065f088bd92d312b5fae714377b25f557ac44a/

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Социологический опрос студентов, обучающихся в Москве, позволит получить мнение людей, которые в будущем останутся работать в этом регионе.

Гипотетически предполагалось проводить исследования в одном учебном заведении, что в первом приближении обеспечит отражение совокупности обучающихся других московских вузов по основным критериям. Авторами проанализирован список столичных вузов на предмет выбора учебного заведения для проведения социологического опроса. Несмотря на большую многопрофильность московских вузов, тенденции поведенческой структуры будущих выпускников и их проектирование жизненной программы на определенном этапе жизни будут идентичными. Прогнозный портрет потребителя и характеристика общности потребителей позволяют выбрать площадку НИУ МГСУ, как среднестатистического вуза, исключая учебные учреждения специфического высшего образования.

В программе проведения данных исследований количество опрашиваемых обосновано следующими аргументами. По данным Министерства науки и высшего образования РФ на начало 2021/2022 учебного года в вузах Московского региона проходило обучение в общей сложности 835 633 студентов разного возраста, из них — 400 557 (47,9 %) мужчин и 435 076 (52,1 %) женщин. Большинство из них — 540 110 (64,6 %) выбрали очную форму обучения⁶. Таким образом, численность генеральной совокупности

в нашем случае превышает 100 000 человек. Исходя из известных методик, обобщенных авторами, определен необходимый минимум — 384 респондента при доверительной вероятности 95 % и доверительном интервале ± 5 %. Было принято предположение, что плановое численное значение опрашиваемых должно превышать 384 респондента с сохранением структуры генеральной совокупности и с учетом возможной выбраковки результатов опроса.

Целью исследования стало выявление потребности и потенциального спроса будущих выпускников в найме жилья. Объект исследования — студенты НИУ МГСУ. Предмет исследования — потребность будущих выпускников в жилье, в том числе в найме жилья. Территория исследования — Московский регион (г. Москва и Московская область). Метод исследования — социологический опрос.

Задачи исследования:

- определение наличия и варианта реализации будущими выпускниками потребности в жилье;
- исследование характеристик потенциального спроса будущих выпускников в найме жилья;
- выявление осведомленности будущих выпускников о некоммерческом найме.

Для установления параметров социологического опроса в исследовании использованы основные положения метода квотной выборки с взаимосвязанными параметрами. Эта выборка должна репрезентативно отражать генеральную совокупность исследуемых потребителей по обоснованным программным параметрам (табл. 1).

Табл. 1. Количественно-качественная характеристика программных параметров социологического опроса

Table 1. Quantitative and qualitative characteristics of the program parameters of the sociological survey

Программный параметр Program parameter	Параметрическая характеристика и обоснование Parametric characterization and justification
Респонденты Respondents	<p>Студенты НИУ МГСУ бакалавриата, магистратуры, специалитета различных направлений и профилей, очной формы обучения, бюджетной, коммерческой или целевой основы обучения.</p> <p>На предварительном этапе планирования исследований определена целевая группа студентов — потенциальных выпускников 2022–2026 годов выпуска. Данная группа потребителей выбрана в качестве приоритетной в результате оценки имеющихся данных, качественного анализа портрета потребителей и ранжирования потребителей рынка найма жилой недвижимости</p> <p>Students of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) undergraduate, graduate, and specialist degrees in various fields and profiles, full-time, budgetary, commercial, or targeted basis of study.</p> <p>At the preliminary stage of research planning the target group of students — potential graduates of 2022–2026 was determined. This group of consumers was selected as a priority group as a result of the assessment of available data, qualitative analysis of the consumer portrait and ranking of consumers in the residential real estate rental market</p>

⁶ Форма N ВПО-1 «Сведения об организации, осуществляющей образовательную деятельность по образовательным программам высшего образования — программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры» // Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. 2021. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/action/stat/highed/>

Программный параметр Program parameter	Параметрическая характеристика и обоснование Parametric characterization and justification
Регион Region	<p>Москва и Московская область. Выпускники вузов крупных регионов часто остаются жить и работать в регионах обучения, где больше предложений на рынке труда и возможностей самореализации. Социологический опрос студентов, обучающихся в Москве, позволит получить мнение людей, которые в будущем останутся работать в этом регионе</p> <p>Moscow and the Moscow region. Graduates of universities in large regions often stay to live and work in the regions where there are more offers in the labor market and opportunities for self-realization. A sociological survey of students studying in Moscow will provide the opinion of people who in the future will stay to work in this region</p>
Вуз University	<p>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Несмотря на большую многопрофильность вузов, тенденции поведенческой структуры будущих выпускников и их жизненной программы на определенном этапе жизни будут идентичными. Прогнозный портрет потребителя и характеристика общности потребителей позволяет выбрать площадку НИУ МГСУ, как среднестатистического вуза</p> <p>Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). In spite of the great versatility of universities, the trends of behavioral structure of future graduates and their life program at a certain stage of life will be identical. The predictive portrait of the consumer and the characteristic of the commonality of consumers allows choosing the site of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) as an average higher education institution</p>
Выборка Sample population	<p>Плановое количество опрашиваемых должно превышать минимальную численность респондентов (384 человека) с сохранением структуры генеральной совокупности и с учетом возможной выбраковки результатов опроса. Численность генеральной совокупности в нашем случае превышает 100 000 человек. Исходя из известных методик, необходимо опросить минимум 384 респондента при доверительной вероятности 95 % и доверительном интервале $\pm 5\%$</p> <p>The planned number of interviewees should exceed the minimum number of respondents (384 people) while maintaining the structure of the general population and taking into account the possible culling of the survey results. The number of general population in our case exceeds 100 000 people. Based on known methods, it is necessary to interview at least 384 respondents at 95 % confidence level and $\pm 5\%$ confidence interval</p>

Для достижения цели исследования разработана детализированная программа проведения исследования и специальная форма анкеты. Анкета состоит из вводной части, опросного листа и реквизитной части. Вводная часть направлена на мотивацию заполнения анкеты и включает: обращение к респондентам, описание цели опроса, гарантии анонимности и безопасности данных. Основная часть анкеты состоит из вопросов разной формы и сложности. Всего в анкете 23 вопроса: 17 вопросов закрытого типа и 6 вопросов полужакрытого типа. В вопросах закрытого типа предложено к выбору несколько фиксированных вариантов ответов, где респондентам необходимо отметить наиболее близкие к их мнению варианты. Часть закрытых вопросов — дихотомические, в них предложены на выбор только два варианта ответа: да или нет. Для распределения результатов

ответов по степени их важности использован один вопрос с возможностью ранжирования. Полузакрытая форма шести вопросов предполагает наряду с готовыми вариантами ответов изложить и вписать свой вариант ответа. Реквизитная часть размещена в конце опросника и включает такие данные, как пол, возраст, место жительства и др.

Списочный подбор вопросов и ответов позволил обработать информацию статистическими методами с помощью программного обеспечения и повысить стандартизацию полученных сведений. Данное исследование проводилось в период с 27 декабря 2021 г. по 4 марта 2022 г. Анкета была размещена с помощью ресурса Google Forms и распространена через URL-ссылку среди участников исследования. Ссылка на анкету направлялась обучающимся с просьбой пройти тестирование путем самостоятельного запол-

нения ответов. При обработке полученной информации применялись известные методы выбраковки результатов опроса, анализ линейных распределений, корреляционный анализ. Для визуализации результатов использованы таблицы, круговые диаграммы и гистограммы, которые дают возможность сравнить ответы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В опросе приняли участие 409 респондентов — студентов НИУ МГСУ в возрасте от 20 до 24 лет. Все анкеты прошли предварительную проверку на полноту и точность заполнения. Чтобы не исказить полученную информацию, 12 анкет, не соответствующих указанным первичным требованиям, исключены из списка основного массива. В результате выбраковки осталось и подвергнуто дальней-

шему анализу 397 заполненных анкет. Эта выборка составляет 0,05 % от количества всех студентов региона на начало 2021/2022 учебного года и 0,07 % от студентов региона, которые обучаются по очной форме. Среди опрошенных сохранены гендерные соотношения: мужчин — 47,9 % (190 чел.) и женщин — 52,1 % (207 чел.).

Почти $\frac{3}{4}$ опрошенных студентов постоянно проживают в Москве и Московской области — 73,6 % (292 чел.), остальную часть составляют приезжие, которые имеют временную регистрацию в Московском регионе на период обучения — 26,4 % (105 чел.). Больше половины студентов учатся на бюджетной основе — 55,9 % (222 чел.), по целевому направлению — 1,5 % (6 чел.), платят за обучение — 42,6 % (169 чел.). Структура респондентов представлена в табл. 2 по году окончания обучения в вузе.

Табл. 2. Информация о структуре выборки по годам окончания обучения студентов в вузе

Table 2. Information about the structure of the sample by year of graduation

Год окончания обучения в вузе Year of graduation	Количество респондентов Number of respondents	Процент от общего количества респондентов Percentage of the total number of respondents
2022	58	14,6
2023	226	56,9
2024	50	12,6
2025	57	14,4
2026	6	1,5
Итого	397	100

Все респонденты, принявшие участие в опросе, являются студентами очной формы обучения. Многие из опрошенных студентов — 58,2 % (231 чел.) после окончания вуза рассчитывают продолжить обучение, совмещая его с работой. 35,8 % (142 чел.) из участвующих в опросе после получения диплома намерены только работать, дальнейшее обучение в их планы не входит. Не строят свои планы на будущее только 3,5 % (14 чел.) респондентов. Еще 2,5 % (10 чел.) опрошенных после окончания обучения в вузе планируют полностью посвятить свое время дальнейшему образованию.

88,7 % (352 чел.) опрошенных выразили желание остаться в Московском регионе после получения образования. Не определились с местом жительства после окончания обучения 2,1 % (8 чел.) респондентов. Немногие решили вернуться после обучения на родину или проживать в другом регионе — 0,6 % (3 чел.) из опрошенных. Предполагают жить за рубежом после получения образования 8,6 % (34 чел.) из числа опрошенных.

Ответы на вопрос «Будете ли вы нуждаться в жилье после окончания обучения в вузе» распределены по четырем сегментам (табл. 3).

Табл. 3. Потребность будущего выпускника в жилье

Table 3. Future graduate's need for housing

Количество ответов Number of responses	Характеристика сегмента Characteristics of the segment
36,0 % (143 респондента) (143 respondents)	«Да, это будет для меня серьезной проблемой». Самый большой сектор занимают ответы респондентов, которые считают жилищный вопрос для себя серьезной проблемой. У этой группы опрошенных существует базовая потребность в жилье “Yes, it would be a serious problem for me”. The largest sector is occupied by the answers of respondents who consider the housing issue to be a serious problem for themselves. This group of respondents has a basic need for housing

Количество ответов Number of responses	Характеристика сегмента Characteristics of the segment
26,5 % (105 респондентов) (105 respondents)	«Жилищной проблемы у меня нет». Ответы респондентов «жилищной проблемы у меня нет» занимают немалый по величине сектор. Данные респонденты не будут отнесены в прогнозную группу потребителей “I do not have a housing problem”. The answers of respondents “I do not have a housing problem” occupy a large sector. These respondents will not be included in the predictive group of consumers
21,4 % (85 респондентов) (85 respondents)	«Эту проблему я буду решать в перспективе, но не сразу после окончания обучения в вузе». Приобрести собственное жилье в течение одного года после окончания обучения в вузе смогут 4,1 % ответивших, в срок от года до трех лет — 17,1 %. Остальные указывают более длительные периоды, необходимые для приобретения жилой недвижимости: от трех до пяти лет — 29,5 %, от пяти и более лет — 49,3 %. Все респонденты данного сектора нуждаются в жилье, и авторы исследования предполагают, что они будут пополнять ряды потенциальных потребителей найма жилья “I will solve this problem in the future, but not immediately after graduation”. To acquire their own housing within one year after graduation will be able to 4.1 % of the respondents, within a year to three years — 17.1 %. Others indicate a longer period necessary to acquire housing: from three to five years — 29.5 %, from five or more years — 49.3 %. All respondents in this sector need housing, and the authors of the study suggest that they will join the ranks of potential consumers of rental housing
16,1 % (64 респондента) (64 respondents)	«Скорее да, чем нет». Респонденты из этого сектора полагают, что, вероятнее всего, после окончания обучения, они будут нуждаться в жилье, но сейчас не задумываются об этом. Будем считать, что не все респонденты, выбравшие этот ответ, имеют отдельное от родителей собственное жилье. Поэтому переход к новому этапу зрелости актуализирует жилищный вопрос и для этой группы респондентов. Предположительно, что у половины ответивших на этот вопрос возникнет потребность в жилье “More likely yes than no”. Respondents from this sector believe that most likely after graduation they will need housing, but do not think about it now. We will assume that not all respondents who chose this answer have their own housing separate from their parents. Therefore, the transition to a new stage of maturity actualizes the housing issue for this group of respondents as well. Presumably, half of the respondents to this question will have a need for housing

Несмотря на то что ответы респондентов «жилищной проблемы у меня нет» занимают немалый по величине сегмент (26,5 %), у более многочисленной части будущих выпускников будет иметь место потребность в жилье (65,5 %). Возможности приобретения жилья определяются имеющимися личными накоплениями, текущими доходами и платежеспособностью населения. Анализ полученных данных показал, что лишь малое количество респондентов — 3,8 % (15 чел.) имеют сбережения для покупки собственного жилья. Более половины прошедших опрос — 55,1 % (219 чел.) отмечают, что сразу после окончания обучения в вузе у них не будет возможности для приобретения жилья. Еще 29,5 % (117 чел.) опрошенных смогут приобрести жилье, если воспользуются ипотекой, а 11,6 % (46 чел.), если им окажут помощь родители или родственники (рис. 1).

Так же респондентам было предложено выбрать варианты получения жилья, которые будут для них яв-

ляться возможными после окончания обучения в вузе (рис. 2). Больше половины — 54,2 % (215 чел.) выбрали найм жилого помещения как возможный вариант жилья после окончания обучения в вузе. 40,6 % (161 чел.) опрошенных планируют проживать в собственной квартире, 4,3 % (17 чел.) считают возможным только проживание в общежитии. Единичные ответы, вписанные респондентами по собственной инициативе, объединены в две небольшие группы: дом — 0,6 % (3 чел.), с родителями — 0,3 % (1 чел.).

Можно отметить, что при ответе на вопрос о причинах выбора в пользу найма жилья большинство респондентов указывали сразу несколько аргументов, которые в совокупности представлены в табл. 4. Респондентам предлагалось самим определить выбор нужного количества вариантов ответов или дописать собственный. Всего ответило на вопрос 397 респондентов, которые в сумме выбрали 635 ответов. Из них свой вариант ответа добавили только

3 респондента (0,8 %), что не повлияло на общие выводы. При обработке, анализе и оценке множества аргументов учитывалась информация о количественной последовательности выбора ответов.

Выбор респондентов в пользу найма жилья обусловлен отсутствием средств и других гибких альтернативных вариантов решения жилищной проблемы. Найм жилья не воспринимается как постоянное решение жилищной проблемы и зависит от множества жизненных обстоятельств нанимателей. При отсутствии привязки к определенному месту жительства найм обеспечивает дополнительные удобства: свободу перемещения, отсутствие затрат на содержание и обслуживание жилья.

Возможность выбрать несколько вариантов ответов была предоставлена респондентам и на вопрос «Что является главным минусом арендного жилья?» (табл. 5).

