

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 16. Выпуск 4
2021**

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

Сквозной номер 149

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 16. Issue 4
2021**

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	26.04.2021.
Подписан в свет	30.04.2021.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,05. Тираж 100 экз. Заказ № 69

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 РААСН, 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

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

Анвер Идрисович Бурханов, д-р физ.-мат. наук, доц., зав. каф. физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Российская Федерация

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, проф., Университет Жилина, Словацкая Республика

Забигнев Вуйчицки, д-р, проф., Вроцлавский технологический университет, Республика Польша

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

Милан Голицки, д-р, проф., Институт Клокнера Чешского технического университета в Праге, Чешская Республика

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

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

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

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

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, 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., проф. кафедры Технологии вяжущих веществ и бетонов, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Анна Александровна Дядичева

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Корректор: Любовь Владимировна Светличная

Дизайн и верстка: Ольга Григорьевна Горюнова

Перевод на английский язык: Ольга Сергеевна Конакова

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., проф. каф. металлических и деревянных конструкций, проректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакционный совет

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

Юрий Михайлович Баженов, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии вяжущих веществ и бетонов, 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, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р архитектуры, проф., директор, Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «ЦНИИП Минстроя России» Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ), Москва, Российская Федерация

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

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

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

Александр Витальевич Гинзбург, д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, НИУ МГСУ, 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. кафедры 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» (НИУ «МЭИ»), 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, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., 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, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Владимир Львович Мондрус, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН, 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

Екатерина Владимировна Нежникова, д-р экон. наук, доц., проректор, зав. каф. экономики и управления в строительстве, 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., зав. каф. водоснабжения и водоотведения, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Евгений Иванович Пупырев, почетный член Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., консультант каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, 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, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., проф., 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., академик и вице-президент РААСН, 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, профессор, 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

Павел Александрович Хаванов, д-р техн. наук, проф., проф. каф. теплогоснабжения и вентиляции, НИУ МГСУ, Москва, 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:	26.04.2021

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

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

Anver I. Burkhanov, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

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

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

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

Stanislav Jemioło, 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

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, Wrocław University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Anna A. Dyadicheva* **Corrector:** *Lyubov' V. Svetlichnaya*

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

Russian-English translation: *Ol'ga S. Konakova*

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

Yuri M. Bazhenov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 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

Alexander V. Ginzburg, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Pavel A. Havanov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 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

Ekaterina V. Nezhnikova, 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

Evgeny I. Pupyrev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 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

Viktar 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

Yas'kova N. Yur'evna, 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

М.Н. Нурмамедов

Проблемы сохранения архитектурно-градостроительного наследия исторического поселка Лагич в Азербайджане	403
--	------------

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

Ил.Т. Мирсаяпов, И.А. Антаков, А.Б. Антаков

К расчету прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой	413
--	------------

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Г.В. Мартынов, Д.Е. Монастырева, Н.С. Астафьева

Клеевое соединение композиционных материалов в условиях ускоренного климатического старения	429
--	------------

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В.И. Теличенко, А.А. Бенуж, Е.А. Сухина

Межгосударственные «зеленые» стандарты для формирования экологически безопасной среды жизнедеятельности	438
--	------------

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, А. Осман

Осадка и несущая способность водонасыщенного основания фундамента конечной ширины при статическом воздействии	463
--	------------

А.С. Анишаков, И.Г. Кантаржи

Верификация численной гидродинамической модели кольского залива	473
--	------------

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

О.Д. Самарин

Расчет температуры воздуха в помещении по безразмерным параметрам при интегральном регулировании климатических систем.	486
---	------------

Л.И. Максимов, В.В. Миронов, С.В. Максимова, К.В. Кусков

Постобработка осадков станций обезжелезивания для выявления их ресурсного потенциала	493
---	------------

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.А. Дорф, Б.К. Пергаменник

Совершенствование технологии устройства сухой защиты шахты реактора АЭС	506
--	------------

Требования к оформлению научной статьи	513
---	------------

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Magomed N. Nurmamedov

Problems of preservation of architectural and urban heritage of the historical village of Lahij in Azerbaijan 403

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

Ilshat T. Mirsayapov, Igor A. Antakov, Alexey B. Antakov

To the design of the deflections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars 413

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Gleb V. Martynov, Daria E. Monastyreva, Natalia S. Astafieva

Adhesive compound of composite materials in conditions of accelerated climatic aging 429

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Valeriy I. Telichenko, Andrey A. Benuzh, Elena A. Suhinina

Interstate green standards of formation sustainable built environment vital activity. 438

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Zaven G. Ter-Martirosyan, Armen Z. Ter-Martirosyan, Ahmad Othman

Settlement and bearing capacity of water-saturated soils of foundations of finite width under static impact 463

Alexander S. Anshakov, Izmail G. Kantarzh

Verification of the numerical hydrodynamic model of the Kola bay 473

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Oleg D. Samarin

Calculation of indoor air temperature using dimensionless parameters for integrated climate control systems . . . 486

Lev I. Maksimov, Viktor V. Mironov, Svetlana V. Maksimova, Konstantin V. Kuskov

Iron removal stations' sludges postprocessing for its resource potential identification 493

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Valery A. Dorf, Boris K. Pergamenchik

Updating of dry shielding of nuclear power plant reactor vessel 506

Requirements for research paper design 513

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:

05.02.22 — Организация производства (строительство) (технические науки);

05.23.01 — Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);

05.23.02 — Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);

05.23.03 — Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки);

05.23.04 — Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки);

05.23.05 — Строительные материалы и изделия (технические науки);

05.23.07 — Гидротехническое строительство (технические науки);

05.23.08 — Технология и организация строительства (технические науки);

05.23.16 — Гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);

05.23.17 — Строительная механика (технические науки);

05.23.19 — Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки);

05.23.20 — Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (технические науки, архитектура);

05.23.21 — Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки, архитектура);

05.23.22 — Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки, архитектура);

08.00.05 — Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (экономические науки).

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

Проблемы сохранения архитектурно-градостроительного наследия исторического поселка Лагич в Азербайджане

М.Н. Нурмамедов

*Азербайджанский архитектурно-строительный университет (АзАСУ); г. Баку,
Азербайджанская Республика*

АННОТАЦИЯ

Введение. Среди исторических городов и поселений Азербайджана поселок Лагич является одним из уникальных. Высокоразвитое ремесло, особенно медное производство, кузнечное дело, ковроделие прославили лагичских мастеров не только в Азербайджане, но и за его пределами. Своеобразная планировочная структура и архитектура Лагича формировались под влиянием ремесленного производства. К сожалению, как и многие древние поселения, Лагич сталкивается с деградацией, связанной с социально-техническими процессами современной цивилизации.

Материалы и методы. Использованы теоретический анализ научной литературы, графические материалы и письменные источники. Методы исследования основываются на системном, пространственном и социально-функциональном подходах.

Результаты. Проанализировано текущее состояние Лагича, выявлены проблемы, создающие угрозу архитектурно-градостроительной среде поселка. Рассмотрены варианты возрождения ремесленного производства, которое непосредственно взаимосвязано с архитектурно-строительной традицией поселка. Подчеркивается определяющая роль туризма в жизни Лагича и его жителей, при этом отмечается опасность, вызванная ростом туризма.

Выводы. На основе опыта сохранения среды в зарубежных исторических городах автором предлагается применение современных подходов в решении проблем, связанных с управлением и использованием историко-культурного наследия в Лагиче. Следует уделить внимание комплексному решению проблем с учетом архитектурно-градостроительных, социально-экономических и административно-управленческих вопросов. Учитывая особенность Лагича как памятника мирового значения, необходим ряд документов по сохранению как отдельных памятников, так и исторических кварталов в целом. Только такой подход откроет путь к решению многих проблем и создаст благоприятные условия для развития Лагича с сохранением его архитектурно-градостроительного наследия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Лагич, исторический город, памятник градостроительства, архитектура, ремесленный центр, историческое наследие, туризм

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Нурмамедов М.Н. Проблемы сохранения архитектурно-градостроительного наследия исторического поселка Лагич в Азербайджане // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 4. С. 403–412. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.403-412

Problems of preservation of architectural and urban heritage of the historical village of Lahij in Azerbaijan

Magomed N. Nurmamedov

Azerbaijan University of Architecture and Construction (AUAC); Baku, Republic of Azerbaijan

ABSTRACT

Introduction. Among the historical towns and settlements of Azerbaijan, the village of Lahij is one of the unique. Highly developed crafts, especially copper production, blacksmithing, and carpet making glorified Lahij masters not only in Azerbaijan but also abroad. The peculiar planning structure and architecture of Lahij were formed under the influence of craft production. Unfortunately, like many ancient settlements, Lahij is facing degradation associated with the socio-technical processes of modern civilization.