Полученная в результате данных исследований характеристика сегментов, приведенная в табл. 5, позволяет прогнозировать направления формирования цивилизованного рынка найма жилья. Бесспорно, что процесс выбора наемного жилья зависит сразу от нескольких критериев (рис. 3). Респондентам было предложено оценить и расположить критерии с учетом степени важности. Главным критерием для опрошенных является размер платы за наем (144 чел.). Вторым по значимости критерием респонденты считают надежность наймодателя (133 чел.). Именно этот пункт вызывает частые сомнения и тревоги в безопасности сделки при выборе наемного жилья. Все остальные критерии находятся в прямой зависимости от размера платы за наем: состояние жилого помещения (108 чел.), транспортная доступность (101 чел.), местоположение (97 чел.).

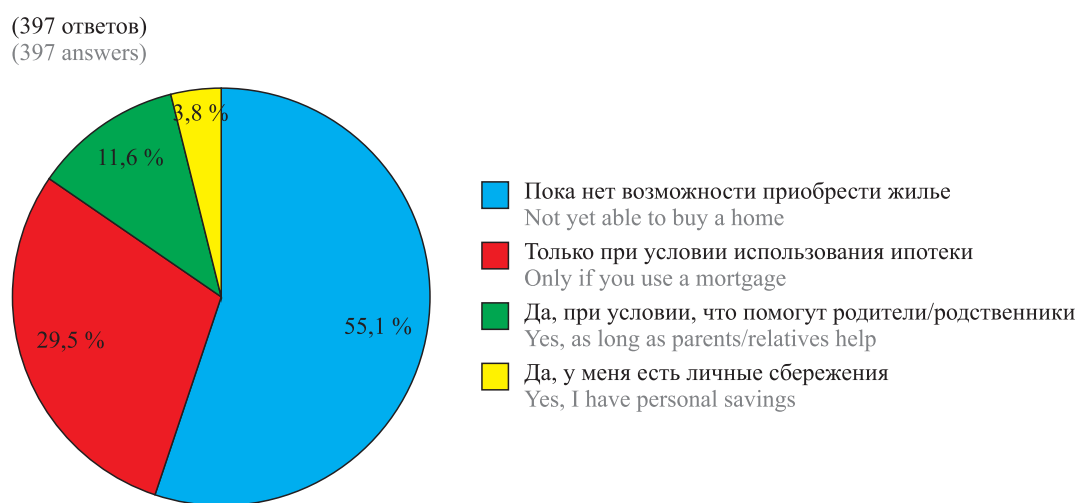


Рис. 1. Возможность приобрести жилье в собственность после окончания обучения в вузе

Fig. 1. Opportunity to own housing after graduation

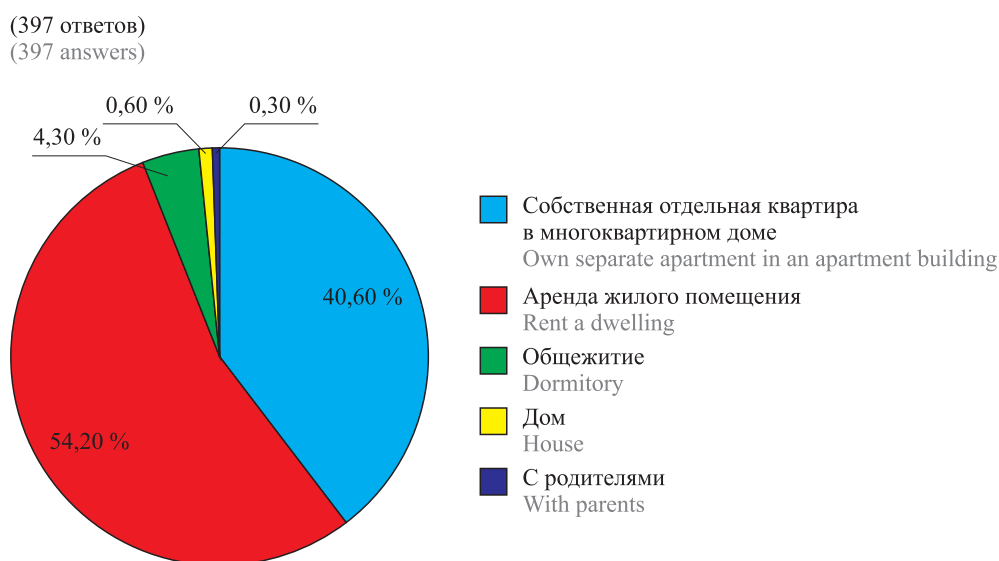


Рис. 2. Варианты возможного жилья будущих выпускников после окончания обучения в вузе

Fig. 2. Variant of possible housing for future graduates after graduation

Табл. 4. Детализированные аргументы в пользу выбора найма жилья

Table 4. Detailed arguments for choosing rental housing

Количество ответов Number of responses	Характеристика сегмента Characteristics of the segment
63,5 % (252 респондента) (252 respondents)	<p>«Имея даже хорошую работу, квартиру сразу не купишь».</p> <p>Как было определено ранее, у 96,2 % из числа опрошенных студентов нет личных накоплений на покупку собственного жилья. Ипотечные платежи требуют многолетней финансовой стабильности, которую начинающим самостоятельную жизнь молодым специалистам невозможно просчитать и спланировать. Будущие выпускники материально и психологически не готовы к высоким и долговременным тратам по ипотеке, вариант найма жилья в этом периоде для них менее рискованный и затратный</p> <p>“Even with a good job, you can’t buy an apartment right away”.</p> <p>As was determined earlier, 96.2 % of the students surveyed do not have personal savings to buy their own homes. Mortgage payments require many years of financial stability, which young professionals starting their independent life cannot calculate and plan for. Future graduates are financially and psychologically not ready for high and long-term mortgage expenses, the option of renting housing in this period is less risky and costly for them</p>
54,7 % (217 респондентов) (217 respondents)	<p>«Найм жилья нужен как временная мера решения жилищного вопроса».</p> <p>Найм жилья планируется будущими выпускниками вузов на период, необходимый для достижения определенного порога финансового благополучия, пока хочется свободы передвижений и независимости от ипотечного груза. Почти половина опрошенных 54,7 % рассматривают для себя найм жилья как временную меру решения жилищного вопроса, зависящую от разных жизненных ситуаций</p> <p>“Rental housing is needed as a temporary solution to the housing problem”.</p> <p>Rental housing is planned by future university graduates for the period necessary to reach a certain threshold of financial well-being, while they want freedom of movement and independence from the mortgage burden. Almost half of the respondents, 54.7 %, consider renting housing as a temporary solution to their housing problem, depending on different life situations</p>
35,0 % (139 респондентов) (139 respondents)	<p>«Найм жилья не ограничивает в выборе места работы и выборе места жительства».</p> <p>Для будущих выпускников вузов найм жилья необходим для обеспечения свободы быстрых переездов и расширения территориального охвата при поиске работы. При смене места работы можно легко сменить место жительства. Найм дает возможность выбрать жилье там, где нужно в этот период, например ближе к работе, что сократит время проезда до работы и увеличит личное время. 35 % студентов из числа опрошенных сослались на то, что будут выбирать найм, потому что он не ограничивает их в выборе места работы и жительства</p> <p>“Hiring housing does not restrict your choice of work and choice of residence”.</p> <p>For future college graduates, rental housing is necessary to provide the freedom to move quickly and expand the geographic scope of the job search. When you change jobs, you can easily change where you live. Hiring provides the opportunity to choose housing where you need it during that period, such as closer to work, which will reduce commute time and increase personal time. 35 % of the students surveyed cited that they would choose hiring because it did not restrict their choice of work and residence</p>
6,0 % (24 респондента) (24 respondents)	<p>«Не хочу обременять себя заботами по обслуживанию, содержанию и ремонту собственного жилья».</p> <p>При найме жилья не нужно дополнительно тратиться на покупку мебели, техники, вкладываться в ремонт жилья. Для респондентов после окончания обучения в вузе это крупные и ненужные пока траты. У 6 % респондентов нет желания обременять себя заботами по обслуживанию, содержанию и ремонту жилья</p> <p>“I don’t want to burden myself with the maintenance, upkeep and repair of my own home”.</p> <p>There is no need to spend extra money to buy furniture, appliances, and to invest in the repair of housing. For respondents, after graduation, these are large and unnecessary expenses. 6 % of respondents have no desire to burden themselves with maintenance, upkeep and repair of housing</p>

Табл. 5. Детализированные аргументы против выбора наемного жилья

Table 5. Detailed arguments against choosing rented housing

Количество ответов Number of responses	Характеристика сегмента Characteristics of the segment
69,5 % (276 респондентов) (276 respondents)	<p>«Высокая плата за найм».</p> <p>Для 69,5 % респондентов решающим аргументом против выбора найма жилья выступает его цена. Поэтому для будущих молодых специалистов на этапе послевузовского самоопределения так важна возможность найма жилья на льготных условиях “High rents”.</p> <p>For 69.5 % of the respondents, the decisive argument against the choice of renting housing is its price. That is why the opportunity to rent housing on favorable terms is so important for future young professionals at the stage of postgraduate self-determination</p>
41,6 % (165 респондентов) (165 respondents)	<p>«Риск непродления срока найма».</p> <p>Респонденты считают, что существующий рынок найма жилья в России не защищает в нужной мере нанимателей. Особую озабоченность у большого числа респондентов (41,6 %) вызывают незащищенное положение нанимателя при нарушении наймодателем сроков найма жилья, невозможность планирования нанимателем продления сроков найма. Будущие выпускники отмечают необходимость гарантий по соблюдению и продлению сроков найма жилья</p> <p>“Risk of non-renewal of tenancy”.</p> <p>Respondents believe that the current rental housing market in Russia does not adequately protect tenants. A large number of respondents (41.6 %) are particularly concerned about the unprotected position of the tenant in case the landlord violates the tenancy term, and the inability of the tenant to plan for the extension of the tenancy. Future graduates note the need for guarantees to meet the deadlines and extend the terms of tenancy</p>
40,3 % (160 респондентов) (160 respondents)	<p>«Риски заключения сделки».</p> <p>Ответы респондентов свидетельствуют и о сомнениях в защищенности нанимателей в отношении рисков заключения сделки (40,3 %). При найме жилья отсутствуют гарантии заключения сделки и законодательное обеспечение прав нанимателя и наймодателя. Респондентам, как будущим потребителям найма жилья, нужны гарантии законной поддержки нанимателей и проверки наймодателей</p> <p>“Risks of making a deal”.</p> <p>Respondents’ answers also indicate doubts about tenants’ protection in relation to transaction risks (40.3 %). When renting housing, there are no guarantees of the transaction and no legal guarantees of the rights of the tenant and the landlord. Respondents, as future consumers of housing, need guarantees of legal support for tenants and inspection of landlords</p>
16,4 % (65 респондентов) (65 respondents)	<p>«Невозможность передачи жилья по наследству».</p> <p>Найм жилья предполагает значительные постоянные расходы только для обеспечения текущих потребностей, которые не являются вкладом в будущее приобретение жилья для себя и передачи его как жизненно необходимого актива по наследству. Немалая часть респондентов (16,4 %) против выбора найма жилья, считая, что это расходы, которые не обеспечат жильем их и будущих наследников</p> <p>“Failure to inherit a home”.</p> <p>Rental housing involves significant fixed costs only for current needs, which are not a contribution to the future purchase of housing for themselves and transferring it as a vital asset by inheritance. A large part of the respondents (16.4 %) are against the choice of renting housing, believing that it is an expense that will not provide them and their future heirs with a home</p>

Следует подчеркнуть, что выделение респондентами ценового фактора находится на пересечении нескольких вопросов проводимого опроса и является повторяющимся ответом, что характеризует многокритериальность этой характеристики. По фактору длительности найма жилья получены следующие результаты опроса. Наибольшее число опрошенных — 55,2 % (219 чел.) предпочитают нанимать жилье на срок от одного года до трех лет. Найти жи-

лье для долгосрочного найма (на срок от одного года) непросто, так как многие наймодатели предпочитают оформлять договор на срок до 11 месяцев, чтобы не регистрировать его в Федеральной службе государственной регистрации, кадастра и картографии. Указывают на предпочтительный срок найма до одного года 20,9 % (83 чел.) респондентов. Выбирают найм жилья на срок от трех до пяти лет 15,3 % (61 чел.) и на срок свыше пяти лет — 8,6 % (34 чел.).

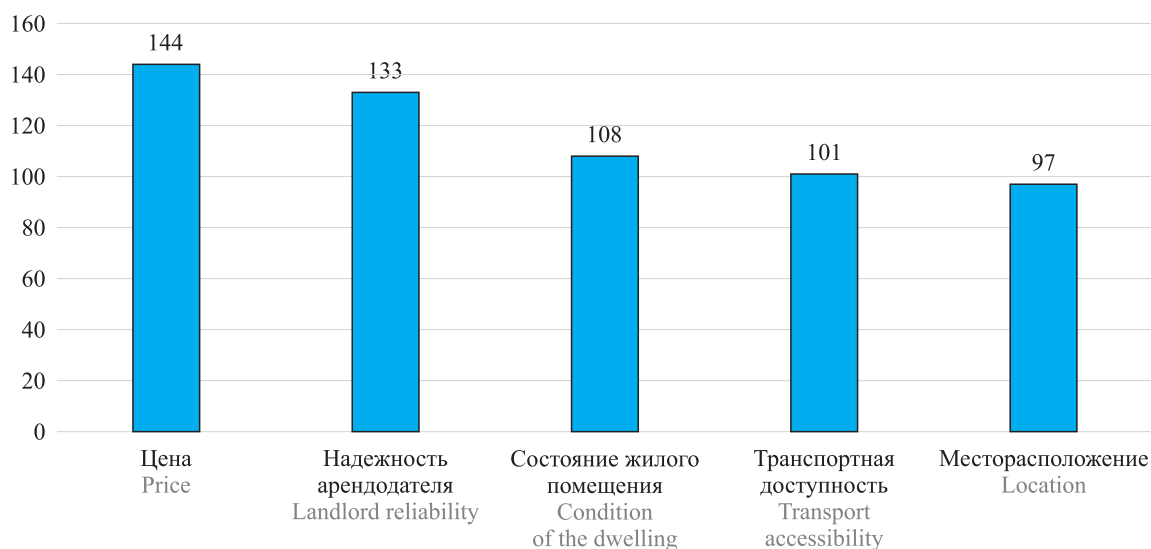


Рис. 3. Приоритетные критерии выбора наемного жилья

Fig. 3. Priority criteria for choosing rental housing

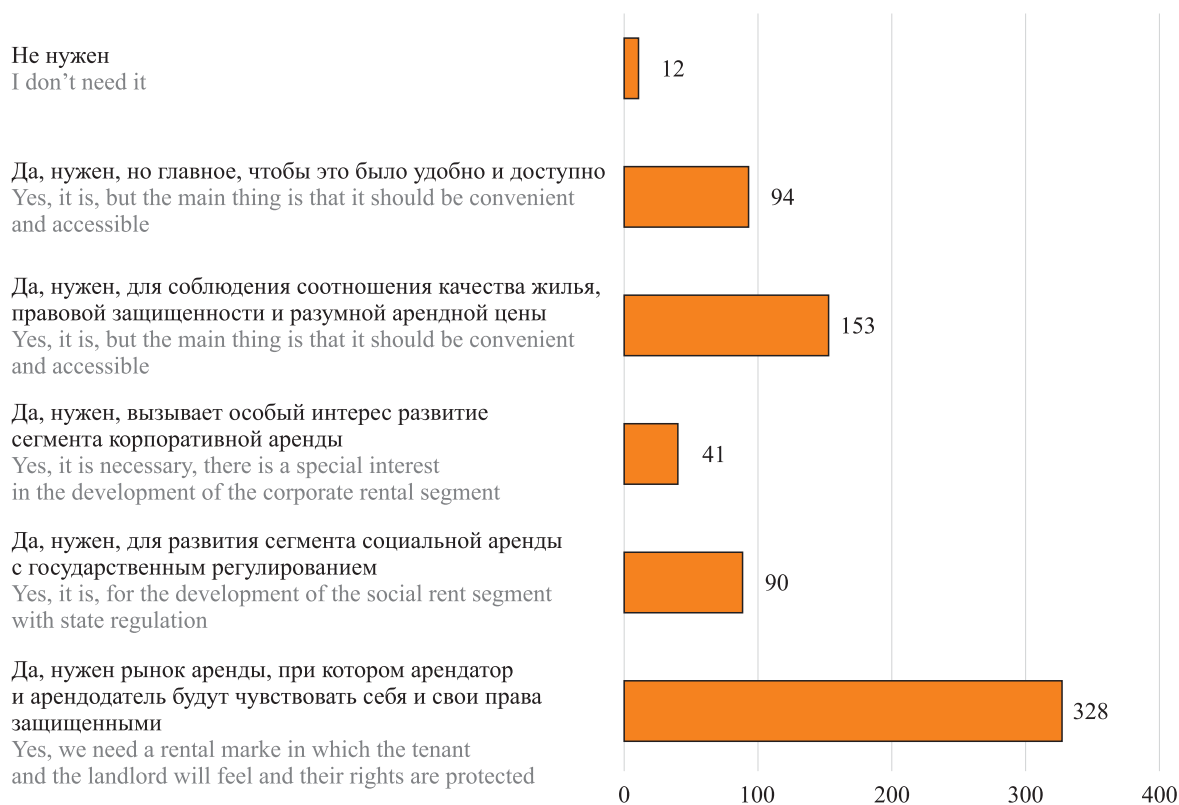


Рис. 4. Потребность в цивилизованном рынке найма жилья

Fig. 4. The need for a civilized rental housing market

В процессах предварительного анализа и планирования данного исследования сформулирована гипотеза как о существовании значительной потребности в найме жилья, так и о необходимости регулирования данного рынка. Респондентам было предложено ответить на вопрос «Считаете ли вы, что молодым специалистам нужен цивилизованный ры-

нок найма жилья?», в котором можно выбрать несколько вариантов ответов.

Ответы респондентов распределились следующим образом. Наибольшее число опрошенных — 82,6 % (328 чел.) считают, что нужен рынок найма жилья, при котором наниматель и наймодатель будут чувствовать себя и свои права защищенными. Второй

по оценке респондентов ответ «Да, нужен, для соблюдения соотношения качества жилья, правовой защищенности и разумной цены найма» выбрали ощутимо меньшее число опрошенных — 38,5 % (153 чел.). Среди респондентов, из числа прошедших опрос, отметили нужность удобного и доступного цивилизованного рынка найма жилья 23,7 % (94 чел.), а 22,7 % (90 чел.) выбрали необходимость развития сегмента социального найма с государственным регулированием. Всего 10,3 % (41 чел.) заинтересовались развитием сегмента корпоративного найма. Ответили, что цивилизованный рынок найма жилья не нужен для молодых специалистов 3 % (12 чел.). Распределение ответов респондентов по данному вопросу представлено на рис. 4.

Отвечая на вопрос «Какие меры жилищной поддержки помогли бы вам как молодому специалисту в первые годы работы?», 99,5 % респондентов указали на необходимость различных мер как со стороны государства, так и со стороны будущего работодателя. Ответы на вопрос распределились следующим образом: 55,2 % (219 чел.) опрошенных указали на потребность частичной государственной компенсации оплаты расходов по найму жилья, 34,5 % (137 чел.) хотят иметь поддержку работодателей в качестве частичного возмещения по найму жилья, 9,8 % (39 чел.) респондентов надеются на гарантированное место в общежитии, 0,5 % (2 чел.) занимают прочие ответы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенного исследования выявлено, что большая часть (88,7 %) из опрошенных студентов после получения диплома о высшем образовании планируют остаться жить в Московском регионе. Сравнительный анализ ответов показал, что к числу молодых специалистов, постоянно проживающих в регионе, добавятся 15,1 % выпускников вуза, которые приняли решение не возвращаться на малую родину и желают строить дальнейшую карьеру в регионе обучения. В большом регионе их привлекают лучшие социально-культурные условия, вероятность получения высоких доходов, более широкие возможности для самореализации.

Оценивая полученные ответы о потребности респондентов в жилье после окончания обучения в вузе, авторы пришли к выводу, что жилищная проблема существует у 65,5 % респондентов. В том числе серьезная жилищная проблема у 36 % респондентов, еще 21,4 % опрошенных уже задумываются над

перспективами решения своих жилищных проблем. Результаты опроса показывают, что только у 3,8 % от числа всех опрошенных имеются средства для приобретения жилья, одновременно респонденты указывают и на допустимость покупки собственного жилья при использовании ипотеки или оказании помощи родственниками. Но основной части молодых специалистов будет недоступно ипотечное кредитование после окончания обучения в вузе в условиях роста процентов по кредитам и стоимости жилья. Поэтому этот вопрос для них плавно перетекает во все большую привлекательность найма. Подавляющее большинство опрошенных — 82,6 % (328 чел.) считает, что нужен цивилизованный рынок найма жилья.

По итогам анкетирования установлена определенная совокупность факторов, влияющих на спрос в найме жилья: цена, безопасность и надежность сделки, качество жилья, близость к социальной инфраструктуре и транспортная доступность. Порядок отбора факторов демонстрирует, что для опрошенных основным предпочтением при выборе наемного жилья является соотношение «цена – безопасность сделки» и потом — критерии «качество жилья» и «транспортная доступность». Потребительские ожидания респондентов будут соответствовать только при совпадении всей последовательности совокупности факторов.

По результатам проведенного исследования определено, что доля потребности в найме жилья по выборочной совокупности составляет 54,2 %. Учитывая специфическую характеристику опрошенных респондентов и размер предельной ошибки выборки, возможно прогнозировать потребность молодых специалистов, как приоритетной группы потребителей на рынке найма жилья, в Московском регионе в диапазоне от 340 000 до 370 000 человек в период с 2022 по 2026 гг.

Решение жилищной проблемы молодых специалистов в настоящих экономических условиях невозможно без помощи государства, что, в свою очередь, будет иметь большое значение для развития экономики, демографического роста, развития территорий, снижения социальной напряженности. Представленные в данной статье результаты исследования приводят к выводу о том, что имеется реальная потребность формирования организованного рынка социального и некоммерческого найма, что могло бы решить вопросы жилищной потребности многих групп населения, включая молодых специалистов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Абрамова Н.В.* Опыт развития рынков арендного жилья в странах с большой долей жилья в собственности: сравнительный анализ // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Государ-

ственное и муниципальное управление. 2017. Т. 4. № 3. С. 211–224. DOI: 10.22363/2312-8313-2017-4-3-211-224

2. *Беляков С.И., Сиразетдинов Р.М.* Актуальные задачи и перспективы развития рынка найма

и аренды жилья в России // Недвижимость: экономика, управление. 2018. № 3. С. 80–83.

3. Шнейдерман И.М. Развитие цивилизованного рынка арендного жилья // Научные труды Вольного экономического общества России. 2017. Т. 207. № 5. С. 555–562.

4. Benites-Gambirazio E., Bonneval L. Promouvoir un dispositif d'incitation fiscale à l'investissement locative // Gouvernement et Action Publique. 2021. Vol. 10. Issue 4. Pp. 137–160. DOI: 10.3917/gap.214.0137

5. Kim S., Hwang J., Lee M.-H. Effect of housing support programs on residential satisfaction and the housing cost burden: Analysis of the effect of housing support programs in Korea based on household attributes // Land. 2022. Vol. 11. Issue 9. P. 1392. DOI: 10.3390/land11091392

6. Lim H., Hwang J.-H. Potential residents' opinions on community facilities and operation programs of university-affiliated public rental housing // Journal of the Architectural Institute of Korea. 2022. Vol. 38. Issue 9. Pp. 47–55. DOI: 10.5659/JAIK.2022.38.9.47

7. Turnbull G.K., van der Vlist A.J. Bargaining power and segmented markets: Evidence from rental and owner-occupied housing // Real Estate Economics. 2022. Vol. 50. Issue 5. Pp. 1307–1333. DOI: 10.1111/1540-6229.12380

8. Bian X., Lin Z. Housing debt and elderly housing tenure choices // Real Estate Economics. 2022. Vol. 50. Issue 5. Pp. 1360–1397. DOI: 10.1111/1540-6229.12373

9. Gromis A., Hendrickson J.R., Desmond M. Eviction from public housing in the United States // Cities. 2022. Vol. 127. P. 103749. DOI: 10.1016/j.cities.2022.103749

10. Sharma M., Samarin M. Rental tenure and rent burden: progress in interdisciplinary scholarship and pathways for geographical research // GeoJournal. 2022. Vol. 87. Issue 4. Pp. 3403–3421. DOI: 10.1007/s10708-021-10417-2

11. Lowies B., Squires G., Rossini P., McGreal S. Locked-out: generational inequalities of housing tenure and housing type // Property Management. 2022. Vol. 40. Issue 4. Pp. 510–526. DOI: 10.1108/PM-09-2021-0067

12. Engerstrom S., Warsame A., Wilhelmsson M. Long-term dynamics of new residential supply: a case

study of the apartment segment in Sweden // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 7. P. 970. DOI: 10.3390/buildings12070970

13. Park S.-S., Park Y., Kim M. Remodeling decision of LH aged long-term public rental housing — focused on deriving the determining factors for remodeling // Journal of the Architectural Institute of Korea. 2022. Vol. 38. Issue 7. Pp. 57–67. DOI: 10.5659/JAIK.2022.38.7.57

14. Csizmady A., Kőszeghy L. “Generation Rent” in a Super Homeownership Environment: The Case of Budapest, Hungary // Sustainability. 2022. Vol. 14. Issue 14. P. 8929. DOI: 10.3390/su14148929

15. Mu L., Wang X., Wang C. Coupling Coordination of Population-Economy-Housing Rental Market: An Analysis Based on Data from 35 Large and Medium-Sized Cities // Tropical Geography. 2022. Vol. 42. Issue 6. Pp. 889–901. DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003500

16. Kurichev N.K. Spatial equilibrium? The difference of real income, housing markets, and migration flows between Russian cities // Regional Research of Russia. 2022. Vol. 12. Issue 2. Pp. 215–226. DOI: 10.1134/S2079970522020162

17. Leviten-Reid C., MacDonald M., Matthew R.A. Public housing, market rentals, and neighbourhood characteristics // The Canadian Geographer / Le Géographe canadien. 2022. Vol. 66. Issue 2. Pp. 263–277. DOI: 10.1111/cag.12706

18. Yan J., Haffner M., Elsinga M. Effective public rental housing governance: tenants' perspective from the pilot city Chongqing, China // Journal of Housing and the Built Environment. 2022. Vol. 37. Issue 2. Pp. 1001–1027. DOI: 10.1007/s10901-021-09872-7

19. Squires G., Webber D., Trinh H.H., Javed A. The connectedness of house price affordability (HPA) and rental price affordability (RPA) measures // International Journal of Housing Markets and Analysis. 2022. Vol. 15. Issue 3. Pp. 521–547. DOI: 10.1108/IJHMA-03-2021-0029

20. Габдрахманов Н.К., Никифорова Н.Ю., Лещуков О.В. «От Волги до Енисея...»: образовательная миграция молодежи в России // Современная аналитика образования. 2019. № 5 (26). С. 4–42.

Поступила в редакцию 24 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 9 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 10 ноября 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: Анастасия Игоревна Магина — преподаватель кафедры социальных, психологических и правовых коммуникаций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1029669, ORCID: 0000-0002-0248-5596; coldrain96@mail.ru;

Марина Юрьевна Мишланова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры экономики и управления в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 386390, Scopus: 57190413620, ResearcherID: B-2093-2016, ORCID: 0000-0002-2394-0746; mishlanova_m@mail.ru.

Вклад авторов:

Магина А.И. — идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи.

Мишланова М.Ю. — научное руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Abramova N.V. A comparative analysis of experience in the development of rental housing markets in countries with a large share of home ownership. *RUDN Journal of Public Administration*. 2017; 4(3):211-224. DOI: 10.22363/2312-8313-2017-4-3-211-224 (rus.).
2. Belyakov S.I., Sirazetdinov R.M. Actual challenges and prospects for the development of the market for rental housing in Russia. *Real Estate: Economics, Management*. 2018; 3:80-83. (rus.).
3. Schneiderman I.M. Development of a civilized rental market. *Scientific Works of the Free Economic Society of Russia*. 2017; 207(5):555-562. (rus.).
4. Benites-Gambirazio E., Bonneval L. Promouvoir un dispositif d'incitation fiscale à l'investissement locative. *Gouvernement et Action Publique*. 2021; 10(4): 137-160. DOI: 10.3917/gap.214.0137
5. Kim S., Hwang J., Lee M.-H. Effect of Housing Support Programs on Residential Satisfaction and the Housing Cost Burden: Analysis of the Effect of Housing Support Programs in Korea Based on Household Attributes. *Land*. 2022; 11(9):1392. DOI: 10.3390/land11091392
6. Lim H., Hwang J.-H. Potential residents' opinions on community facilities and operation programs of university-affiliated public rental housing. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2022; 38(9):47-55. DOI: 10.5659/JAIK.2022.38.9.47
7. Turnbull G.K., van der Vlist A.J. Bargaining power and segmented markets: Evidence from rental and owner-occupied housing. *Real Estate Economics*. 2022; 50(5):1307-1333. DOI: 10.1111/1540-6229.12380
8. Bian X., Lin Z. Housing debt and elderly housing tenure choices. *Real Estate Economics*. 2022; 50(5):1360-1397. DOI: 10.1111/1540-6229.12373
9. Gromis A., Hendrickson J.R., Desmond M. Eviction from public housing in the United States. *Cities*. 2022; 127:103749. DOI: 10.1016/j.cities.2022.103749
10. Sharma M., Samarin M. Rental tenure and rent burden: progress in interdisciplinary scholarship and pathways for geographical research. *GeoJournal*. 2022; 87(4):3403-3421. DOI: 10.1007/s10708-021-10417-2
11. Lowies B., Squires G., Rossini P., McGreal S. Locked-out: generational inequalities of housing tenure and housing type. *Property Management*. 2022; 40(4):510-526. DOI: 10.1108/PM-09-2021-0067
12. Engerstrom S., Warsame A., Wilhelmsson M. Long-Term Dynamics of New Residential Supply: A Case Study of the Apartment Segment in Sweden. *Buildings*. 2022; 12(7):970. DOI: 10.3390/buildings12070970
13. Park S.-S., Park Y., Kim M. Remodeling decision of LH aged long-term public rental housing — focused on deriving the determining factors for remodeling. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2022; 38(7):57-67. DOI: 10.5659/JAIK.2022.38.7.57
14. Csizmadya A., Kőszeghy L. “Generation Rent” in a super homeownership environment: the case of Budapest, Hungary. *Sustainability*. 2022; 14(14):8929. DOI: 10.3390/su14148929
15. Mu L., Wang X., Wang C. Coupling coordination of population-economy-housing rental market: An analysis based on data from 35 large and medium-sized cities. *Tropical Geography*. 2022; 42(6):889-901. DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003500
16. Kurichev N.K. Spatial equilibrium? The difference of real income, housing markets, and migration flows between Russian cities. *Regional Research of Russia*. 2022; 12(2):215-226. DOI: 10.1134/S2079970522020162
17. Leviten-Reid C., MacDonald M., Matthew R.A. Public housing, market rentals, and neighbourhood characteristics. *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*. 2022; 66(2):263-277. DOI: 10.1111/cag.12706
18. Yan J., Haffner M., Elsinga M. Effective public rental housing governance: tenants' perspective from the pilot city Chongqing, China. *Journal of Housing and the Built Environment*. 2022; 37(2):1001-1027. DOI: 10.1007/s10901-021-09872-7
19. Squires G., Webber D., Trinh H.H., Javed A. The connectedness of house price affordability (HPA) and rental price affordability (RPA) measures. *International Journal of Housing Markets and Analysis*. 2022; 15(3):521-547. DOI: 10.1108/IJHMA-03-2021-0029
20. Gabdrakhmanov N., Nikiforova N., Leshukov O. Educational migration of youth in Russia. *Modern Education Analytics*. 2019; 5(26):4-42. (rus.).