Materials and methods. The paper uses theoretical analysis of scientific literature, graphic materials, and written sources. Research methods are based on systemic, spatial, and socio-functional approaches.

Results. This article analyses the current state of the identified problems threatening the architectural and urban environment of the village of Lahij. Consideration is being given to ways of reviving craft production which is directly related to the architectural and construction tradition of the village. The article emphasizes the crucial role of tourism in the life of Lahij and its residents, noting also the danger posed by the growth of tourism.

Conclusions. Based on the experience of preserving the environment in foreign historical towns, the author suggests using modern approaches in solving problems related to the management and use of the historical and cultural heritage in Lahij. Attention should be paid to the complex solution of problems considering architectural and urban planning, socio-economic and administrative-managerial issues.

KEYWORDS: Lahij, historical town, monument of urban planning, architecture, craft center, historical heritage, tourism

FOR CITATION: Nurmamedov M.N. Problems of preservation of architectural and urban heritage of the historical village of Lahij in Azerbaijan. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):403-412. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.403-412 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Территория Азербайджана богата историческими городами и поселениями. Возникшие в глубокой древности такие города, как Баку, Шамахи, Гянджа, Нахичевань, Барда, Шеки, Губа и другие сегодня являются важными административно-культурными центрами [1]. Соприкосновение исторического наследия и современной культуры ставит перед обществом серьезные задачи по их гармоничному существованию.

Лагич — один из исторических городков Азербайджана (определение «городок» дают арабоязычные и персоязычные средневековые источники; сегодня Лагич — поселок городского типа), известный как ремесленный центр, возник в раннесредневековый период, особо прославился медным ремеслом и оружейным делом. На рубеже XVII–XIX вв. изделия местных мастеров были известны далеко за пределами Азербайджана [2]. В разных источниках и трудах авторов, таких как В. Легкобытов¹ [1], Н. Абелов² [2], А. Пиралов³ [3] встречаются сообщения о развитом медном производстве и оружейном мастерстве лагичцев.

Ремесленники Лагича производили различную продукцию, которая наряду с высокими функциональными качествами отличалась большим художественным вкусом украшения. Изделия лагичских мастеров имели огромный успех в краевых, всероссийских и международных выставках.

В 1873 г. в специальной газете Международной Венской выставки писали, что посуда, показанная на выставке, получила всеобщее признание, еще раз подтвердив славу лагичских умельцев⁴ [4]. «Кавказский календарь» как событие года отмечает, что на выставке произведений Закавказского края 1850 г. отличилась медная посуда Мамед Кадыра из селения Лагич, который был представлен к «денежной награде»⁵ [5].

Е.Г. Вейденбаум в работе, относящейся к семидесятым годам XIX в., называет Лагич «одним из глав-

ных пунктов производства огнестрельного оружия и медной посуды для восточной половины Кавказа и Персии»⁶ [6].

А.П. Фитуни об оружейном деле Лагича сообщает следующее: «Лагичцы в старину в период ханской жизни (40-е годы XVIII в. – 30-е годы XIX в.) Азербайджана занимались также выделкой оружия как оборонительного, так и наступательного, холодного и огнестрельного... Они являлись главными поставщиками Ширванского оружия: кинжалов, шашек, кремневых пистолетов, ружей, особенно красивых пороховниц, но большей частью из меди»⁷ [7].

Со второй половины XIX в. в связи с развитием промышленности начавшийся спад ремесленного производства повлиял и на жизнь городка. Лагич постепенно стал терять ту славу, которую имел благодаря своим жителям-ремесленникам, но, несмотря на такой непреодолимый процесс, он, хоть и частично, но сумел сохранить традиции и секреты ремесел, которыми местные мастера владеют и по сей день (рис. 1). В 2015 г. медное производство Лагича было включено в список нематериального наследия ЮНЕСКО⁸ [8].

Лагич привлекает своей неповторимой градостроительной структурой и своеобразной архитектурой. Историко-культурный государственный заповедник⁹ [9] и памятник мирового значения¹⁰ [10] является музеем под открытым небом: живая, развивающаяся архитектурная среда, где памятники архитектуры тесно соприкасаются с современной жизнью людей.

Лагичцы живут и работают среди памятников. Поселок-заповедник развивается, расширяется согласно сегодняшним требованиям общества. К со-

¹ Легкобытов В. Ширванская провинция // ОРВК. Ч. III. СПб., 1836.

² Абелов Н.А. Экономический быт государственных крестьян Геокчайского и Шемахинского уездов Бакинской губернии // МИЭБГКЗК. Т. VI. Тифлис, 1887.

³ Пиралов А. Краткий очерк кустарных промыслов Кавказа. Тифлис, 1900.

⁴ Записки Кавказского общества сельского хозяйства. № 5–6. Тифлис, 1873.

⁵ Кавказский календарь на 1851 г. Тифлис, 1850.

⁶ Вейденбаум Е.Г. Заметки об употреблении камня и металлов у кавказских народов // ИКОРГО. Т. IV, Тифлис, 1876–1877.

⁷ Фитуни А.П. История последней столицы Ширвана // Известия Азербайджанского комитета охраны памятников старины, искусства и природы (Азкомстарис). Вып. III. Баку, 1927.

⁸ Lahic misgərlik sənəti. URL: <http://unesco.preslib.az/az/page/MILV0EvK4F>

⁹ О создании государственного историко-культурного заповедника поселка Лагич : Постановление Совета Министров Азербайджанской ССР № 508 от 23.12.1980.

¹⁰ Об утверждении распределения по важности недвижимых памятников истории и культуры, взятых под государственную защиту на территории Азербайджанской Республики : Постановление Кабинета Министров Азербайджанской Республики № 132 от 02.08.2001.

жалению, это происходит без соответствующего градостроительного контроля, не имея ни генерального плана, ни плана регенерации, консервации или реставрации, создающего научно-техническую базу для сохранения культурного и исторического наследия городка [3]. В 1989 г. был разработан генеральный план Лагича, но практически с момента утверждения он потерял свою актуальность в связи с определенными изменениями в тот период в политико-экономической жизни страны.

Архитектурно-градостроительный облик Лагича постепенно утрачивает свой первозданный вид под воздействием социальных и технологических процессов, востребованных современным обществом. Актуальность темы заключается в том, что Лагич по сей день не имеет генерального плана, необходимого для целенаправленного регулирования развития поселка, четкого определения границы исторической части. На территории заповедника возводятся новые строения, часто нарушающие исторически сформировавшуюся архитектурную среду и планировочную структуру. Важно отметить, что растущий поток туристов, посещающих Лагич за последние годы, и вытекающие из этого проблемы, связанные с системой транспорта и парковок, разрушительно влияют на сохранение как отдельных памятников, так и заповедника в целом [4, 5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использовались натурные наблюдения, анализ графических материалов и письменных источников, а также следующие методологические подходы:

- системный подход — исследование градостроительных, природных и художественных факторов Лагича, которые взаимосвязаны друг с другом и влияют на формирование своеобразной архитектурной среды;
- пространственный подход, позволяющий выявить положение основных композиционных сооружений, формирующих исторические кварталы, а также пространственный анализ в зависимости от рельефа местности;
- социально-функциональный подход — один из основных методов в данном исследовании, применялся для изучения особенностей развития социально-культурных процессов, временного развития территориальной организации в совокупности с комплексом производственных и непроизводственных процессов. В рамках этого подхода вырисовывается социальная модель архитектурного объекта, которая структурно связана с его функциональным назначением.

Цель настоящей статьи — определить проблемы, создающие угрозу сохранения архитектурного облика поселка, привлечь внимание к разработке генерального плана, а также других документов, связанных с сохранением и управлением архитектурного наследия Лагича.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лагич стал темой разных исследований, статей, публицистических материалов, но они в основном этнографического характера, большая часть посвящена особенностям развития медного ремесленного производства.

Среди работ, изучающих градостроительную и архитектурно-планировочную структуру Лагича, следует отметить труд Л.С. Бретаницкого в соавторстве с У.Б. Ревазовым и Л.Г. Мамиконовым, в котором рассмотрена связь планировочной структуры города с его ремесленной спецификой¹¹ [11]. В монографии М.Н. Мамедбейли осуществлен архитектурно-планировочный анализ города и выявлены его композиционные особенности¹² [12]. Вышеперечисленные исследования проведены почти полвека назад. Ситуация, которая сегодня сложилась на территории заповедника Лагич, требует нового подхода в связи с ростом поселка, необходимостью развития современной инфраструктуры. Процесс возрождения Лагича и растущий туристический поток создают серьезные проблемы, связанные с сохранением историко-культурной среды (рис. 1).