Received October 24, 2022.

Adopted in revised form on November 9, 2022.

Approved for publication on November 10, 2022.

BIONOTES: **Anastasia I. Magina** — Lecturer at 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; ID RISC: 1029669, ORCID: 0000-0002-0248-5596; coldrain96@mail.ru;

Marina Yu. Mishlanova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 386390, Scopus: 57190413620, ResearcherID: B-2093-2016, ORCID: 0000-0002-2394-0746; mishlanova_m@mail.ru.

Contribution of the authors:

Anastasia I. Magina — idea, collection of material, processing of material, writing an article.

Marina Yu. Mishlanova — scientific guidance.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER

УДК 338

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1747-1756

Экосистема промышленного предприятия в условиях ESG-трансформации

Татьяна Сергеевна Мещерякова¹, Максим Васильевич Черняев²¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*² *Российский университет дружбы народов (РУДН); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Несмотря на негативные внешние факторы и противоречия экспертного сообщества по вопросам ESG, зеленой экономики и смежным темам, устойчивое развитие, как один из мейнстримов государственной политики, не утратил вес в государственных форсайтах. Имеющийся практический интерес и дискуссии находят отражение в научных работах, что подтверждает актуальность данной темы. Цель исследования — характеристика экосистемы субъекта промышленности, осуществляющего деятельность или разрабатывающего стратегию развития в условиях ESG-трансформации. В рамках исследования последовательно решены задачи, обеспечивающие достижение поставленной цели: осуществлен генезис ESG-трансформации мировой и российской экономики; проведен анализ мирового и российского рынков ESG по системам рейтингования; представлена характеристика проблематики по предметной области исследования и возможные направления развития.

Материалы и методы. Используются данные международных рейтинговых агентств, нормативно-правовые и программные документы, научные работы по теме исследования. Применяются традиционные общенаучные методы синтеза, индукции, дедукции, аналогии.

Результаты. Приведенные результаты анализа промышленных предприятий в рейтинге ESG RAEX-Europe демонстрируют наибольшую активность в следовании принципам устойчивого развития интегрированных нефтегазовых компаний. При этом охвачены оценкой самые крупные предприятия — лидеры отраслей. Возглавляют рейтинг ESG: НЛМК (черная металлургия), «Энел Россия» (электроэнергетика), «Полиметалл» (драгоценные металлы). Представлена экосистема функционирования сертификатов I-REC, которая стала прототипом национальной финансовой системы зеленых бумаг, выпускаемых под генерацию ВИЭ. Приведена инфографика мирового выпуска сертификатов I-REC.

Выводы. В настоящее время формируется национальная институциональная среда устойчивого развития промышленных предприятий как на государственном уровне, так и на уровне отдельных регионов. Промышленные предприятия станут важнейшими участниками программы реализации стратегии социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов. Развитие финансовых зеленых инструментов позволит сформировать возможности для выхода из состояния убыточности или низкой прибыльности, а в дальнейшем обеспечит динамичное развитие инфраструктурных сетевых компаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экосистема, промышленность, экология, устойчивое развитие, ESG-принципы, социальная ответственность, энергоэффективность, углеродная отчетность, зеленая экономика, зеленые сертификаты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мещерякова Т.С., Черняев М.В. Экосистема промышленного предприятия в условиях ESG-трансформации // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1747–1756. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1747-1756

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Сергеевна Мещерякова, meshcheryakovats@mgsu.ru.

Ecosystem of an industrial enterprise in the conditions of ESG-transformation

Tatiana S. Meshcheryakova¹, Maxim V. Chernyaev²¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;*² *Peoples' Friendship University of Russia (RUDN); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Despite the negative external factors and contradictions of the expert community on ESG, "green" economy and related topics, sustainable development, as one of the mainstream of public policy, has not lost its weight in state foresight. The existing practical interest and discussions are reflected in scientific papers, which confirms the relevance of this study. The purpose of the study is to characterize the ecosystem of an industrial entity operating or developing a development strategy in the context of ESG transformation. Within the framework of the conducted research, the tasks ensuring the achievement of the set goal have been consistently solved: the genesis of the ESG transformation of the world and Russian economy has

been carried out; the analysis of the world and Russian ESG markets by rating systems has been carried out; the characteristics of the problems in the subject area of the study and possible directions of development are presented.

Materials and methods. The work uses data from international rating agencies, regulatory and policy documents, scientific papers on the topic of the study. In the process of research, traditional general scientific methods of synthesis, induction, deduction, analogy are used.

Results. The results of the analysis of industrial enterprises in the ESG RAEX-Europe ranking show the most numerous activity in following the principles of sustainable development of integrated oil and gas companies. At the same time, the largest enterprises — leaders of their industries — are covered by the assessment. The ESG ranking is headed by NLMK (Iron & Steel), Enel Russia (Electric Utilities (Generation and Transmission), Polymetal (Precious metals). The study presents an ecosystem of functioning I-REC certificates, which became the prototype of the national financial system of “green” securities issued for the generation of renewable energy sources. The infographic of the world issue of I-REC certificates is given.

Conclusions. Currently, a national institutional environment for the sustainable development of industrial enterprises is being formed both at the state level and at the level of individual regions. Industrial enterprises will become the most important participants in the program of implementation of the strategy of socio-economic development of Russia with a low level of greenhouse gas emissions. The development of financial “green” instruments will create opportunities to get out of the state of unprofitability or low profitability, and in the future will ensure the dynamic development of infrastructure network companies.

KEYWORDS: ecosystem, industry, ecology, sustainable development, ESG principles, social responsibility, energy efficiency, carbon reporting, green economy, green certificates

FOR CITATION: Meshcheryakova T.S., Chernyaev M.V. Ecosystem of an industrial enterprise in the conditions of ESG-transformation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(12):1747-1756. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1747-1756 (rus.).

Corresponding author: Tatiana S. Meshcheryakova, meshcheryakovats@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время тема устойчивого развития во всех ее аспектах и базовых положениях приобретает принципиально иное значение на фоне текущей эпидемиологической, экономической и геополитической ситуации. Проблематика может быть рассмотрена по отраслям и в целом для экономики и отражена со стороны разных подходов (например, в рамках общей концепции устойчивого развития ООН и целей устойчивого развития (ЦУР); по укрупненным блокам или отдельным показателям экологии, социального и корпоративного управления; в рамках концепции ESG — Environment, Social, Governance, в переводе с англ. — окружающая среда, общество, управление)). Данное исследование рассматривается со стороны последнего подхода, который в последние годы получил распространение не только в практике менеджмента крупных корпораций, но и в исследованиях академического сообщества.

В научной и профессиональной литературе анализируются ESG-критерии оценки применительно ко всем уровням экономической системы (макро/государственной, мезо/региональной, микро/на предприятии), а также результаты ранжирования. При этом обзор научной литературы по теме исследования позволяет сделать вывод о текущем разрыве проблематики ESG по всем уровням экономической системы, а соответственно отсутствию сквозного подхода к реализации принципов устойчивого развития. Эта концепция схожа с идеологией или философским постулатом — очевидная аксиома, которая носит субъективный характер по предметной области и целям исследователя.

Концепция ESG появилась как ответ на научно и общественно констатированный факт деградации окружающей среды, а также усиливающий социаль-

ные проблемы, и стал логическим продолжением развития ЦУР, обеспечивая основу базового мерила. Формирование представления о предпосылках к современному мейнстриму ESG требует генезиса концепции ESG. Институциональный период относится к 2004 г. и связан с докладом Кофи Аннана «Неравнодушный побеждает», в котором секретарь ООН призывал крупные предприятия включить ESG-принципы в стратегии своего развития¹. Очевидным фактом является то, что все приведенные принципы были важны для имиджа крупного предприятия, а соответственно могли повлиять на его инвестиционную привлекательность и до появления концепции ESG [1–8]. Инициатива ООН заключалась в интеграции и тиражировании единых принципов устойчивого развития в стратегиях бизнес-единиц и государств.

Постепенно участники рынка начали предъявлять дополнительные требования к деятельности предприятий и помимо финансовой отчетности оценивать инвестирование предприятия в устойчивое развитие. Таким образом, стала складываться парадигма развития деловой репутации в условиях цифровой трансформации, которая потребовала создания необходимого инструментария при инвестировании собственного, заемного или привлеченного капитала в зеленые проекты. Общемировое понимание значимости финансовой сферы в зеленой экономике констатируется как российским государственным сектором, так и лидерами западных стран.

¹ Who Cares Wins, 2004–08 ISSUE BRIEF. URL: [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/9eeb7982-3705-407a-a631-586b31dab000/IFC_Breif_whocares_online.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE-9eeb7982-3705-407a-a631-586b31dab000-jkD12B5#:~:text=Who%20Cares%20Wins%20\(WCW\)%20was,US%246%20trillion%20in%20assets](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/9eeb7982-3705-407a-a631-586b31dab000/IFC_Breif_whocares_online.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE-9eeb7982-3705-407a-a631-586b31dab000-jkD12B5#:~:text=Who%20Cares%20Wins%20(WCW)%20was,US%246%20trillion%20in%20assets)

На ESG-трансформацию оказывает значительное влияние финансовый сектор экономики, что получило логическое развитие во множестве программных мер: в 2019 г. ООН представила «Принципы ответственного банковского дела», направленные на объединение усилий банковского сектора для достижения глобальных задач устойчивого развития [7–17]². На рынке уже активно применяются финансовые инструменты, поддерживающие ESG-трансформацию: зеленые сертификаты/облигации, кредиты и депозиты, ставки которых могут быть привязаны к ESG-отчетности [18–20].

Одним из важнейших элементов экосистемы предприятий в условиях ESG-трансформации стали зеленые сертификаты I-REC. Данные сертификаты выпускает международная некоммерческая организация стандартов I-REC Standard Foundation, которая обеспечивает систему отслеживания атрибутов ESG и, по сути, является международной системой торговли зелеными сертификатами. Стандарт I-REC признан в качестве надежной основы проверки инструментов отслеживания генерации контрактируемых энергоносителей, генерируемых от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в соответствии с системами отчетности, такими как Протокол по парниковым газам (GHGP), CDP и RE100. В настоящее время работа системы I-REC на территории Российской Федерации прекращена. При этом получает развитие национальная система регистрации зеленых сертификатов, главным отличием которой служит включение в нее атомной энергетики. Общий подход рынка зеленых сертификатов ориентирован на следующие репутационные заявления:

- покрытие потребностей предприятия в электроэнергии за счет ВИЭ на 100 %;
- производство продукции с использованием 100 % ВИЭ;
- минимизация/нейтрализация выбросов парниковых газов.

Последний аспект получил развитие на государственном уровне и предполагает в перспективе декларирование углеродного следа, согласно Федеральному закону от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов», предприятия, достигающие объема выбросов углекислого газа в эквиваленте, превышающем 150 тыс. т в год за период до 1 января 2024 г. и более 50 тыс. т в последующие годы, будут отнесены к «регулируемым организациям», т.е. осуществляющим обязательное декларированное выбросов парниковых газов³.

² Principles for Responsible Banking. URL: https://www.unepfi.org/wordpress/wp-content/uploads/2019/07/PrinciplesOverview_Infographic.pdf

³ Об ограничении выбросов парниковых газов : Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ (последняя редакция). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388992/

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проводимое исследование базируется на материалах международных рейтинговых агентств, включая собранные ими публичные статистические данные и методологии оценки. Основные международные агентства, присваивающие ESG-рейтинг, — S&P Global, Sustainalytics, MSCI, EY, Bloomberg, CDP, ISS, Moody's, FTSE Russell. Самые известные российские агентства — это Эксперт РА, АКРА (не действует с 2022 г.), НРА (действует с 2022 г.), НКР.

Приведем основные положения методологии к оценке ESG-индексов.

При оценке индекса ESG во всех системах оценивают подверженность деятельности предприятия рискам (S&P Global для этих целей создало Атлас рисков ESG, формирующий экспертное представление об относительных экологических, социальных и управленческих рисках в различных странах), степень учета в корпоративном управлении рисков и реализацию соответствующих мероприятий по формированию профиля устойчивого развития⁴. Методики рейтингования/рэнкирования предприятий отличаются набором показателей и инструментами верификации.

Рассмотрен рэнкинг предприятий по методике RAEX-Europe. Данная организация сосредоточилась на решениях в области устойчивого финансирования, включая рейтинги и рейтинги ESG, и является одним из наиболее весомых участников рынка услуг независимого рэнкирования. Оценка RAEX-Europe ориентирована на отраслевой и страновой подход и основывается на анализе действующей политики, уровня отчетности и показателях, связанных с ESG. Система факторов и субфакторов, используемых в процессе присвоения рейтингов ESG корпорациям, описана в Методологии присвоения рейтингов ESG корпорациям. Для оценки индекса ESG предприятия первоначально отбирались по общему объему выручки в соответствии с ТОП-50 рейтинга RAEX-600. В настоящее время формат исследования расширен на основе заинтересованности сторон по охвату конкретных отраслей. Рэнкинг ESG включает «запрашиваемые» и «незапрошенные» рейтинги. Незапрошенные рейтинги ESG основаны на общедоступной информации и присваиваются без запроса со стороны рейтингуемой организации. Присвоение запрашиваемого рейтинга ESG подразумевает договорные отношения (организация участвует в процессе присвоения рейтинга, предоставляя проверенные непубличные данные и запрашивая просмотр рейтинга ESG в течение одного года).

В исследовании выполнен структурный и динамический анализ данных за полный период рэнкирования российских предприятий до декабря 2022 г.

Научная дискуссия по вопросам развития зеленой экономики и финансовых инструментов в ракурсе ESG определила проведенный обзор зеленых сертификатов и облигаций, ретроспективный анализ и формирование общемировых тенденций, которые базируются на аналитических отчетах I-REC Standard Foundation. Общая статистика по российскому рынку зеленых активов за 2022 г. отсутствует и дискретно представлена на официальных сайтах организаций, аккредитованных в I-REC (сведения по ним с марта 2022 г. не отражаются в общей отчетности международной системы), а также на государственных порталах.

Несмотря на научную дискуссию по вопросам ESG-трансформации промышленных предприятий, данная тема имеет значительный потенциал для развития в сквозных направлениях, обеспечивающих собственные национальные интересы на стыке «климатической повестки». Важным в развитии предметной области исследования является проблематика формирования институциональных механизмов на основе нормативной базы. В 2021 г. Правительство РФ утвердило Стратегию социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г., план по реализации которой перенесен на первый квартал 2023 г. Данный документ обеспечит рамочные признаки развития предприятий в условиях ориентации на углеродную нейтральность и экологически ответственное инвестирование предпринимательского сектора экономики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ввиду необходимости расширения мер поддержки модернизации промышленных предприятий на принципах наилучших доступных технологий

(НДТ), в частности путем развития инструментов зеленого финансирования, а также принимая во внимание то, что подготовка критериев проектов развития и методических указаний, ориентированных на достижение целей и основных направлений устойчивого (в том числе зеленого) развития в РФ, находится на завершающей стадии согласования, проектом «Климатически нейтральная хозяйственная деятельность: внедрение НДТ в РФ» в начале 2021 г. было принято решение разработать руководство по ESG-трансформации предприятия для привлечения финансирования в контексте устойчивого развития с учетом международных трендов (зеленые/социальные, переходные облигации, облигации устойчивого развития, зеленые кредиты и др.) или повышения конкурентоспособности предприятия в рамках проектов внедрения НДТ⁵.

Анализ данных рейтингового агентства RAEX-Europe, представляющего один из ESG-рэнкингов, публикуемых ежемесячно, демонстрирует, что среди 160 охваченных предприятий на начало декабря 2022 г. в категории «лидеры» находится только одно предприятие (НЛМК, подотрасль — черная металлургия) (рис. 1)⁶.

Приведенные данные свидетельствуют о преобладании количества предприятий (94 предприятия), отнесенных к категории «отстающие» по уровню устойчивого развития, согласно рэнкингу RAEX-Europe.

Результаты анализа рэнкинга RAEX-Europe позволяют представить следующую структуру распределения предприятий, включенных в оценку по отраслям (рис. 2).

При обработке данных рэнкинга определены ключевые отрасли, в которых предприятия успешно учитывают принципы ESG (рис. 3).

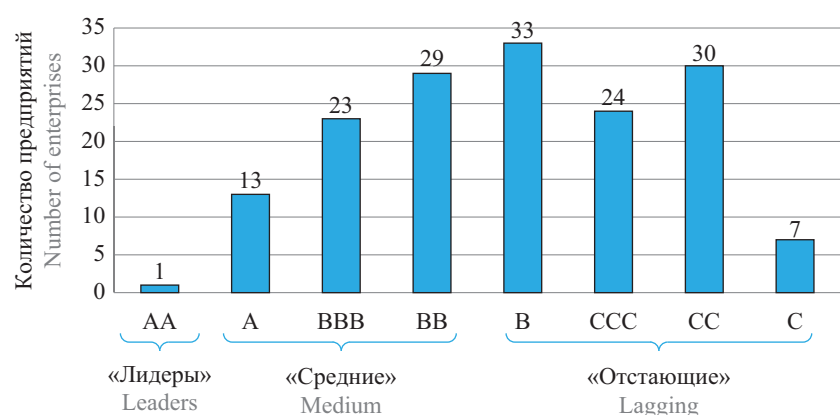


Рис. 1. ESG-рэнкинг российских предприятий на декабрь 2022 г.

Fig. 1. ESG-ranking of Russian enterprises for December 2022

⁵ ESG-трансформация предприятий. Руководство для привлечения финансирования в контексте устойчивого развития с учетом международных трендов и повышения конкурентоспособности предприятия в рамках проектов внедрения НДТ. URL: <https://www.good-climate.com/materials/files/212.pdf>

⁶ ESG-рэнкинг российских компаний (декабрь 2022 года). URL: https://raex-rr.com/esg/ESG_rating

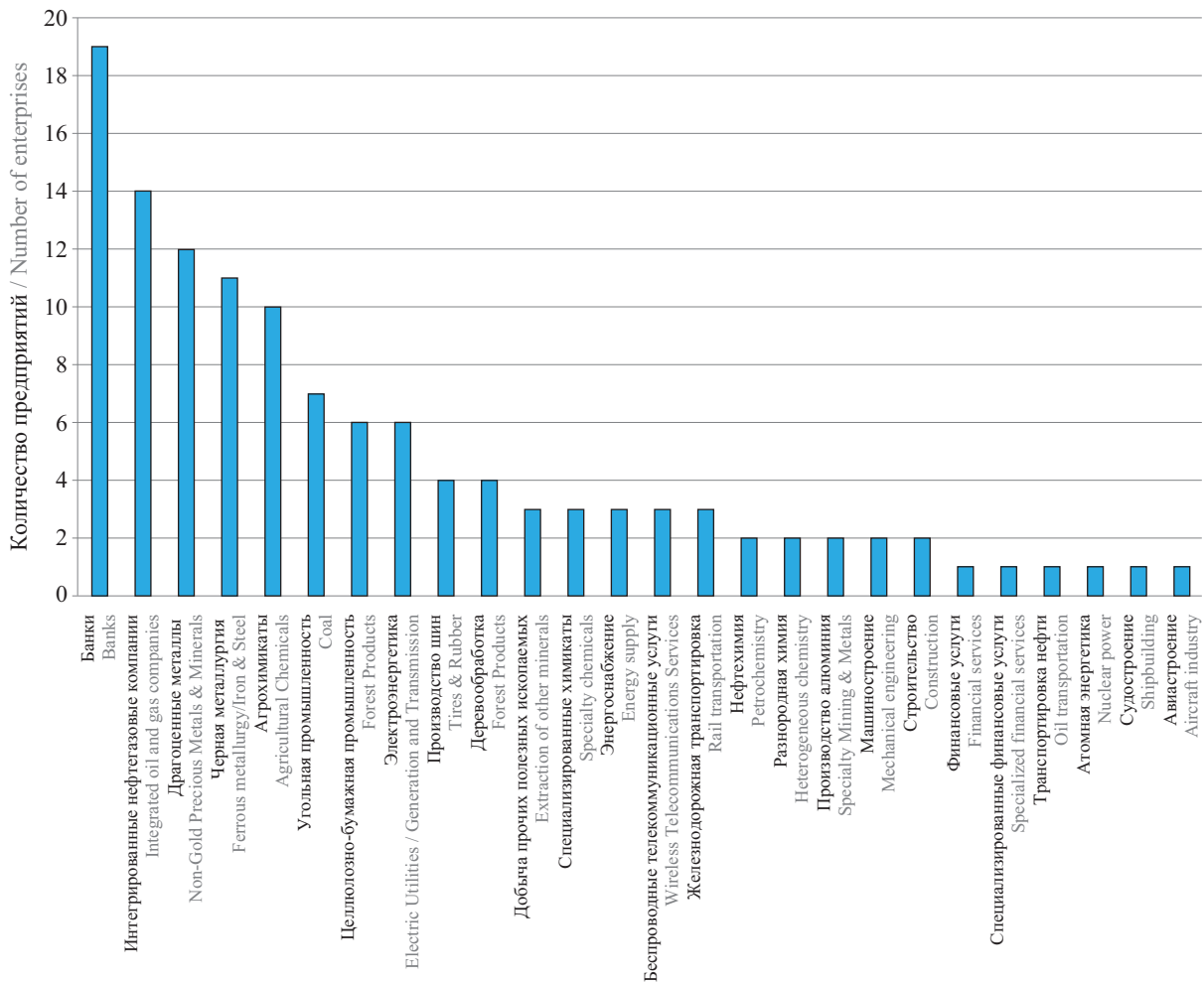


Рис. 2. Распределение российских предприятий, включенных в ESG-рэнкинг, по отраслям

Fig. 2. Distribution of Russian enterprises from the ESG ranking by industry

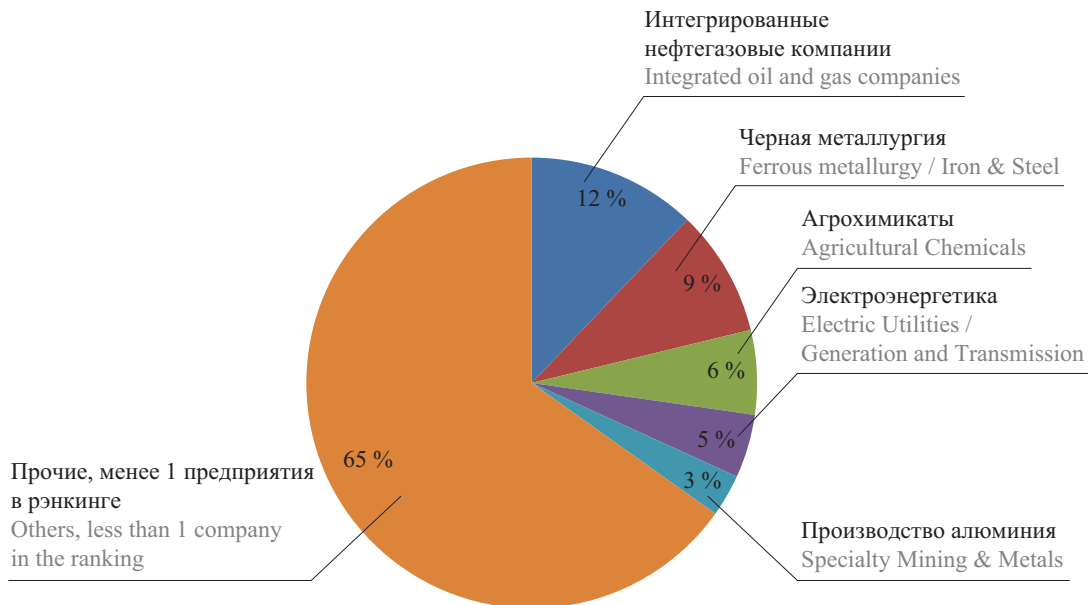


Рис 3. Распределение российских промышленных предприятий по отраслям, лидирующих по индексу ESG

Fig. 3. Distribution of industrial enterprises by industry, distributed by the ESG-index

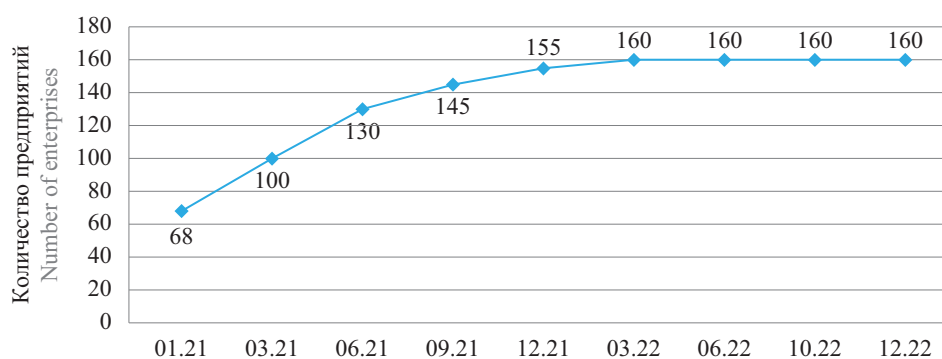


Рис. 4. Динамика количества российских предприятий в ESG-рэнкинге

Fig. 4. Dynamics of the number of Russian enterprises in the ESG-ranking

Самые высокие баллы (предприятия групп АА, А, ВВВ, ВВ) получили интегрированные нефтегазовые компании.

В течение 2021 г. количество предприятий в ESG-рэнкинге постепенно увеличивалось. С начала 2022 г. отмечен последний рост числа организаций, оцененных рейтинговым агентством (с февраля по декабрь 2022 г. количество организаций в рэнкинге осталось неизменным) (рис. 4).

В ходе составления ESG-рэнкинга предприятия оцениваются по каждой из трех категорий (E, S, G): 1 — наличие соответствующих политик и программ у компании; 2 — полнота, последовательность, сопоставимость и верифицированность отчетности; 3 — деятельность компании, которая снижает уровень рисков. Приведенная динамика свидетельствует о неснижаемом интересе российских предприятий к принципам устойчивого развития.

Методология формирования рэнкинга претерпевает значительные изменения ввиду масштабируемости темы. Так, до 2019 г. включительно охват участников рэнкинга ограничивался лидерами по выручке (RAEX-600), не включал ритейл, телеком и финансовый сектор. Оценка проводилась по восьми показателям один раз в год. С 2020 г. в охват выборки входят все отрасли, а оценка производится по 210 показателям.

Важно учитывать, что развитие международной сертификации на ближайшую перспективу остается под вопросом, а соответственно может возникнуть существенное затруднение в демонстрации энергоэффективной и экологически ответственной политики, подтвержденной сертификатами ИСО-50001 и 14001, что отразится на снижении индекса ESG в международных системах оценки.

В Российской Федерации важнейшим элементом экосистемы предприятий с 2020 г. стала международная некоммерческая организация I-REC, которая применяет единый механизм отслеживания проис-

хождения электроэнергии. Сертификаты I-REC выпускают аккредитованные организации в 35 странах мира, в РФ — это ассоциация «Цель номер семь»⁷. Объектом сделки на рынке зеленых сертификатов является сертификат с информацией о происхождении электроэнергии из возобновляемых источников энергии, к которым относится: энергия солнца, ветра, воды (ГЭС любого типа), морей и океанов (приливные электростанции), земных недр (геотермальные станции) и биомассы. Сертификат I-REC подтверждает, что 1 МВт·ч электроэнергии был произведен от ВИЭ. Сертификаты I-REC выпускаются в соответствии с такими международными стандартами устойчивого развития, как GHGP, CDP, RE100, ISO и др. Потребители электроэнергии могут использовать сертификаты для выполнения требований этих стандартов, а также для реализации своих целей в области корпоративной социальной ответственности.

Приведем историческую динамику масштабирования зеленых облигаций российских предприятий (рис. 5).

Рынок ESG-облигаций в настоящее время формируется в основном за счет госкомпаний.

По итогу 2022 г., согласно предварительной оценке Climate bond initiative (CBI), наблюдается значительное сокращение объемов новых размещений зеленых облигаций примерно на 27 %⁸.

В реестре I-REC в первый квартал 2022 г. были зарегистрированы 86 российских электростанций и выпущено более 3,7 млн сертификатов. В число генераторов ВИЭ, получивших статус «регистрант» в системе I-REC, вошли En+, ВетроОГК, «РусГидро», «Хевел», «Энел Россия», «Солар Системс».

Общая схема работы системы сертификации I-REC приведена на рис. 6.

Промышленное предприятие в данной системе может выступать в статусе «участника», согласно стандарту I-REC (I-REC Code) — это трейдер или конечный потребитель зеленого сертификата, кото-

⁷ Ассоциация «Цель номер семь». Сертификаты I-REC. URL: <https://www.gns.center/i-rec>

⁸ АКРА. Российский рынок ESG-облигаций жив. URL: <https://www.acra-ratings.ru/research/2698/>

рый имеет учетную запись участника в реестре I-REC. Для создания и ведения учетной записи участник заключает соглашение непосредственно с I-REC Services. Участником I-REC может быть любое юридическое лицо или организация, кроме выпускающих организаций (производителей энергии от ВИЭ) и поставщиков услуг I-REC, а также любое физическое лицо. Конечный потребитель зеленого сертификата

может быть как самостоятельно зарегистрированным участником реестра I-REC (владельцем собственной учетной записи участника), так и клиентом трейдера без собственной учетной записи. Во втором случае трейдер гасит зеленый сертификат из своей учетной записи на имя клиента, указывая параметры клиента (название компании, юридический адрес, конкретные офисы и заводы).