Прежде чем выявить эти проблемы, необходимо рассмотреть некоторые архитектурно-градостроительные особенности Лагича. Его своеобразие заключается как в общем решении градостроительной структуры, так и в архитектурно-планировочных решениях отдельных зданий. В формировании планировочной структуры Лагича наблюдаются два важнейших фактора: природный и производственный (рис. 2).

Природный фактор определяется ландшафтом территории, который связан с руслом р. Гирдыманчай и изменчивым сложным склоном горы Ниялдаг, размещение жилых кварталов в соответствии с рельефом местности создало своеобразный амфитеатр, направленный в сторону реки.

С древнейших времен в жизни жителей Лагича ремесленное производство имело первоочередное значение, что и стало основным фактором при формировании архитектурно-градостроительного образа города.

Территория Лагича разделена на кварталы (мехелле), где в основном проживали представители одной общины (рода) или группы ремесленников, занятых в отрасли ремесленного производства со своим центром — мечетью, которая представляла духовный, культурный, общественно-административный центр, выполняющий функции местного самоуправления. Такая структура соответствовала многим городам Востока [6, 7].

¹¹ Бретаницкий Л., Мамиконов Л., Ревазов У. Лагич (к вопросу связи планировочной структуры города с его производственной спецификой) // Советская этнография. 1964. № 3. С. 124–133.

¹² Мамедбейли М. Лагич: историко-культурный заповедник. Баку, 2004.



a



b

Рис. 1. Ремесленник в процессе изготовления медной посуды (a); готовые изделия выставлены у мастерской для продажи (b)

Fig. 1. Artisan in the process of making copperware (a); finished goods at the workshop for sale (b)

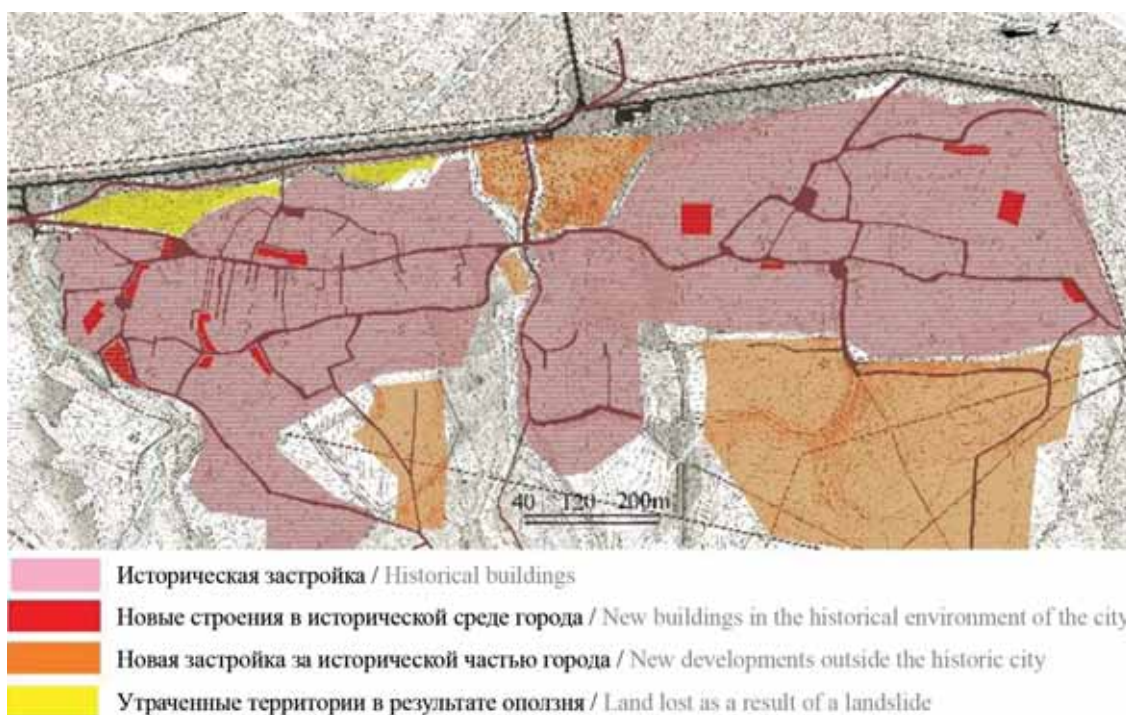


Рис. 2. План зонирования территории Лагича

Fig. 2. Zoning plan of Lahij territory

Лагич состоит из двух планировочных районов. В южной части, в так называемом «большом Лагиче», расположены семь мехелле, которые в прошлом заселяли ремесленники определенной профессии. Например, в кварталах Агалу и Бадаван были сосредоточены мастерские по изготовлению медной посуды и оружия; в Муродуне проживали кузнецы и торговцы, занимавшиеся извозом готовой продукции; в Заваро — преимущественно кожевники, чувячники; в Дулусе — гончары. Второй, северный район состоит из двух кварталов: верхний — Рагимли и нижний — Ахмедли (рис. 3).

Квартальные площади Лагича обусловили не только общую планировочную структуру города в целом, но и способствовали возникновению и развитию квар-

тальных общественных центров — площадей, вокруг которых группировались общественные, торговые здания и коммунально-бытовые сооружения, а также жилые дома¹² [12]. Каждая площадь — отчетливо выраженный центр ремесленного квартала, в застройке обычно главенствовало здание квартальной мечети. Площади представляли собой общественные центры, где обсуждались внутриквартальные дела, совершались торговые сделки и т.д.¹¹ [11] (рис. 4).

На плане городка доминирующим элементом служила главная торговая улица, называемая Сарроста (Ровный), которая расположена параллельно течению реки. Как и во многих ближневосточных городах, главная улица — это своего рода композиционная ось. Все торговые лавки и крупные мастер-

ские медников и кузнецов сосредоточены вдоль торговой улицы. Являясь историческим центром, главная торговая улица одновременно выполняет функцию пешеходного прогулочного пространства. Результаты исследования аналогичных городов показывают, что

обычно в историческом центре концентрируется специфическое жилье, часто лишенное дворов, а система пешеходных прогулочных пространств выступает как компенсатор отсутствия дворовых, рекреационных, досуговых пространств [8].