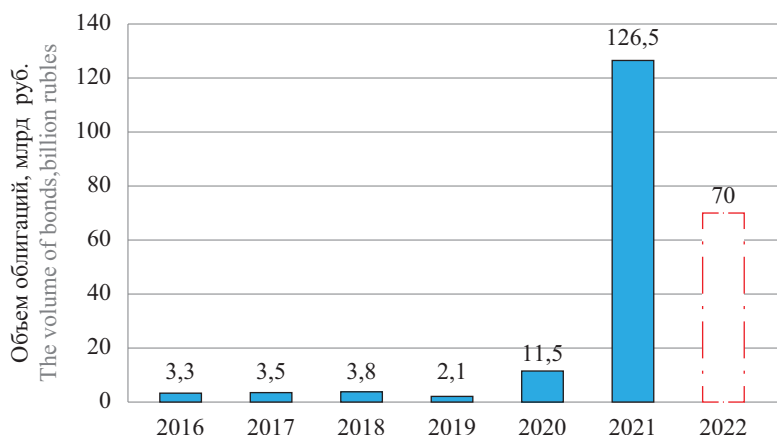


Рис. 5. Динамика эмиссии зеленых облигаций российских предприятий

Fig. 5. The dynamics of the issue of green bonds of Russian enterprises

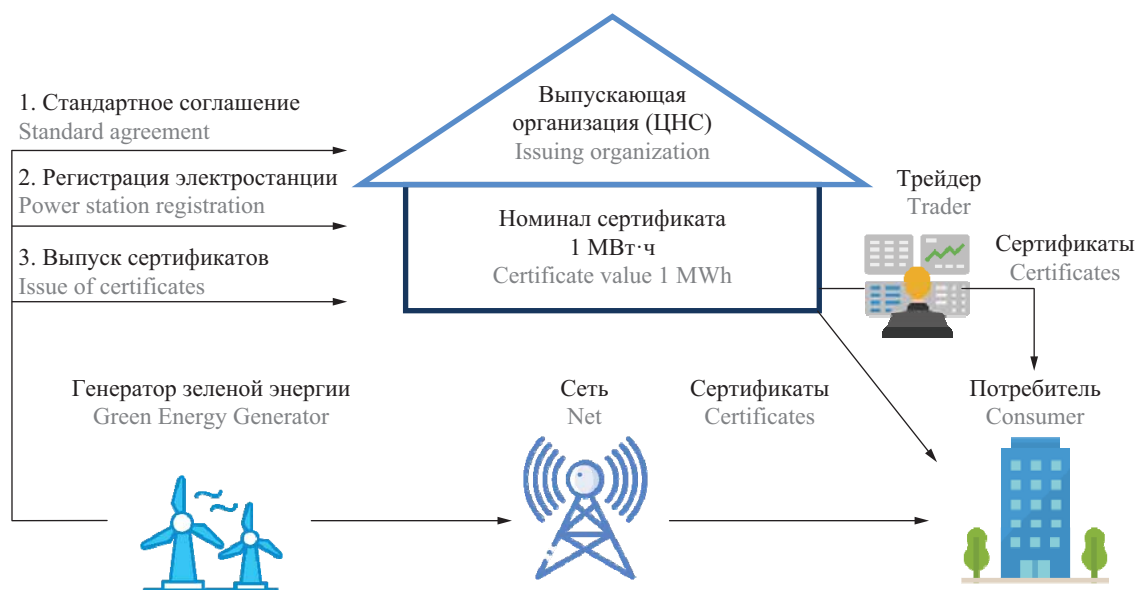


Рис. 6. Экосистема функционирования зеленых сертификатов I-REC

Fig. 6. Ecosystem of functioning of the I-REC certificate

В марте 2022 г. в рамках европейской санкционной политики международная платформа I-REC перестала действовать в РФ. Эта ситуация стала катализатором работы по созданию альтернативной национальной системы зеленых сертификатов.

Приведем международную статистику I-REC, определяющую аналитику эмитентов по последнему

отчетному периоду (российские генерирующие компании, как отмечалось ранее, исключены из верификации по стандарту I-REC) (рис. 7).

Сложные эпидемиологические и экономические условия только усиливали внимание правительств промышленно развитых стран к вопросам ESG. Зеленая повестка получила настолько значимый вес

на государственном и региональных уровнях в РФ, что уже 27 мая 2021 г. были выпущены первые «субсуверенные» (размещенные субъектом федерации) зеленые облигации на сумму 70 млрд рублей и сроком

обращения 7 лет. Привлеченные средства от размещения этих облигаций планируется направить на снижение выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов от автотранспорта в г. Москве.

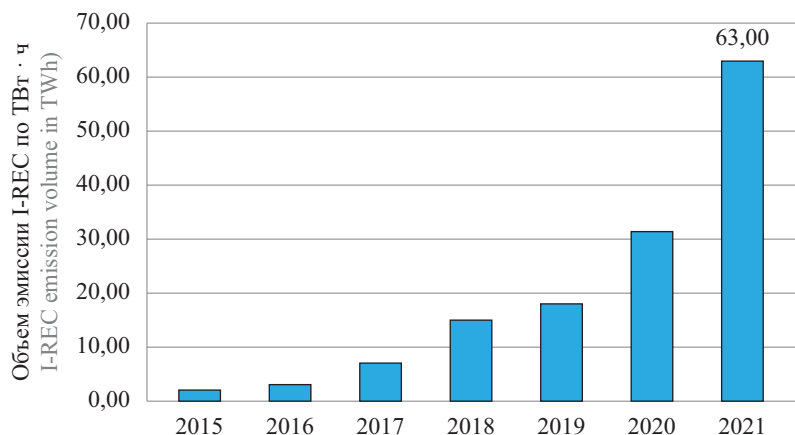


Рис. 7. Динамика выпуска сертификатов I-REC по объему генерированной энергии от ВИЭ

Fig. 7. Dynamics of issuance of I-REC certificates in terms of generated RES

Новый уровень развития ESG-принципы получили также за счет запуска регионального эксперимента в Сахалинской области, где выпущены первые 96 углеродных единиц, которые зарегистрированы в национальном реестре. С 1 сентября 2022 г. начал работать реестр углеродных единиц, компания «ДальЭнергоИнвест» верифицировала отчет о реализации проекта по использованию ВИЭ на присоединенных объектах и в мини-сетях в Сахалинской области. Она построила на о-ве Итуруп станцию на 648 солнечных батареях установленной мощностью 250 кВт и до 2031 г. планирует выпустить 1832 углеродные единицы. Оператором реестра углеродных единиц выступает АО «Контур», действующий при поддержке Газпромбанка и Московской Биржи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

ESG-повестка претерпевает существенные изменения в современном контексте. Данный факт обусловлен прежде всего текущей геополитической ситуацией, влияющей на государственные программные меры в вопросах, связанных с ESG, в том числе определивших перенос утверждения Плана реализации социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. Стремления крупных российских холдинговых предприятий к мировым трендам в области устойчивого развития ограничиваются барьерами, создаваемыми как частными зарубежными инвесторами и фондами, сократившими финансирование зеленых активов, так и отдельными бизнес-единицами, влияющими на экономический интерес в данной сфере. Так, последний вопрос может быть частично приведен на примере действий рейтинговых агентств, занижающих ESG-оценки российских организаций

(MCSI ограничил рейтинг российских компаний уровнем В, а правительственный — уровнем CCC)⁹.

Проведенное исследование демонстрирует актуальность темы с учетом новых условий развития рынка зеленого финансирования проектов и национальных приоритетов. В преддверии усиленной санкционной политики западных стран экспертным сообществом в июне 2021 г. было разработано «Руководство по ESG-трансформации предприятий» в рамках проекта «Климатически нейтральная хозяйственная деятельность: внедрение НДТ в Российской Федерации», в которое вошло три части: процессы и факторы на глобальном рынке; правовые, экономические и организационные условия, существующие в России для развития зеленого (ответственного) финансирования и ESG-трансформации российских компаний; потенциальные мероприятия для внедрения в бизнес-процессы ESG-факторов или факторов устойчивого развития (экологические, социальные факторы, а также факторы, относящиеся к качеству корпоративного управления), в том числе рекомендации по идентификации и институционализации ESG-качеств предприятия, принципы разработки внутренних документов и отчетности для соответствия международным и российским стандартам, рекомендации по получению ESG-рейтинга.

Новые условия исключения российских предприятий из системы I-REC являются не угрозой, а возможностью развития национального рынка зеленых бумаг, обеспечивающего интересы государства и снижение финансовой нагрузки предприятий по процедурам,

⁹ Уязвимая экология и устойчивая оборонная промышленность: что будет с ESG в России // Forbes. URL: <https://www.forbes.ru/forbeslife/463419-uazvimaa-ekologia-i-ustojcivaa-oboronnaa-promyslennost-cto-budet-s-esg-v-rossii>

связанным с международной сертификацией и проведением мероприятий, направленных на учет международных требований по устойчивому развитию.

В исследовании проведен анализ методологии индексов ESG и результатов оценки российских предприятий. Выявлены лидеры устойчивого развития ESG: НЛМК (черная металлургия), «Энел Россия» (электроэнергетика), «Полиметалл» (драгоценные металлы). Согласно рэнкингу RAEX-Europe демонстрируют наибольшую активность в следовании принципам устойчивого развития интегрированные нефтегазовые компании: «ЛУКОЙЛ» (индекс BBB), НОВАТЭК (индекс BBB), «Газпром» (индекс BBB), «Роснефть» (индекс BBB), «Газпром нефть» (индекс BBB), «Сахалин Энерджи» (индекс BBB), «Татнефть» (индекс BB), «Зарубежнефть» (индекс BB). Данные компании получили высокую оценку по управлению рисками и профилю ESG.

В общем подходе устойчивого развития внимание уделяют финансовым инструментам, обеспечивающим устойчивое развитие промышленных предприятий. В исследовании приведен анализ рынка зеленых сертификатов, который получит новое развитие в создаваемой национальной системе регистрации экологических бондов.

В работе раскрыта научная гипотеза исследования, которая заключается в необходимости соблюдения принципов ESG и успешной трансформации промышленности с учетом национальных интересов и приоритетов, а также национальных методологий и паттерна устойчивого развития экосистемы предприятия, способных стать важнейшим атрибутом экономической политики государства и развития отдельных отраслевых рынков. Данное исследование имеет значительный потенциал развития в условиях цифровой среды, которая позволит ускорить процесс протоколирования рынка, в том числе с использованием сквозной технологии распределенного реестра — блокчейна. Представленные аспекты служат новым подходом к развитию рынка ценных бумаг, создающих преимущества для предприятий, генерирующих энергоресурсы из ВИЭ, производителей продукции, заключающих договора на энергоснабжение с этими предприятиями и всех стейкхолдеров рынка зеленых финансовых инструментов, способных обеспечить новые возможности для сетевых инфраструктурных компаний и определить качество жизни как для городских агломераций, так и для промышленных зон.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Medvedeva Y.Y., Luchaninov R.S., Poluyanova N.V., Semenova S.V., Alekseeva E.A. The stakeholders' role in the corporate strategy creation for the sustainable development of Russian industrial enterprises // *Economies*. 2022. Vol. 10. Issue 5. P. 116. DOI: 10.3390/economies10050116
2. Verstina N., Solopova N., Taskaeva N., Meshcheryakova T., Shchepkina N. A new approach to assessing the energy efficiency of industrial facilities // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 2. P. 191. DOI: 10.3390/buildings12020191
3. Martínez-Ferrero J., Lozano M.-B. The nonlinear relation between institutional ownership and environmental, social and governance performance in emerging countries // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Issue 3. P. 1586. DOI: 10.3390/su13031586
4. Mukhtar B., Shad M.K., Woon L.F. Predicting the effect of environment, social and governance practices on green innovation: an artificial neural network approach // *International Conference on Information Systems and Intelligent Applications*. 2023. Pp. 527–539. DOI: 10.1007/978-3-031-16865-9_42
5. Suljić Nikolaj S., Olgić Draženović B., Buterin D. Green bonds — sustainable forms of financing // *Sustainable Business Management and Digital Transformation: Challenges and Opportunities in the Post-COVID Era*. 2023. Pp. 416–429. DOI: 10.1007/978-3-031-18645-5_26
6. Kabderian Dreyer J., Sharma V., Smith W. Warm-glow investment and the underperformance of green stocks // *International Review of Economics & Finance*. 2023. Vol. 83. Pp. 546–570. DOI: 10.1016/j.iref.2022.10.006
7. Lukšić I., Bošković B., Novikova A., Vrbensky R. Innovative financing of the sustainable development goals in the countries of the Western Balkans // *Energy, Sustainability and Society*. 2022. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1186/s13705-022-00340-w
8. Mahajan A., Majumdar K. Environmental policy stringency and comparative advantage of environmental sensitive goods: a study of textile exports in G20 countries // *Benchmarking: An International Journal*. 2022. Vol. 29. Issue 9. Pp. 2924–2951. DOI: 10.1108/BIJ-06-2021-0304
9. Gigante G., Manglaviti D. The ESG effect on the cost of debt financing: A sharp RD analysis // *International Review of Financial Analysis*. 2022. Vol. 84. P. 102382. DOI: 10.1016/j.irfa.2022.102382
10. Pástor L., Stambaugh R.F., Taylor L.A. Dissecting green returns // *Journal of Financial Economics*. 2022. Vol. 146. Issue 2. Pp. 403–424. DOI: 10.1016/j.jfineco.2022.07.007
11. Zhou G., Liu L., Luo S. Sustainable development, ESG performance and company market value: Mediating effect of financial performance // *Business*

Strategy and the Environment. 2022. Vol. 31. Issue 7. Pp. 3371–3387. DOI: 10.1002/bse.3089

12. Assous H.F. Saudi green banks and stock return volatility: gle algorithm and neural network models // *Economies*. 2022. Vol. 10. Issue 10. P. 242. DOI: 10.3390/economies10100242

13. Rodionova M., Skhvediani A., Kudryavtseva T. ESG as a booster for logistics stock returns — evidence from the us stock market // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Issue 19. P. 12356. DOI: 10.3390/su141912356

14. Zhang D. Do heterogenous subsidies work differently on environmental innovation? A mechanism exploration approach // *Energy Economics*. 2022. Vol. 114. P. 106233. DOI: 10.1016/j.eneco.2022.106233

15. Basu S., Vitanza J., Wang W., Zhu X.R. Walking the walk? Bank ESG disclosures and home mortgage lending // *Review of Accounting Studies*. 2022. Vol. 27. Issue 3. Pp. 779–821. DOI: 10.1007/s11142-022-09691-3

16. Gunawan J., Permatasari P., Sharma U. Exploring sustainability and green banking disclosures:

a study of banking sector // *Environment, Development and Sustainability*. 2022. Vol. 24. Issue 9. Pp. 11153–11194. DOI: 10.1007/s10668-021-01901-3

17. Li J., Li S. Environmental protection tax, corporate ESG performance, and green technological innovation // *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 10. DOI: 10.3389/fenvs.2022.982132

18. Rodionova M., Skhvediani A., Kudryavtseva T. ESG as a Booster for Logistics Stock Returns — Evidence from the US Stock Market // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Issue 19. P. 12356. DOI: 10.3390/su141912356

19. Zeng H., Li R.Y.M., Zeng L. Evaluating green supply chain performance based on ESG and financial indicators // *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 10. DOI: 10.3389/fenvs.2022.982828

20. Basu S., Vitanza J., Wang W., Zhu X.R. Walking the walk? Bank ESG disclosures and home mortgage lending // *Review of Accounting Studies*. 2022. Vol. 27. Issue 3. Pp. 779–821. DOI: 10.1007/s11142-022-09691-3

Поступила в редакцию 24 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 7 декабря 2022 г.

Одобрена для публикации 7 декабря 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Татьяна Сергеевна Мещерякова** — 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: 636518, Scopus: 56800721300, ResearcherID: 8915-2016, ORCID: 0000-0001-5610-6179; meshcheryakovats@mgsu.ru;

Максим Васильевич Черняев — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры национальной экономики; **Российский университет дружбы народов (РУДН)**; 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; РИНЦ ID: 850416, Scopus: 57195059657, ResearcherID: C-7959-2019, ORCID: 0000-0003-4638-5623; chernyaev-mv@rudn.ru.

Вклад авторов:

Мещерякова Т.С. — концепция исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Черняев М.В. — развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Received October 24, 2022.

Adopted in revised form on December 7, 2022.

Approved for publication on December 7, 2022.

BI O N O T E S : **Tatiana S. Meshcheryakova** — 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 RISC: 636518, Scopus: 56800721300, ResearcherID: 8915-2016, ORCID: 0000-0001-5610-6179; meshcheryakovats@mgsu.ru;

Maxim V. Chernyaev — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of National Economy; **Peoples' Friendship University of Russia (RUDN)**; 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; ID RISC: 850416, Scopus: 57195059657, ResearcherID: C-7959-2019, ORCID: 0000-0003-4638-5623; chernyaev-mv@rudn.ru.