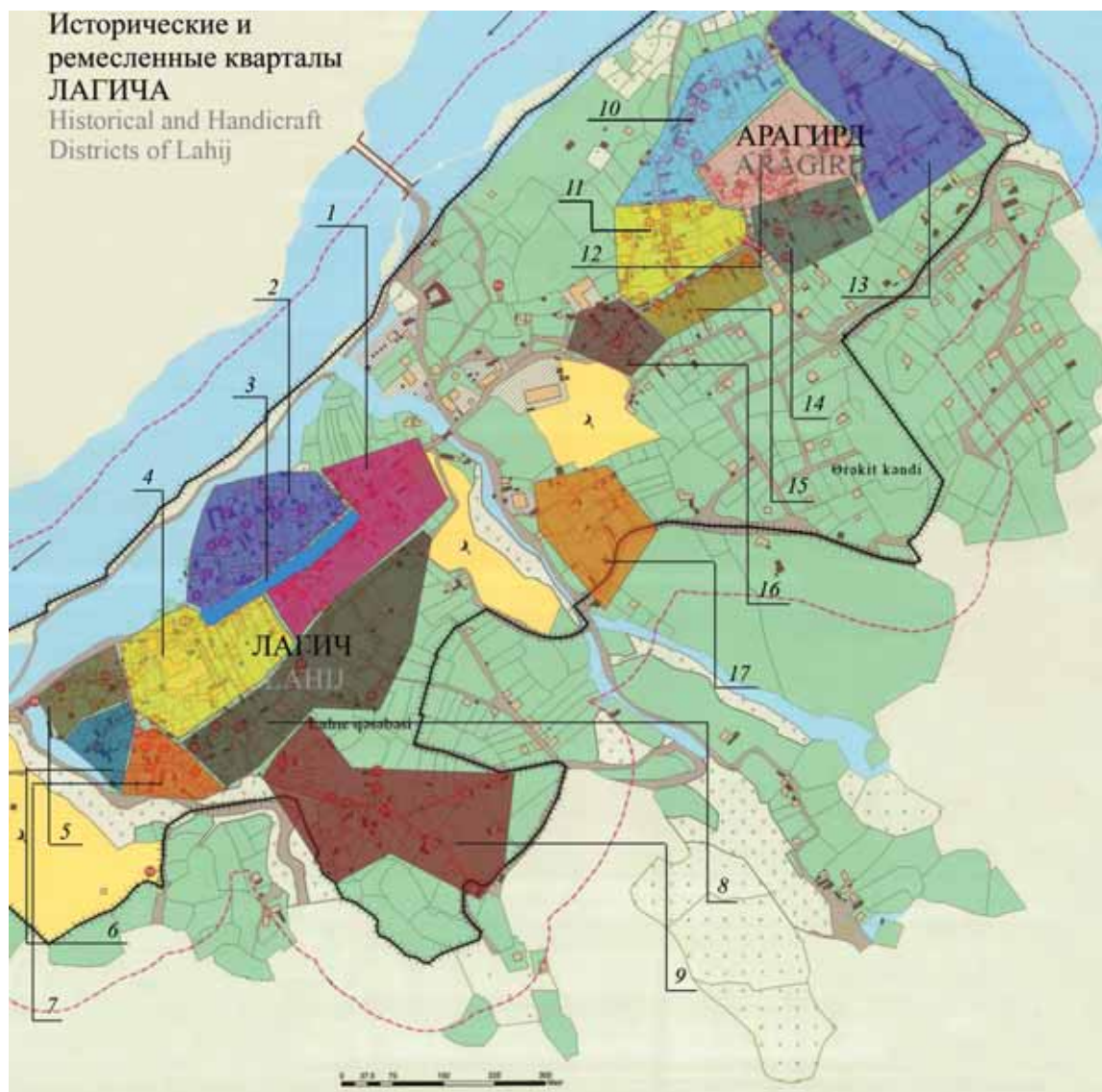


Рис. 3. Исторические и ремесленные кварталы в планировочной структуре Лагича: 1 — квартал «Агалу» (медники и лудильщики); 2 — квартал «Бадаван» (медники и оружейники); 3 — главная торговая улица «Сарроста» (медники и торговцы); 4 — квартал «Дарс Хамум» (здесь были расположены несколько бань); 5 — квартал «Муродун» (извозчики кузнецы); 6 — квартал «Дулус» (гончарники); 7 — квартал «Дер-Хасан» (извозчики и чувячники); 8 — квартал «Пиште» (медники и чувячники); 9 — квартал «Заваро» (кожевенники и чувячники); 10 — квартал «кузнецов и оружейников»; 11 — квартал «Ахмедли» (торговцы и медники); 12 — квартал медников; 13 — квартал «Сейидлар» (духовенство); 14 — квартал «Рагимлилар» (интеллигенция); 15 — квартал строителей и маляров; 16 — квартал «Даре-халво» (кондитеры); 17 — квартал «Даре-Луло» (животноводство)

Fig. 3. Historical and craft quarters in the planning structure of Lahij: 1 — Quarter “Agalu” (coppersmiths and tinkers); 2 — Quarter “Badavan” (coppersmiths and gunsmiths); 3 — the main shopping street “Sarrosta” (coppersmiths and traders); 4 — Quarter “Dars Hamum” (several baths were located here); 5 — Quarter “Murodun” (cabbies, blacksmiths); 6 — Quarter “Dulus” (potters); 7 — Quarter “Der-Hasan” (cabbies and chuyachniki); 8 — Quarter “Pishte” (coppersmiths and chuyachniki); 9 — Quarter “Zavaro” (tanners and chuyachniki); 10 — Quarter of “blacksmiths and gunsmiths”; 11 — Quarter “Ahmedli” (traders and coppersmiths); 12 — Coppersmith Quarter; 13 — Quarter “Seyidlar” (clergy); 14 — Quarter “Rahimlilar” (intelligentsia); 15 — Quarter of builders and painters; 16 — Quarter “Dare-halvo” (confectioners); 17 — Quarter “Dare-Lulo” (livestock)



Рис. 4. Квартальная площадь Заваро с родником и мечетью

Fig. 4. Zavarov Square with spring and mosque

Еще одна улица с историческим названием Пиште (Тыльный) параллельна главной улице, все остальные — небольшие поперечные улочки и переулочки, отчасти перпендикулярно пересекаются с вышеуказанными продольными улицами, что свидетельствует о стремлении к созданию более регулярной планировки. Одна из особенностей планировочной структуры Лагича — отсутствие центральной площади, роль и значение которой с успехом выполняет несколько столетий вытянувшаяся на несколько сот метров часть главной улицы¹² [12] (рис. 3).

Жилые дома Лагича также отразили своеобразие природно-климатических и социальных условий и, прежде всего, производственную специфику. Двухэтажные дома, преобладающие в городке, принадлежат сословию богатых торговцев и ремесленникам, в основном занятым в медном и кузнечном производстве. В планировочной структуре этих построек отчетливо просматривается принадлежность жильцов к определенной области профессиональной деятельности [9]. На первом этаже размещались мастерские или лавки, кухня, иногда помещение для скота. Жилые комнаты располагались на втором этаже. Вход в дом был со двора по лестнице, ведущей на деревянный обходной балкон. Главный вход в мастерскую-лавку всегда устраивался прямо с улицы в виде широкого прямоугольного проема с массивными деревянными ставнями (рис. 4). Обычно мастерская имела еще один внутренний вход со двора. Такого типа жилье, объединенное с производственной ячейкой, является особенностью Лагича, встречается в немногих городах Азербайджана¹¹ [11].

При этом существовали и отдельно стоящие мастерские, принадлежащие медникам, кузнецам, а также кожевникам. Дома и мастерские кожевников обычно устраивались ближе к водостокам. Для этого вида ремесла свойственны применение воды и ориентация по солнечным лучам для сушки изделий после обработки, проветриваемость территории и изолированность от основных жилых районов из-за сильного неприятного запаха.

К сожалению, как и многие виды ремесел, кожевенное ремесло утратило свое значение во второй половине прошлого века. Мастерские кожевников стали использоваться для других нужд собственников. Происходящий процесс упадка ремесленного производства из-за роста промышленного за последнее столетие оставил заметные изменения в сложившемся веками архитектурном облике города [10]. Архитектура Лагича пострадала и от современных элементов инфраструктуры. Электрические столбы и провода, газовые и водопроводные трубы, телекоммуникационные антенны стали частью экстерьера Лагича (рис. 5).



Рис. 5. Ремесленно-торговая улица Лагича в период пандемии

Fig. 5. Craft-shopping street of Lahij during the pandemic

Автомобильный транспорт, появившийся во второй половине XX в. на территории Лагича как важный элемент современной цивилизации, также стал разрушительным фактором для уничтожения древнего уличного мощения из местных каменных плит, древних водопроводных сетей и канализационного коллектора, функционирующих со средневекового периода. Решение данного вопроса является одной из первоочередных задач.

В качестве реализованных примеров можно рассмотреть опыт по организации транспортной системы в ряде исторических городов, таких как Улус (Турция), Сиена (Италия) и Бремен (Германия). В Улусе городская структура и сеть дорог использовались при сохранении уникальных зданий и ограничении во времени въезда транспортных средств. Это достигается путем сохранения его наследия без добавления современных элементов и проведения реабилитации, которая отвечает современным потребностям жителей [11]. Создание первой пешеходной зоны в Сиене и сопутствующие реакции разных слоев общественности, которые продолжались долгое время, заставляют относиться к решению данной проблемы с учетом интересов реалий жизни жителей. План регулирования движения в историческом городе Сиена был основан на двух основных аспектах: создать пешеходную зону в центральной части города; отменить транзит транспортных средств через

городской центр. Тем самым были введены запретные транзитные зоны на одних улицах и односторонние пути на других. Для передвижения с севера на юг и с востока на запад следовало использовать существующие кольцевые дороги, а малые кольцевые дороги, большинство из них — дороги с односторонним движением, запланированы для движения автомобилей горожан [12].

Еще один интересный факт — неординарный подход к решению данной проблемы в историческом городе Бремене. Бремен избрал особый подход к планировке центра города и вопросам городского транспортного движения. Еще в начале 1960-х гг. в Бремене был разработан комплексный план развития интермодальной транспортной системы, основанный на инновационной концепции «транспортных ячеек», в ходе которой была проведена реконструкция кольцевой дороги, окружающей центральную часть города, обеспечившая повышение ее пропускной способности. При этом городской центр был разделен на четыре ячейки, автомобильное сообщение между которыми могло осуществляться исключительно по кольцевой дороге [13].

Решение проблемы транспорта и парковок непосредственно связано с разработкой генерального плана, учитывая вышерассмотренные опыты разных исторических городов. В условиях исторической среды города рекомендуется ограничивать активные транспортные потоки. В практическом опыте выявлены положительные примеры, в которых с данной целью применено устройство распределительного кольца или полукольца с примыканием автопарковки [14].