Contribution of the authors:

Tatiana S. Meshcheryakova — research concept, development of methodology, writing the original text, final conclusions.

Maxim V. Chernyaev — development of methodology, revision of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.33

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1757-1765

Особенности проектирования инновационных строительных материалов на современном этапе развития отрасли

Елена Юрьевна Васильева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях, когда экономика России нацелена на инновационное развитие, а также на импортозамещение, особенно актуальна проблема разработки, массового производства и внедрения инновационных строительных материалов.

Материалы и методы. Использованы системный подход, метод научного синтеза, методы статистического и сравнительного анализа, исторический метод. Материалами для исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых; нормативно-правовые акты и стратегические документы в области производства строительных материалов; сведения из периодической печати; данные Федеральной службы государственной статистики, Комитета Российского Союза строителей по развитию промышленности строительных материалов, Национального объединения строителей (НОСТРОЙ), Рейтингового агентства строительного комплекса; статистические базы зарубежных стран; информация, предоставленная производителями строительных материалов.

Результаты. Изучены характеристики инновационных строительных материалов, определяющие специфику их разработки и внедрения: экспериментальный характер, наличие многих вариантов продукта, высокие проектные затраты, долгий срок и высокий риск проекта. Понятие «проектирование продукта» рассмотрено в узком и широком смысле. Показано, что проектирование при разработке инновационного строительного материала сегодня не ограничивается детальным проектированием, элементы проектирования должны иметь место и на других стадиях разработки продукта.

Выводы. В настоящее время требуется новая парадигма проектирования инновационных стройматериалов, рассматривающая задачу всесторонне: с точки зрения достижения необходимых, улучшенных свойств нового материала, востребованности рынком, максимизации прибыли от его производства и внедрения, а также надежности, экологичности и т.д. Разработана междисциплинарная иерархическая структура проектирования инновационного строительного материала, объединяющая ряд задач, относящихся к функциям менеджмента, маркетинга, исследования и проектирования, производства, финансов и охватывающих все фазы разработки строительных материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инновации, инновационные строительные материалы, проектирование и разработка инновационных продуктов, парадигмы проектирования инновационной продукции

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Васильева Е.Ю. Особенности проектирования инновационных строительных материалов на современном этапе развития отрасли // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 12. С. 1757–1765. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1757-1765

Автор, ответственный за переписку: Елена Юрьевна Васильева, elena.chibisova_metr@mail.ru.

Features of the innovation construction materials design at the current stage of the industry development

Elena Yu. Vasilyeva

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

ABSTRACT

Introduction. The problem of the development, mass production and introduction of the innovation construction materials is especially relevant in the conditions, when whole economy of Russia is aimed at the innovative development and import substitution as well.

Materials and methods. The system approach, the method of scientific synthesis, methods of statistic and comparative analysis, the historical method were used during this research. Works of domestic and foreign scientists, regulatory legal acts and strategic documents in the field of production of construction materials, sources from periodicals, data of Federal State Statistics Service, statistical bases of foreign countries, data of the Committee of the Russian Union of builders on the development of the construction materials industry, National consolidation of builders (NOSTROY), Rating Agency of the Construction Complex (RACC), as well as some information, provided by producers of construction materials, acted as the materials for the research.

Results. The author studied the nature of the innovation construction materials, defining the specifics of their development and introduction, such as experimental nature, availability of numerous options of the product, high project cost, long term and high project risk. The term “product design” is considered in the confined and extended sense. It is proved, that design is not limited to detailed design when developing the innovation construction material. Some elements of design have to take place at other stages of the product development as well.

Conclusions. A new paradigm of the innovation construction materials design, considering the matter comprehensively (in terms of achievement of the necessary, improved properties of new material, demand the market, profit maximizations from its production and introduction, reliability, environmental friendliness, etc.) is required in modern conditions. As the result of the research the author developed the cross-disciplinary hierarchical structure of the innovation construction material design, uniting many tasks relating to the functions of management, marketing, research and design, production, finance and covering all the phases of the construction materials development.

KEYWORDS: innovations, design and development of the innovation products, innovation construction materials

FOR CITATION: Vasilyeva E.Yu. Features of the innovation construction materials design at the current stage of the industry development. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(12):1757-1765. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1757-1765 (rus.).

Corresponding author: Elena Yu. Vasilyeva, elena.chibisova_metr@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Производство строительных материалов, как и другие отрасли экономики Российской Федерации, сегодня нацелено на инновационное развитие¹. Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года (далее Стратегия–2030) ставит цель «формирования высокотехнологичной, конкурентоспособной промышленности строительных материалов инновационного типа», которая была бы способна обеспечивать качественной и при этом доступной продукцией как внутренний, так и внешний рынок, и при этом способствовала бы снижению зависимости этой отрасли российской экономики от использования импортных технологий, оборудования и сырья, а также обеспечила занятость населения, получение дохода работниками и повышение их уровня жизни. Индикаторами достижения целей Стратегии–2030 выступают:

- доступность строительных материалов, в том числе инновационных (ориентир — не превышение в 2030 г. цен на стройматериалы по сравнению с ценами на продукцию обрабатывающих отраслей);
- технологичность строительных материалов (как результат, стоимость СМР в расчете на 1 м² сократится в 2030 г. на 20 % в сопоставимых ценах по сравнению с 2014 г.);
- распространение энергоэффективных строительных материалов (как результат, расходы на отопление жилых домов снизятся в 2030 г. на 20 % по сравнению с 2014 г.), экологичных строительных материалов;
- повышение конкурентоспособности отечественных строительных материалов (авторы Стратегии–2030 предполагали, что доля импортных стройматериалов в потреблении к 2030 г. сократится в 3 раза по сравнению с 2014 г.). Фактически уже

к 2022 г. доля импортных стройматериалов была невысока (например, по данным Минпромторга России — от 0,2 % строительного гипса до 12,2 % натуральных облицовочных материалов). К концу 2022 г., согласно каталогу импортозамещения, разработанному НОСТРОЙ, для 100 % проектов могут быть подобраны отечественные аналоги импортных материалов². Следующим этапом в развитии положительной тенденции импортозамещения должно стать увеличение доли инновационных отечественных материалов в общем объеме. Надежное и при этом не снижающее качества конечной продукции импортозамещение в строительном комплексе возможно только на основе его инновационного развития.

Таким образом, повышение инновационности способно стать важным фактором развития производства стройматериалов, строительства и других сфер, а также показателем роста уровня экономической безопасности отрасли [1]. Напротив, низкая доля инновационного сегмента на рынке строительных материалов может рассматриваться как фактор риска, способный снизить спрос и объемы потребления строительных материалов в РФ (согласно Объемам потребления основных видов строительных материалов на душу населения в Российской Федерации в период до 2030 г.³).

Безусловными достижениями отрасли производства строительных материалов являются: разработка модифицированных бетонов и различного рода

¹ Стратегия инновационного развития строительной отрасли Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/11870/>

² Об утверждении Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года : Распоряжение Правительства РФ от 10.05.2016 № 868-п. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420353735>

³ Объемы потребления основных видов строительных материалов на душу населения в Российской Федерации в период до 2030 года // Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года : разработан Минэкономразвития России. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144190/

химических добавок — модификаторов, кирпича с добавлением золы, стекломгнезитового листа, базальтопластиковой и стеклопластиковой арматуры, инфракрасных греющих панелей [2]. Инновационные строительные материалы включают как сформулированные, так и сборные изделия. Сборные изделия — это сборные железобетонные конструкции, стеклопакеты и т.п. Но большая часть строительных материалов — сформулированные. Сформулированные строительные материалы могут состоять из одного вещества (песок, гипс и др.), но чаще состоят из нескольких веществ с определенным составом (цемент, штукатурная смесь), а зачастую и с заданной микроструктурой (монокристаллической, поликристаллической или аморфной, обеспечивающей необходимые свойства)⁴ [3]. В настоящее время строительство, как и большинство отраслей промышленности, перешло от потребности в материалах с конкретным составом к предпочтению материалов, обладающих определенными свойствами (пониженный вес, тепло-, водо-, звукоизоляция, устойчивость к экстремальным температурам и т.д.) [4]. Фактически это означает преобладание на современном рынке материалов с высокой добавленной стоимостью⁵.

В науке и практике имеются достаточные знания для создания новых строительных материалов, но тем не менее с учетом современных требований к создаваемым продуктам существует необходимость развития новой парадигмы для успешного решения проблем проектирования инновационных строительных материалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованы системный подход, методы научного анализа, синтеза, сравнительный и статистический анализ, а также исторический метод.

Материалами для настоящего исследования послужили работы отечественных [5–7] и зарубежных [8–12] ученых; нормативно-правовые акты и стратегические документы в области производства строительных материалов; источники из периодической печати; данные Федеральной службы государственной статистики, Комитета Российской Федерации по развитию промышленности строительных материалов, Национального объединения строителей

⁴ Строительные материалы. Строение и свойства // Техническая строительная экспертиза. URL: <https://tse.expert/info-block/opinions/stroitelnye-materialy-stroenie-i-svoystva/>

⁵ Федеральная служба государственной статистики. Инновационные товары, работы, услуги, вновь внедренные или подвергавшиеся значительным технологическим изменениям в течение последних трех лет по видам экономической деятельности в целом по Российской Федерации. URL: <https://rosstat.gov.ru/search?q=инновационные+строительные+материалы>

(НОСТРОЙ), Рейтингового агентства строительного комплекса (РАСК); статистические базы зарубежных стран; информация, предоставленная производителями строительных материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Понятие «проектирование»⁶ подразумевает организацию и планирование деятельности по созданию нового продукта. Соответственно и для сформулированных, и для сборных изделий специалисты (инженеры, технологи, химики, физики) называют свою задачу проектированием. Новые сформулированные продукты обычно создаются путем объединения широких знаний о составах существующих продуктов с многочисленными научными экспериментами, и этот подход традиционно называют разработкой продукта. Таким образом, для многих строительных материалов имеет место экспериментальный характер разработки.

При поиске подходов к разработке и внедрению инновационных строительных материалов нужно принимать во внимание двойственный характер инновационного строительного материала (рис. 1).

С одной стороны, речь идет об инновационном материале, результате инновационной деятельности (нововведение, инновация), получившем практическую реализацию в виде нового продукта. В таком случае имеют место такие особенности инновационного проекта, как значительный объем финансовых вложений, долгий срок проекта, повышенная степень проектного риска [13].

С другой стороны, строительный материал — это либо сборное изделие (конструкция), либо сформулированное изделие — смесь веществ или материал, полученные в результате производственного процесса или выделенные в естественном состоянии в природе и предназначенные для дальнейшего использования для строительства, реконструкции, ремонта зданий и сооружений. Разработке многих новых строительных материалов свойственна специфика сформулированных изделий — это метод гипотезы или интуиции, а зачастую просто путь проб и ошибок. По этой причине разработка инновационных строительных материалов часто связана с большим количеством возможных вариантов, рецептов, сценариев [14, 15].

Но все же систематический подход к решению задач создания материала с необходимыми характеристиками должен преобладать над случайным поиском. Во-первых, это позволит сократить затраты, которые по инновационному проекту и так велики, что в свою очередь повлияет на показатели эффективности инновационного проекта и повысит его шансы на реализацию. Во-вторых, систематический подход

⁶ Энциклопедия терминов, определений и пояснений строительных материалов / под ред. В.П. Ложкина. 2016. URL: <http://enciklopediyastroj.ru/>

позволяет выбрать наилучшее решение и найти его быстрее и с меньшими издержками, чем при переборе случайных вариантов. Хотя и невозможно полностью обойтись без экспериментов, количество их следует минимизировать, свести работу к систематическому рассмотрению возможных составов строительных материалов (или изделий) до начала экспериментальной работы. Такую деятельность правильно называть «проектирование инновационного материала». С этой точки зрения цель проектирования

инновационного материала состоит в определении относительно небольшого количества вариантов, которые могут соответствовать предъявляемым требованиям и ожиданиям и которые можно проверить и скорректировать в ходе дальнейших экспериментов (испытаний). В таком случае мы можем рассматривать проектирование инновационного строительного материала как одну из фаз его разработки, которая должна предшествовать серии максимально целенаправленных экспериментов [16].



Рис. 1. Двойственный характер инновационных строительных материалов и определяемые ими особенности (рисунок автора)

Fig. 1. Dual nature of the innovation construction materials and the features, determined (created by the author)

В создании инновационных строительных материалов можно выделить две сферы [13]:

- 1) проектирования и разработки строительных материалов (решается проблематика состава материала);
- 2) технологического проектирования (происходит процесс разработки комплекта документации, включающий технологический раздел проекта)⁷.

По мнению автора [13], возможно и более широкое толкование понятия проектирования инновационных строительных материалов, которое включает целый ряд этапов (рис. 2).

На этапе разработки концепции (первом этапе) создаются и проходят первоначальный отбор идеи новых строительных материалов. Второй этап — проектирование на уровне системы, на этом этапе будущий материал концептуально дробится на подсистемы, т.е. ингредиенты. Третий этап — детальное проектирование, предполагает, что предложены исходный состав нового материала и технологический процесс. На четвертом этапе происходит прототипирование, тестирование и доработка материала. При переходе к серийному производству на пятом этапе определяются производственные возможности. Запуск материала в непрерывное производство проводится на завершающем шестом этапе [13].

Очевидно, что проектирование в узком смысле обычно связано с этапом детального проектирования. Однако и на других этапах разработки инновацион-

⁷ ГОСТ Р 56639-2015. Технологическое проектирование промышленных предприятий. Общие требования : введен 01.12.2016.

ного материала могут иметь место элементы проектирования.

Например, создание и первоначальный отбор идей продукта во время разработки концепции предполагают анализ с двух точек зрения:

- рынок готов принять (потребитель готов купить), т.е. получит ли инновационный материал коммерческое признание;
- реально изготовить при имеющемся уровне науки и производственных возможностях, т.е. применимы ли новые идеи в реальности.

Таким образом, технологические расчеты на этапе разработки концепции должны гарантировать, что

все идеи новых материалов реализуемы и целесообразны.

Далее, на этапе запуска материала в производство, как правило, требуется обеспечение качества продукта, а поскольку разработка методов оценки качества подразумевает понимание предполагаемого поведения продукта, технологические расчеты должны быть частью разработки методов оценки качества.

Все технологические расчеты, независимо от того, на каком этапе разработки и внедрения инновационного строительного материала они производятся, следует рассматривать как его проектирование.

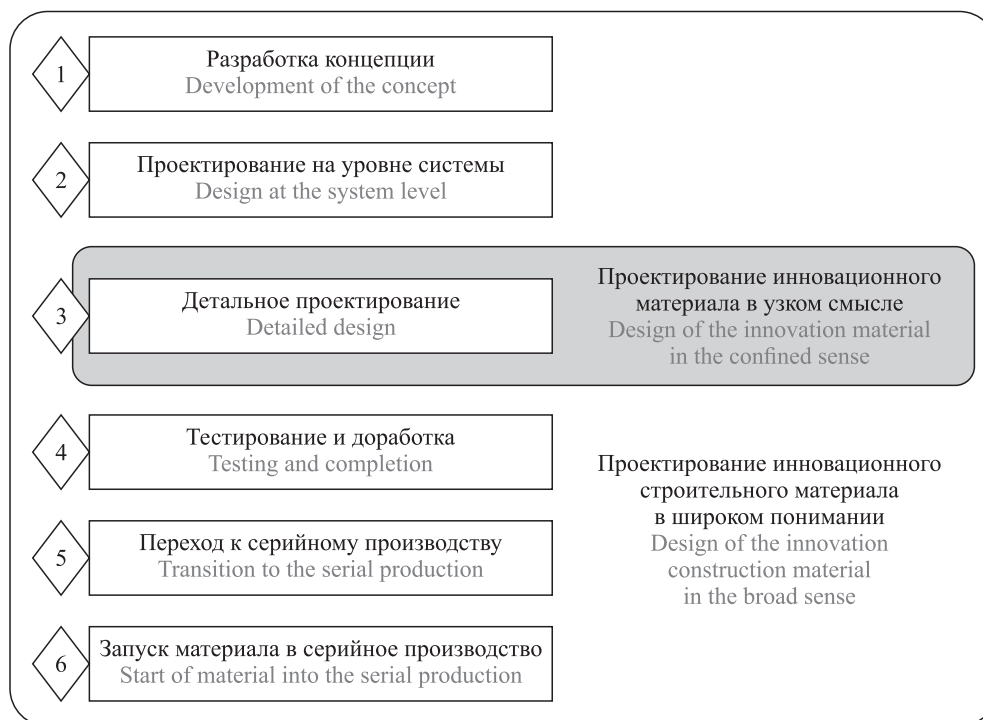


Рис. 2. Этапы реализации проектов по разработке инновационных строительных материалов (рисунок автора)

Fig. 2. Stages of the implementation of projects on the innovation construction materials development (created by the author)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленный подход к проектированию строительных материалов дает повод для дискуссии относительно возможной парадигмы в отрасли производства строительных материалов [13].