Средневековые улицы Лагича не предусмотрены для современного автотранспорта. Во многих местах ширина улиц в свое время была рассчитана на проезд вьючных животных с грузом. Сегодня часть жителей поселка владеет автотранспортом, и по улицам, по которым сто лет назад ходили верблюды и лошади, сегодня проезжают автомобили разных размеров и массы. Под такой нагрузкой деформируется структура покрытия улиц, мощенная речными каменными плитами. Кроме этого, разрушается каменная кладка канализационной системы, проходящей под этими улицами, построенная в XV–XVI вв. и функционирующая по сей день. Также возникают проблемы въезда автотранспорта во дворы частных домов исторических кварталов. Подвергаются разрушению старинные деревянные ворота с традиционными элементами, и их место занимают обычные металлические ворота с широкими створками, которые и по масштабу, и по фактуре нарушают архитектурный стиль и среду Лагича. Как известно, ценное историко-культурное наследие заключается не только в капитальных сооружениях, оно проявляет себя и в характере благоустройства транспортных и пешеходных путей, в рисунке малых форм, в соотно-

шении открытых и закрытых пространств, формируемых озеленением. Причем своеобразие исторических форм общественных пространств особенно сильно проявляется в малых городах, но именно здесь оно особенно легко исчезает [15].

В последние годы развитие туризма в Азербайджане стало одним из приоритетных направлений. Исторические города и памятники архитектуры стали использоваться как важные элементы для привлечения туристов. Фокусирование туристической отрасли на памятниках архитектуры наряду с многими положительными аспектами создает и ряд негативных факторов [16].

Лагич, получивший известность среди туристов еще с давних лет, в последние годы стал более посещаемым. Однако поселок не готов к такому наплыву гостей. Не создана туристическая инфраструктура. К сожалению, Лагич как «памятник» не подготовлен к приему, размещению, обслуживанию большого количества туристов и автотранспорта.

Не разработана также форма подачи туристической информации, не говоря уже о плане консервации и реставрации. Такая ситуация требует немедленно решения целого ряда организационных вопросов, связанных с взаимодействием соответствующих государственных органов и местного самоуправления, специалистов-реставраторов с привлечением общест-венности поселка.

Туризм и проблемы развития малых исторических городов — сегодня наиболее часто обсуждаемая тема на всех уровнях.

Однозначно туризм в наши дни служит важнейшим фактором изменений в жизни исторических городов, поселений и даже памятников. Не возникает сомнения, что это воздействие бывает физическим, экономическим или социальным, и оно может ощущаться как в положительном, так и в отрицательном аспекте. Надо помнить, что принцип «устойчивого планирования» включает в себе максимизацию положительного воздействия туризма и минимизацию негативных последствий [17]. В этом направлении необходимо обратиться к опыту ряда зарубежных исторических городов. Примером может служить исследование, посвященное испанскому городу Сантьяго-де-Компостела.

Основываясь на полученных результатах и анализе факторов, исследователи делают выводы, что в исторических городах интеграция культурного, туристического, городского и политического факторов является главной опорой устойчивого развития. Взаимодействие между различными заинтересованными сторонами, в том числе местного сообщества, — ключевой фактор для достижения этой цели [18].

Учитывая социальные, экономические и культурные особенности Лагича также необходима разработка плана интеграции. Если генеральный план

города дает стратегическое видение развития всей селитебной территории города и поэтому рассматривает все проблемы на макроуровне, то интегрированный план городского развития следует разрабатывать как программный документ, содержащий конкретные параметры развития зоны воздействия [19].

Не менее яркие примеры — исторические города Норвегии (Ставангер, Мушеэн и Рисер). В процессе развития этих городов основной целью было сохранение исторически сложившейся городской среды и ремесленных традиций, связанных с рыболовством. Такой подход мотивирует жителей участвовать в программах сохранения наследия и дает им финансовую поддержку [20].

Интересен опыт ряда европейских исторических городов и поселений в деле создания благоприятной среды как для жителей, так и для туристов. Такие города, как Дерута¹³ [13] и Спелло¹⁴ [14] в Италии, Алачати и Чешме¹⁵ [15] в Турции, Парос¹⁶ [16] в Греции, Риквир¹⁷ [17] во Франции и т.д., привлекают туристов красующимися на улицах развешенными на стенах домов цветами, что само по себе является прекрасным примером по созданию уютной и гармоничной среды как для туристов, так и для жителей.

Сегодня жизнь в Лагиче тесно связана с ремесленным туризмом. Этот вид туризма в Лагиче, не организованный кем-либо, а постепенно сформированный с 80-х годов прошлого века. Он ориентирован на включение ремесленных мастерских в индустрию туризма и подчеркивание местного колорита — «духа места». Ключевым моментом является возможность для посетителей увидеть процесс создания изделия, что повышает его ценность в глазах туристов [21].

¹³ COMUNE DI DERUTA. URL: <https://www.comune.deruta.pg.it/galleria-fotografica/>

¹⁴ Comune di Spello. URL: <http://www.comune.spello.pg.it/eventi/finestre-balconi-e-vicoli-fioriti-xiv-edizione>

¹⁵ Çeşme Belediyesi. URL: <https://www.cesme.bel.tr/kurumsal-bilgiler>

¹⁶ Paros. URL: <http://www.paros.gr/default.asp?catid=4873>

¹⁷ Mairie de Riquewihr. URL: http://www.riquewihr.fr/fr/information/61359/concours-maisons_fleuries

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Происходящий процесс изменения, нарушающий архитектурный облик и планировочную структуру Лагича, можно охарактеризовать следующим образом:

- по причине уменьшения спроса и упадка ремесленного производства многие мастерские ремесленников потеряли свое функциональное назначение и стали использоваться как подсобные помещения жителей;

- многие ремесленники были вынуждены переселиться в другие регионы, в связи с чем на территории ремесленных кварталов ряды домов опустели и дошли до наших дней в руинированном состоянии;

- в период советской власти купеческие дома **были экспропрированы** и приспособлены для нужд местных органов власти, некоторые из них используются и по сей день;

- на территории исторических кварталов стали строиться новые здания, часто нарушающие архитектурно-строительные традиции Лагича. При ремонтно-строительных работах, производимых на территории поселка, начали применяться строительные материалы, чуждые для архитектуры Лагича, такие как железобетон, металлические прокаты, облицовочные материалы.

- возрастающие транспортные потоки и проблемы парковок — одна из главных проблем современного Лагича. Его средневековые улицы и переулки не предусмотрены для современных автомобилей жителей и туристических автобусов гостей города. Современное состояние транспортной системы является угрозой фактором по сохранению архитектурной среды на территории заповедника.

Согласно законодательству Азербайджанской Республики, любой населенный пункт должен развиваться по утвержденному генеральному плану. Кроме того, учитывая особенность Лагича как памятника мирового значения, необходим ряд документов по сохранению и использованию как отдельных памятников, так и исторических кварталов в целом. Только такой подход откроет путь к решению многих проблем и создаст благоприятные условия для развития Лагича с сохранением его архитектурно-градоостроительного наследия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаджиева С.Х. Современный уровень сохранности архитектурного наследия северо-западного региона Азербайджана // Вестник ТГАСУ. 2012. № 2 (35). С. 57–65.
2. Horjan G. Traditional crafts as a new attraction for cultural tourism // International Journal of Intangible Heritage. 2011. No. 6. Pp. 46–56.
3. Керимли Т.Н. Приспособление памятников архитектуры после реставрации (на примере нескольких

проектов последних лет в Азербайджане) // Известия КГАСУ. 2015. № 1 (31). С. 18–25.

4. Некрасов А.Б. Воссоздание утраченной исторической застройки (на примере города Калининграда) // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 2. С. 38–50. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-2-38-50

5. Aldohdar H.N., Timofeevna E.Ch. Local strategies for conservation architectural and archaeological heritage (Case study: Old Town of Gaza city — Pales-

tine) // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2019. Vol. 6. No. 9. Pp. 225–232.

6. *Потанова А.В.* Методы регенерации исторических кварталов в современной европейской практике на примере района Нойштадт (Дрезден, Германия) // Architecture and Modern Information Technologies. 2012. № 2 (19). С. 19.

7. *Shinbira I.A.* Conservation of the urban heritage to conserve the sense of place, a case study Misurata City, Libya // American Transactions on Engineering & Applied Sciences. 2012. Vol. 1. No. 3. Pp. 253–264.

8. *Закирова Ю.А.* Градостроительная реконструкция системы пешеходных прогулочных пространств в центральной исторической части города : автореф. дис. ... канд. арх. М., 2009. 186 с.

9. *Li Yan, Cai Liang, Hu Zhiwen.* Conservation of historical and cultural towns and villages in China // AUSSIE-SINO STUDIES. 2017. Vol. 3. No. 4. Pp. 85–97.