Напомним, что в начале XX в. промышленность не имела никакой парадигмы, технологи во всех странах не искали каких-либо принципов, а изучали производственный процесс лишь относительно конкретного материала (продукта, изделия).

Примерно с 1915 по 1950 гг. в различных отраслях промышленности сформировалась I парадигма — парадигма типового процесса. В ее рамках проблема уже не сводится к производству конкретной продукции, а происходит поиск оптимального типового процесса, который лучше всего подошел бы для

производства желаемой продукции с требующимися свойствами. Парадигма типовых процессов и сегодня может быть полезна, хотя и не решает всех задач, поставленных перед современным производством.

В преодолении ограниченности парадигмы типового процесса с 1950 г. распространение получила II парадигма — парадигма технологической науки. В ее рамках к задаче создания нового продукта подходят с точки зрения фундаментальных наук (физики, химии, биологии), а для описания свойств новых материалов, особенностей их создания и эксплуатации — с помощью математических уравнений. Дальнейшее свое развитие парадигма получила благодаря использованию информационных технологий, роботизации и цифровизации [17]. Цель парадигмы — обеспечить низкзатратный технологический процесс. Эта цель вполне достижима инструментами

фундаментальных наук, так как все затраты, в том числе связанные с долговечностью, надежностью и другими свойствами инновационного материала, поддаются математической обработке и количественной оценке [18–20]. Данная парадигма применима и в настоящее время. Однако недостатками парадигмы технологической науки являются сосредоточение внимания на производстве и игнорирование вопросов разработки новых свойств материалов.

Между тем в современных условиях (и в соответствии со стратегическими целями развития строительной отрасли страны) актуальна цель получить скорее не материал с наименьшей себестоимостью, а материал с наибольшей добавленной стоимостью, обеспеченной за счет его улучшенных свойств (лучшей экологичности, меньшей трудоемкости и т.д.) [21, 22]. В таком случае связь между достигнутыми свойствами инновационного материала (с большей стоимостью) и прибылью от проекта по его разработке и внедрению неочевидна. Целесообразность подобного проекта не может быть обоснована с точ-

ки зрения исключительно технологической науки [23].

Данный пробел преодолевает III парадигма — парадигма технологического проектирования продукта, распространившаяся с конца 1980-х гг. Сегодня структура проектирования инновационного материала включает несколько задач:

- 1) определить потребности потенциальных потребителей;
- 2) сгенерировать идеи для удовлетворения этих потребностей;
- 3) выбрать среди идей наиболее удачные и подходящие;
- 4) изготовить материал;
- 5) обеспечить внедрение материала на рынок;
- 6) обеспечить окупаемость проекта.

При проектировании инновационного материала приходится охватывать несколько аспектов. Проектирование инновационного материала на всех фазах работы приобретает междисциплинарный характер, что схематично представлено на рис. 3.



Рис. 3. Междисциплинарная иерархическая структура проектирования инновационного строительного материала (рисунок автора)

Fig. 3. A cross-disciplinary hierarchical structure of the innovation construction material design (created by the author)

Итак, создание инновационных строительных материалов является важным условием реализации Стратегии инновационного развития строительной отрасли Российской Федерации на период до 2030 года

и Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года. Анализ отраслевой информации показал, что определенные успехи в ин-

новационном направлении уже достигнуты в производстве строительных материалов и можно выделить те требования, которым соответствуют вновь создаваемые материалы:

- 1) в целях снижения себестоимости материала, а следовательно, и конечной строительной продукции — использование в производстве недорогих компонентов;
- 2) максимально безотходное производство, использование вторичного сырья;
- 3) сокращение экологических последствий при производстве материалов и изделий;
- 4) сокращение трудозатрат;
- 5) применение надежных и несложных технологий, преимущественно отечественных;
- 6) сокращение необходимых для производства площадей, что в свою очередь позволяет сокращать расходы на их содержание и эксплуатацию;
- 7) применение преимущественно универсального оборудования, что обеспечит возможность изготовления на одной и той же производственной линии нескольких материалов или изделий, снизит вероятность простоев, позволит быстрее реагировать на потребности рынка.

Необходимость обеспечения перечисленных требований позволяет сделать вывод о том, что, хотя проектирование инновационного строительного материала ассоциируется прежде всего с этапом детального проектирования, и на других стадиях проекта проектирование имеет место (это подтверждает анализ содержания работ на каждом из этапов реализации проекта по разработке и внедрению инновационных строительных материалов). То есть мы можем считать проектированием инновационного строительного материала все действия по проектированию на всех этапах его разработки.

Более того, при проектировании современных материалов с наибольшей добавленной стоимостью, полученной за счет улучшенных свойств, невозможно обойтись исключительно возможностями технологической науки. Нынешняя парадигма требует решать задачи в нескольких аспектах: управление инновационным проектом, изучение рынка, проектирование материала (в узком смысле), проектирование процесса и производство, экономический анализ и обеспечение финансовой эффективности проекта разработки и внедрения инновационного материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дьяченко И.И. Инновационное производство строительных материалов как фактор увеличения уровня экономической безопасности отрасли // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2011. № 1. С. 10–13.
2. Зайцева К.Н. Радикальные инновации в производстве строительных материалов: риски, проблемы внедрения // Фундаментальные исследования. 2019. № 5. С. 36–39.
3. Fung K.Y., Ng K.M., Nakajima S., Wibowo C. A systematic iterative procedure for determining granulator operating parameters // AIChE Journal. 2006. Vol. 52. Issue 9. Pp. 3189–3202. DOI: 10.1002/aic.10940
4. Seider W.D., Seader J.D., Lewin D.R., Widagdo S. Product and process design principles. Synthesis, analysis, and evaluation. 3rd ed. John Wiley & Sons, 2009.
5. Avramenko Y., Kraslawski A. Similarity concept for case-based design in process engineering // Computers & Chemical Engineering. 2006. Vol. 30. Issue 3. Pp. 548–557. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2005.10.011
6. Коваленко Я.В., Кудрявцева Т.Ю. Проблемы процесса коммерциализации инноваций в России // Сборник научных трудов научно-практической конференции ВШГиФУ. 2016.
7. Кудрявцева Т.Ю., Схведиани А.Е., Горовой А.А. Сравнительный анализ динамики развития промышленного сектора экономики РФ в контексте перехода к новому технологическому укладу // Экономика и предпринимательство. 2017. № 12–1 (89). С. 113–119.
8. Grossmann I.E. Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment // Computers & Chemical Engineering. 2004. Vol. 29. Issue 1. Pp. 29–39. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2004.07.016
9. Gani R., Ng K.M. Product design — molecules, devices, functional products, and formulated products // Computers & Chemical Engineering. 2015. Vol. 81. Pp. 70–79. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2015.04.013
10. Gutierrez E., Sandstrom G.O., Janhager J., Ritzen S. Innovation and decision making: understanding selection and prioritization of development projects // 4th IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology. 2008. DOI: 10.1109/icmit.2008.4654386
11. Hill M. Product and process design for structured products // AIChE Journal. 2004. Vol. 50. Issue 8. Pp. 1656–1661. DOI: 10.1002/aic.10293
12. Von Hippel E. Lead users: a source of novel product concepts // Management Science. 1986. Vol. 32. Issue 7. Pp. 791–805. DOI: 10.1287/mnsc.32.7.791
13. Васильева Е.Ю. Управление эффективностью инновационных проектов в химической промышленности : дис. ... канд. экон. наук. СПб., 2020. 229 с.

14. Frigione M., de Aguiar J.L.B. Innovative materials for construction // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 23. P. 5448. DOI: 10.3390/ma13235448
15. Soliman A., Hafeez G., Erkmen E., Ganesan R., Ouf M., Hammad A. et al. Innovative construction material technologies for sustainable and resilient civil infrastructure // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 60. Pp. 365–372. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.248
16. Ng K.M., Wibowo C. Beyond process design: The emergence of a process development focus // *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2003. Vol. 20. Issue 5. Pp. 791–798. DOI: 10.1007/bf02697278
17. Байбурун А.Х., Кочарин Н.В. Применение цифровых технологий в строительстве : учебное пособие. Челябинск : Библиотека А. Миллера, 2020. 167 с.
18. Егорова А.В. Управление затратами на предприятиях промышленности строительных материалов в условиях нестабильной экономической среды // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 12–11. С. 2393–2397.
19. Егоров А.Н., Шприц М.Л., Нагманова А.Н. Инновационность в строительной сфере экономики как инструмент снижения стоимости, сокращения

сроков и повышения качества строительства // *Проблемы современной экономики*. 2011. № 3 (39). С. 251–252.

20. Васильева Е.Ю. Комплексный подход к оценке привлекательности инновационного проекта // *Экономика и предпринимательство*. 2019. № 11 (112). С. 698–703.

21. Мещерякова Т.С., Чибисова Е.Ю. Формирование системы экологической стандартизации в строительной отрасли в России // *Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сб. тр. XX Междунар. межвуз. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых*. 2017. С. 729–731.

22. Виньков А., Имамудинов И., Медовников Д., Оганесян Т., Розмирович С., Хазбиев А. и др. Инновации в строительном кластере: барьеры и перспективы // *RAEX Аналитика*. 2007.

23. Vasilyeva E., Krupnov Y. Development of the methodological approach to the comprehensive assessment of the innovative project effectiveness // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. P. 10037. DOI: 10.1051/e3sconf/202016410037

Поступила в редакцию 24 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 6 декабря 2022 г.

Одобрена для публикации 6 декабря 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: Елена Юрьевна Васильева — кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента и инноваций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 702671, Scopus: 57192662530, ResearcherID: AAD-1693-2019, ORCID: 0000-0001-7797-1954; elena.chibisova_metr@mail.ru.

REFERENCES

1. Dyachenko I. Innovative production of building materials as factor increasing level of economic security of industry. *Intellect. Innovations. Investments*. 2011; 1:10-13. (rus.).
2. Zaytseva K.N. Radical innovations in the manufacture of construction materials: risks, problems of implementation. *Fundamental Research*. 2019; 5:36-39. (rus.).
3. Fung K.Y., Ng K.M., Nakajima S., Wibowo C. A systematic iterative procedure for determining granulator operating parameters. *AIChE Journal*. 2006; 52(9):3189-3202 DOI: 10.1002/aic.10940
4. Seider W.D., Seader J.D., Lewin D.R., Widagdo S. *Product and process design principles. Synthesis, analysis, and evaluation*. 3rd ed. John Wiley & Sons, 2009.
5. Avramenko Y., Kraslawski A. Similarity concept for case-based design in process engineering. *Computers & Chemical Engineering*. 2006; 30(3):548-557. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2005.10.011
6. Kovalenko Ya.V., Kudryavtseva T.Yu. Problems of the process of commercialization of innovations in Russia. *Collection of scientific works of academic and research conference VSHGIFU*. 2016. (rus.).
7. Kudryavtseva T.J., Skhvediani A.E., Gorovoy A.A. Comparative analysis of the Russian industrial sector development in the context of transition to a new technological paradigm. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2017; 12-1(89):113-119. (rus.).
8. Grossmann I.E. Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment. *Computers & Chemical Engineering*. 2004; 29(1):29-39. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2004.07.016
9. Gani R., Ng K.M. Product design — molecules, devices, functional products, and formulated products. *Computers & Chemical Engineering*. 2015; 81:70-79. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2015.04.013
10. Gutierrez E., Sandstrom G.O., Janhager J., Ritzen S. Innovation and decision making: understand-

ding selection and prioritization of development projects. *4th IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology*. 2008. DOI: 10.1109/icmit.2008.4654386

11. Hill M. Product and process design for structured products. *AIChE Journal*. 2004; 50(8):1656-1661. DOI: 10.1002/aic.10293

12. Von Hippel E. Lead users: a source of novel product concepts. *Management Science*. 1986; 32(7): 791-805. DOI: 10.1287/mnsc.32.7.791

13. Vasilyeva E.Yu. *Management of the efficiency of innovation projects in chemical industry : thesis ... Candidate of Economic Sciences*. St. Petersburg, 2020; 229 (rus.).

14. Frigione M., de Aguiar J.L.B. Innovative materials for construction. *Materials*. 2020; 13(23):5448. DOI: 10.3390/ma13235448

15. Soliman A., Hafeez G., Erkmen E., Ganesan R., Ouf M., Hammad A. et al. Innovative construction material technologies for sustainable and resilient civil infrastructure. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 60: 365-372. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.248

16. Ng K.M., Wibowo C. Beyond process design: The emergence of a process development focus. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2003; 20(5):791-798. DOI: 10.1007/bf02697278

17. Bayburin A.H., Kocharin N.V. *Use of digital technologies in construction*. Chelyabinsk, A. Miller's library, 2020; 167. (rus.).

18. Egorova A.V. Cost management on the enterprises of construction materials industry in a period of volatile economic environment. *Fundamental Research*. 2014; 12-11:2393-2397. (rus.).

19. Egorov A.N., Shprits M.L., Nagmanova A.N. Innovativeness in the construction sphere of economy as an instrument of lowering its costs, shortening the terms of construction, and increasing of its quality. *Problems of Modern Economy*. 2011; 3(39):251-252. (rus.).

20. Vasilyeva E.Yu. Comprehensive approach to the assessment of the innovative project attractiveness. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2019; 11(112):698-703. (rus.).

21. Meshcheryakova T.S., Chibisova E.Yu. Forming of the system of ecological standardization in the construction industry in Russia. *Construction — forming of living environment : collection of works XX of the International interuniversity academic and research conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists*. 2017; 729-731. (rus.).

22. Vinkov A., Imamutdinov I., Medovnikov D., Oganessian T., Rozmirovich S., Hazbiyev A. et al. Innovations in the construction cluster: barriers and prospects. *RAEX of the Analyst*. 2007. (rus.).

23. Vasilyeva E., Krupnov Y. Development of the methodological approach to the comprehensive assessment of the innovative project effectiveness. *E3S Web of Conferences*. 2020; 164:10037. DOI: 10.1051/e3sconf/202016410037

Received October 24, 2022.

Adopted in revised form on December 6, 2022.

Approved for publication on December 6, 2022.

B I O N O T E S : **Elena Yu. Vasilyeva** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 702671, Scopus: 57192662530, ResearcherID: AAD-1693-2019, ORCID: 0000-0001-7797-1954; elena.chibisova_metr@mail.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовков, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов. Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (\mathbf{a} , \mathbf{b} и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников **на английском языке (reference)** оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 1111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество 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 источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi notes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО 4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2023 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код плательщика))

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО 4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2023 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код плательщика))

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 14-23), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