10. *Sadowski M.M.* Urban cultural heritage: Managing and preserving a local global common in the twenty-first century // Journal of Heritage Management. 2017. Vol. 2. No. 2. Pp. 125–151. DOI: 10.1177/2455929617738454

11. *Hmood K., Jumaily H., Melnik V.* Urban architectural heritage and sustainable tourism // Sustainable Tourism VIII. 2018. DOI: 10.2495/ST180201

12. *Maggi S.* Medieval towns, traffic and urban planning half a century since the first pedestrian zone in Siena, Italy // Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2016. Vol. 4. No. 2. DOI: 10.17265/2328-2142/2016.02.006

13. *Вучик В.Р.* Транспорт в городах, удобных для жизни. М. : Территория будущего, 2011. 574 с.

14. *Сидорова В.В.* Исторические города России: вопросы сохранения, развития и творческого плани-

рования // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 10 (62). С. 7–20.

15. *Щенков А.С.* Охранный регламент территорий общего пользования малых исторических городов // Architecture and Modern Information Technologies. 2019. № 4 (49). С. 87–97. DOI: 10.24411/1998-4839-2019-00007

16. *Harun S.N.* Heritage building conservation in Malaysia: Experience and challenges // Procedia Engineering. 2011. Vol. 20. Pp. 41–53. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.137

17. *García-Hernández M., de la Calle-Vaquero M., Yubero C.* Cultural heritage and urban tourism: Historic city centres under pressure // Sustainability. 2017. Vol. 9. P. 1346. DOI: 10.3390/su9081346

18. *Pérez Y., Camilo R., González L.* Sustainability and visitor management in tourist historic cities: the case of Santiago de Compostela, Spain // Journal of Heritage Tourism. 2018. Vol. 13. No. 2. Pp. 489–505. DOI: 10.1080/1743873X.2018.1435665

19. *Ковачев А.Д.* Состояние, проблемы и прогнозы развития районной планировки, градостроительства и архитектуры в Болгарии в начале XXI в. (в условиях рыночной экономики и начала действия мирового финансово-экономического кризиса). Часть 1 // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 20–36. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.10.20-36

20. *Nyseth T., Sognæs J.* Preservation of old towns in Norway: Heritage discourses, community processes and the new cultural economy // Cities. 2013. Vol. 31. Pp. 69–75. DOI: 10.1016/j.cities.2012.05.014

21. *Степанчук А.В.* Принципы архитектурной организации объектов культурного туризма с ремесленно-креативной функцией: на примере Республики Татарстан : дис. ... канд. арх. Нижний-Новгород, 2017. 141 с.

Поступила в редакцию 5 февраля 2021 г.

Принята в доработанном виде 22 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 22 апреля 2021 г.

О Б АВТОРЕ: **Магомед Нурмамедович Нурмамедов** — ассистент кафедры архитектурных конструкций и реставрации памятников, докторант; **Азербайджанский архитектурно-строительный университет (АзАСУ)**; AZ-1073, г. Баку, ул. А. Султанова, д. 11, Азербайджанская Республика; m.nurmamedov@mail.ru.

REFERENCES

1. *Hajiyeva S.Kh.* Modern level of architectural heritage preservation of north-western region of Azerbaijan. *Journal of Construction and Architecture*. 2012; 2:57-65. (rus.).

2. *Horjan G.* Traditional crafts as a new attraction for cultural tourism. *International Journal of Intangible Heritage*. 2011; 6:46-56.

3. *Kerimli T.N.* Monuments' adaptation after their restoration (by the examples of last year's projects realized in Azerbaijan). *Proceeding of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2015; 1(31):18-25. (rus.).

4. *Nekrasov A.B.* Recovering of missing historical areas (on the example of the city of Kaliningrad). *Aca-*

demia. *Architecture and Construction*. 2019; 2:38-50. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-2-38-50 (rus.).

5. Aldohdar H.N., Timofeevna E.Ch. Local strategies for conservation architectural and archaeological heritage (Case study: Old Town of Gaza city — Palestine). *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 2019; 6(9):225-232.

6. Potapova A.V. Methods of regeneration historical quarters in the contemporary European practise by example of the Neustadt district (Germany). *Architecture and Modern Information Technologies*. 2012; 2(19):16. (rus.).

7. Shinbira I.A. Conservation of the urban heritage to conserve the sense of place, a case study Misurata City, Libya. *American Transactions on Engineering & Applied Sciences*. 2012; 1(3):253-264.

8. Zakirova Ju.A. *Urban planning reconstruction of the system of pedestrian walking spaces in the central historical part of the city : abstract dis. ... an architecture candidate*. Moscow, 2009; 186. (rus.).

9. Li Yan, Cai Liang, Hu Zhiwen. Conservation of historical and cultural towns and villages in China. *AUS-SIE-SINO STUDIES*. 2017; 3(4):85-97.

10. Sadowski M.M. Urban cultural heritage: managing and preserving a local global common in the twenty-first century. *Journal of Heritage Management*. 2017; 2(2):125-151. DOI: 10.1177/2455929617738454

11. Hmood K., Jumaily H., Melnik V. Urban architectural heritage and sustainable tourism. *Sustainable Tourism VIII*. 2018. DOI: 10.2495/ST180201

12. Maggi S. Medieval Towns, traffic and urban planning half a century since the first pedestrian zone in Siena, Italy. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2016; 4(2). DOI: 10.17265/2328-2142/2016.02.006

13. Vuchik V.R. *Transport in cities convenient for living*. Moscow, Territory of the Future, 2011; 574. (rus.).

14. Sidorova V.V. Historical cities of Russia: issues of conservation, development and creative planning. *Construction and Industrial Safety*. 2018; 10(62):7-19. (rus.).

15. Shchenkov A.S. Protection provisions of small historical towns public areas. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2019; 4(49):87-97. DOI: 10.24411/1998-4839-2019-00007 (rus.)

16. Harun S.N. Heritage building conservation in Malaysia: Experience and challenges. *Procedia Engineering*. 2011; 20:41-53. DOI: 10.1016/j.pro-eng.2011.11.137

17. García-Hernández M., de la Calle-Vaquero M., Yubero C. Cultural Heritage and urban tourism: Historic city centres under pressure. *Sustainability*. 2017; 9:1346. DOI: 10.3390/su9081346

18. Pérez Y., Camilo R., González L. Sustainability and visitor management in tourist historic cities: the case of Santiago de Compostela, Spain. *Journal of Heritage Tourism*. 2018; 13(2):489-505. DOI: 10.1080/1743873X.2018.1435665

19. Kovachev A.D. Status, problems and projects for development of district and urban planning and architecture in Bulgaria in early 21st century (against the background of the market economy and the upcoming financial and economic crisis). Part 1. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 10:20-36. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.10.20-36 (rus.).

20. Nyseth T., Sognnæs J. Preservation of old towns in Norway: Heritage discourses, community processes and the new cultural economy. *Cities*. 2013; 31:69-75. DOI: 10.1016/j.cities.2012.05.014

21. Stepanchuk A.V. *Principles of architectural organization of cultural tourism objects with craft-creative function: on the example of the Republic of Tatarstan: dis. ... an architecture candidate*. Nizhny Novgorod, 2017; 141. (rus.).

Received February 5, 2021.

Adopted in revised form on April 22, 2021.

Approved for publication on April 22, 2021.

Bionotes: **Magomed N. Nurmamedov** — assistant of the Department of Architectural Construction and Restoration of Monuments, doctoral student; **Azerbaijan University of Architecture and Construction (AUAC)**; 11 A. Sultanoava st., Baku, AZ-1073, Republic of Azerbaijan; m.nurmamedov@mail.ru.

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

УДК 691.328.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.413-428

К расчету прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой

И.Т. Мирсаяпов, И.А. Антаков, А.Б. Антаков

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Композитная полимерная арматура имеет относительно низкий по сравнению со сталью модуль упругости. В связи с чем изгибаемые элементы с такой арматурой обладают более высокой деформативностью. Диаграмма «напряжения – деформации» для композитов при кратковременном нагружении практически прямолинейна и не имеет площадки текучести, как у стальной арматуры. Современные методики расчета конструкций с композитной арматурой базируются на существующих подходах для железобетонных конструкций.

Материалы и методы. Проведены экспериментальные исследования с учетом ГОСТ 8829-94. Опытные образцы — бетонные балки сечением 120 × 220 мм и длиной 1810 мм, армированные двумя стержнями в растянутой зоне. В качестве армирования использовались стержни стальной, стеклокомпозитной (АСК) и базальтокомпозитной (АБК) арматуры. Варьировалась величина процента армирования. Испытания выполнялись при кратковременном приложении нагрузок. Рассмотрены методики расчета прогибов нормативных документов: России — СП 295.1325800.2017 и США — ACI 440.1R-06.

Результаты. Получены результаты теоретических и экспериментальных исследований деформативности изгибаемых элементов, армированных композитной полимерной арматурой. Неточное определение момента трещинообразования M_{cr} оказывает негативное влияние на результаты расчета прогиба. Отклонение теоретических величин момента трещинообразования по методике СП 295.1325800.2017 от опытных составляет 26,2–59,1 %, у методики ACI 440.1R-06 — 20,1–57,1 %. Для ACI 440.1R-06 более точным является расчет, в котором кратковременный прогиб умножался на коэффициент $\lambda = 0,6\xi = 0,6 \cdot 2 = 1,2$, для методики СП 295.1325800.2017 — при использовании $\psi_f = 1 - 0,8M_{cr} / M$.

Выводы. Показали необходимость совершенствования рассмотренных методик расчета. Для повышения точности расчета прогибов по методике СП 295.1325800.2017 на первом этапе возможно приблизить теоретические значения момента трещинообразования к опытным данным путем введения поправочных коэффициентов в выражение по определению M_{cr} : для балок с АСК периодического профиля — 0,7, для АБК с опесчанной поверхностью — 0,5.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неметаллическая арматура, композитная полимерная арматура, бетонные конструкции, изгибаемые элементы, прогиб, бетонная балка, стеклокомпозитная арматура, базальтокомпозитная арматура

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мирсаяпов И.Т., Антаков И.А., Антаков А.Б. К расчету прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 4. С. 413–428. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.413-428

To the design of the deflections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars

Ilshat T. Mirsayapov, Igor A. Antakov, Alexey B. Antakov

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

ABSTRACT

Introduction. Fiber-reinforced polymers (FRP) reinforcement has a relatively low modulus of elasticity compared to steel. In this connection, the bent members with such reinforcement have a higher deformability. The stress-strain diagram for FRP under short-term loading is almost straight and does not have a yield line, as in steel reinforcement. At the same time, modern methods of calculating structures with FRP reinforcement are based on existing approaches for reinforced concrete structures. In this regard, the current direction for study is to assess the reliability and improve the existing methods for calculating members with FRP reinforcement for the serviceability limit states.

Materials and methods. Experimental studies were carried with regard for and in compliance with the provisions of National State Standard 8829-94. Tested samples represented concrete beams that were 1,810 mm long and had a cross section of 120 × 220 mm. Their tensile side was reinforced with two bars. Steel, glass fiber-reinforced polymer (GFRP) and basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars were used to reinforce the beams. The value of the reinforcement ratio varied.

Deflections calculation methods, applied according to Construction rules and regulations 295.1325800.2017 (Russia) and ACI 440.1R-06 (USA) were analyzed.

Results. The results of the theoretical and experimental studies of the deformability of flexural members having FRP reinforcement are obtained. The inaccurate determination of the cracking moment M_{cr} has a negative impact on the results of the deflection calculation. The deviation of the theoretical values of the cracking moment according to the method of Construction rules and regulations 295.1325800.2017 from the experimental ones is 26.2–59.1 %, in the method of ACI 440.1 R-06 — 20.1–57.1 %. For the ACI 440.1 R-06 method, the calculation is more accurate, in which the short-term deflection was multiplied by the factor $\lambda = 0,6\xi = 0,6 \cdot 2 = 1,2$, for the Construction rules and regulations 295.1325800.2017 method — when using $\psi_f = 1 - 0,8M_{cr} / M$.

Conclusions. The results obtained showed the need to improve the considered calculation methods. To increase the accuracy of the calculation of deflections according to the method of SP 295.1325800.2017, at the first stage, it is possible to approximate the theoretical values of the cracking moment to the experimental data by introducing correction factor in the equation according to the calculation of M_{cr} : for beams with a GFRP high-bond bars — 0.7, for BFRP with a sanded surface — 0.5.

KEYWORDS: non-metallic reinforcement, fiber-reinforced polymer reinforcement, concrete structures, flexural members, deflection, concrete beam, glass fiber-reinforced polymer reinforcement, basalt fiber-reinforced polymer reinforcement

FOR CITATION: Mursayapov I.T., Antakov I.A., Antakov A.B. To the design of the deflections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):413-428. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.413-428 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, арматура композитная полимерная (АКП) имеет до четырех раз более низкий модуль упругости, чем у стали, а диаграмма «напряжения – деформации» при кратковременном нагружении практически прямолинейна вплоть до разрушения, также относительно низкие величины термической стойкости связующего АКП. В связи с этим работа изгибаемых элементов с композитной арматурой под нагрузкой имеет ряд принципиально иных от железобетона особенностей:

- у балок с АКП зависимости между величинами изгибающего момента и прогибами имеют два, преимущественно линейных участка, соответствующих работе изгибаемого элемента без трещин и с трещинами [1–8]. При этом значения прогибов в 3–4 раза выше, чем у железобетонных аналогов, и, соответственно, большая ширина раскрытия трещин [9–15];

- сжатая зона в нормальном сечении значительно, по сравнению с железобетонными элементами, уменьшается после появления трещин и затем остается практически постоянной вплоть до разрушения элемента [16];

- из-за относительно высокой подверженности АКП ползучести при длительном приложении нагрузки прогибы изгибаемых элементов увеличиваются до 90 % от первоначальных значений, в зависимости от величины нагрузки и вида арматуры [17];

- вследствие относительно низкого модуля упругости композитов требования по второй группе предельных состояний могут быть основными при проектировании конструкций с АКП [10]. Исследования [8, 15, 18–22] показали необходимость совершенствования существующих методик расчета прогибов и ширины раскрытия трещин изгибаемых элементов с АКП;

- при нагреве свыше 70 °С прочностные и деформативные характеристики балок с АКП изменяются. С повышением температуры деформативность балок увеличивается относительно результатов ис-

пытаний в нормальных условиях. При нагреве до 80 °С снижение прочности составляет 13 % [23].

Современные методики расчета конструкций с АКП базируются на существующих подходах для железобетонных конструкций. В методике СП введен ряд изменений:

- сжатая арматура в расчетах не учитывается;
- предельные величины ширины раскрытия трещин увеличены до 0,7 и 0,5 мм;
- увеличено значение коэффициента φ_2 , учитывающего профиль продольной АКП, до 0,7 для арматуры периодического профиля. Для гладкой арматуры значение коэффициента φ_2 в СП 295.1325800.2017 не указано, хотя в утратившем силу Приложении Л к СП 63.13330.2012 он был равен 1,2.

В методике ACI 440.1R-06 приведенный момент инерции сечения I_e определяется по формуле:

$$I_e = \beta_d I_g \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 + I_{cr} \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right] \leq I_g, \quad (1)$$

где введен коэффициент β_d

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right). \quad (2)$$

Данное выражение получено эмпирически в результате сопоставления с экспериментальными данными.

По методике ACI 440.1R-06 прогибы от действия длительных нагрузок вычисляются путем умножения значения кратковременного прогиба на коэффициент λ , учитывающий длительность действия нагрузки:

$$\lambda = 0,6\xi. \quad (3)$$

Коэффициент ξ зависит от длительности действия нагрузки, при продолжительности действия более пяти лет $\xi = 2$, до шести месяцев — 1,25.

Настоящее исследование выполнено для оценки достоверности методик расчета прогибов, представленных в нормативных документах СП 295.1325800.2017 и ACI 440.1R-06, а также разработ-

ки рекомендаций к проведению расчетов по второй группе предельных состояний. Анализ работы балок на стадии разрушения представлен в ранее опубликованной статье [24].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью получения опытных данных о работе изгибаемых элементов с композитной арматурой авторами на базе Казанского государственного архитектурно-строительного университета проведены экспериментальные исследования образцов балок со стеклокомпозитной (АСК) и базальтокомпозитной арматурой (АБК).

Опытными образцами являлись бетонные балки сечением 120×220 мм и длиной 1810 мм, армированные двумя стержнями в растянутой зоне, с защит-

ным слоем бетона 20 мм. Балки с шарнирным опиранием загружены в третях пролета (рис. 1). Испытания балок осуществлялись в соответствии с положениями ГОСТ 8829-94 при кратковременном приложении нагрузок. Результаты испытания балок при длительном приложении нагрузок представлены в ранее опубликованной работе [25].

В табл. 1 приведены характеристики опытных образцов балок. В рамках исследования использованы следующие виды АКП:

- серия 2 — стержни стеклокомпозитной арматуры периодического профиля. Рифление создано при помощи навивки базальтового волокна по ТУ 5769-248-35354501-2007;
- серия 3 — стержни базальтокомпозитной арматуры с опесчанной поверхностью по ТУ 2296-001-60722703-2013.

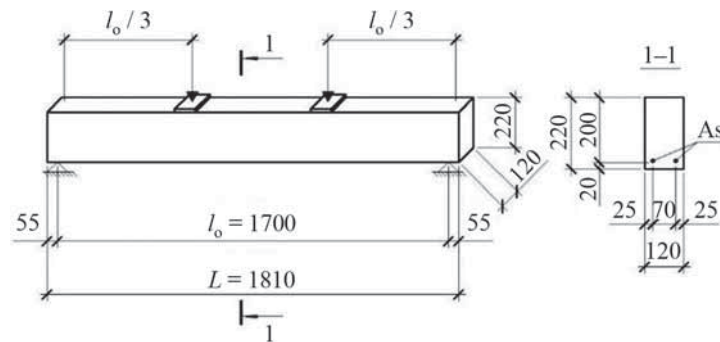


Рис. 1. Схема опирания и нагружения исследуемых балок

Fig. 1. Beam support and loading pattern

Табл. 1. Характеристики серий опытных образцов балок

Table 1. Characteristics of series of beam specimens

Номер серии Series No.	Класс бетона Strength classes for concrete	Продольное армирование / Longitudinal reinforcement				
		Количество и диаметр стержней, класс Number of bar, type	Расчетный диаметр, мм Design diameter, mm	Процент армирования μ , % Ratio of reinforcement μ , %	Модуль упругости $E_{s(f)}$, МПа Modulus of elasticity $E_{s(f)}$, MPa	Сопротивление растяжению $R_{s(f),n}$, МПа Ultimate tensile strength $R_{s(f),n}$, MPa
1	B30 C25/30	2 Ø12 A400	12	0,942	200 000	400
		2 Ø8 A400	8	0,421		
		2 Ø6 A400	6	0,238		
2	B40 C30/37	2 Ø10 ACK 2 Ø10 GFRP	8,6	0,484	51 500	1200
		2 Ø8 ACK 2 Ø8 GFRP	7	0,321	51 500	1200
		2 Ø6 ACK 2 Ø6 GFRP	5	0,164	51 770	1250
3	B35 C30/37	2 Ø7 АБК 2 Ø7 BFRP	7	0,321	50 000	1000

Номер серии Series No.	Класс бетона Strength classes for concrete	Продольное армирование / Longitudinal reinforcement				
		Количество и диаметр стержней, класс Number of bar, type	Расчетный диаметр, мм Design diameter, mm	Процент армирования μ , % Ratio of reinforcement μ , %	Модуль упругости E_{sf} , МПа Modulus of elasticity E_{sf} , MPa	Сопротивление растяжению $R_{sf,n}$, МПа Ultimate tensile strength $R_{sf,n}$, MPa
3	B35 C30/37	2 Ø5 АБК 2 Ø5 BFRP	5,3	0,184	51 000	1100
		2 Ø4 АБК 2 Ø4 BFRP	4	0,105	51 000	1200

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2–13 представлены экспериментальные и теоретические зависимости между величинами изгибающего момента и прогибами ($M-f$) для исследуемых опытных образцов балок серий 2 и 3. Для двух рассматриваемых методик СП 295.1325800.2017 и ACI 440.1R.-06 определены по четыре диаграммы. В методике СП коэффициент ψ_f , учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами, принимался равным 1 и $\psi_f = 1 - 0,8M_{cre} / M$. Согласно СП ψ_f допускается принимать равным 1,0, когда соблюдается условие $f \leq f_{ult}$. По методике ACI данные устанавливались по расчету кратковременных прогибов

и при учете коэффициента $\lambda = 0,6\xi$, где ξ принималось равным 2 для продолжительности действия нагрузки более пяти лет. Расчеты выполнялись с учетом теоретических и экспериментальных значений момента трещинообразования. В исследовании [26] были рассмотрены методики расчета ACI и Eurocode, где отмечалось, что решающую роль в достоверности результатов расчетов прогибов может сыграть оценка момента трещинообразования. В табл. 2 выполнено сравнение теоретических и экспериментальных значений моментов трещинообразования. Для балок с композитной арматурой отклонение теоретических данных по методике СП 295.1325800.2017 от опытных составляет 26,2–59,1 %, по методике ACI 440.1R-06 — 20,1–57,1 %.

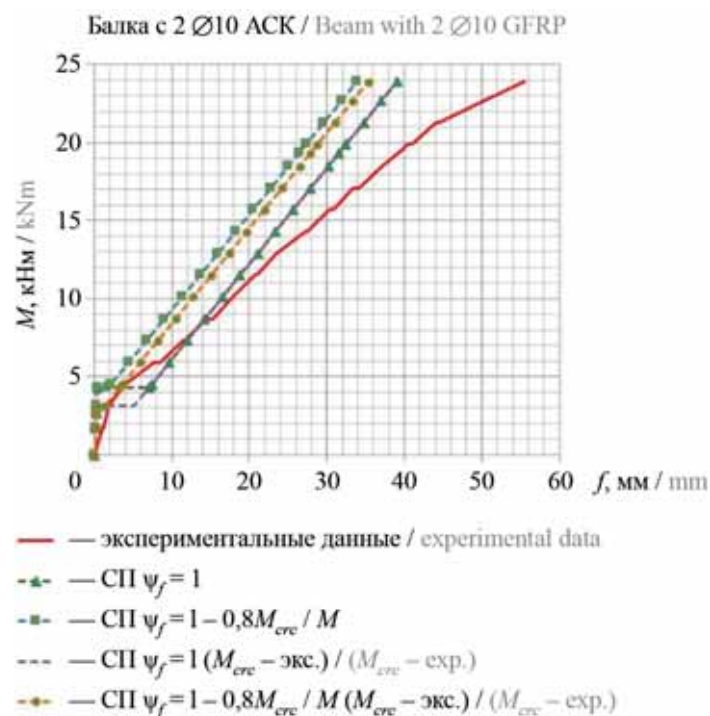


Рис. 2. Сравнение теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами по методике СП 295.1325800.2017 с экспериментальными данными для балки с двумя стержнями Ø10 АСК

Fig. 2. Comparison of theoretical moment-deflection curves according to the SP 295.1325800.2017 method with experimental data for beam reinforced with two bars Ø10 GFRP

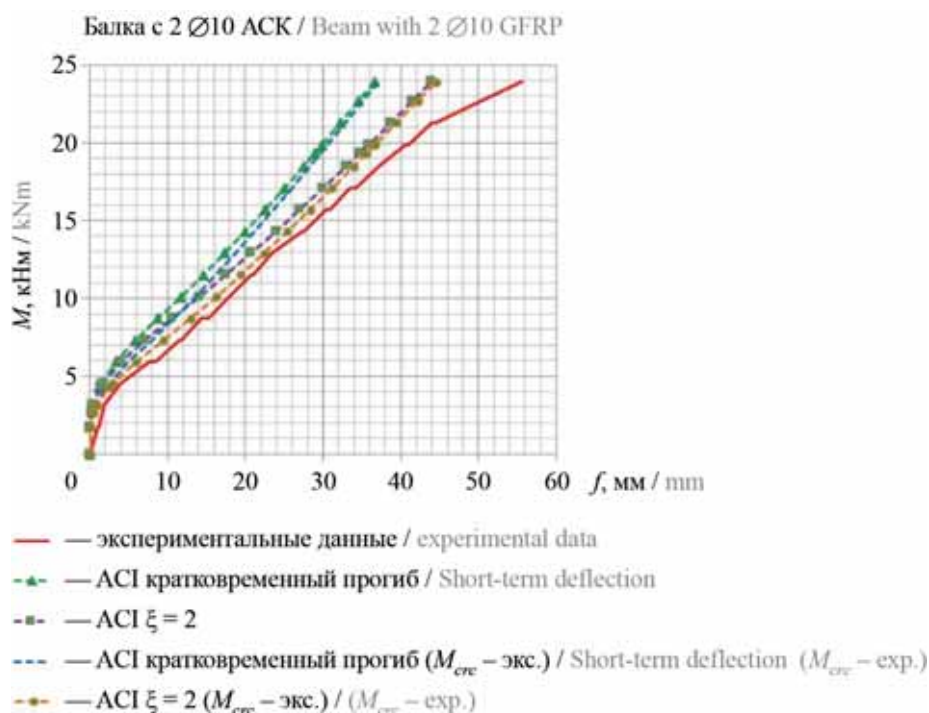


Рис. 3. Сравнение теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами по методике ACI 440.1R-06 с экспериментальными данными для балки с двумя стержнями Ø10 АСК

Fig. 3. Comparison of theoretical moment-deflection curves according to the ACI 440.1R-06 method with experimental data for beam reinforced with two bars Ø10 GFRP

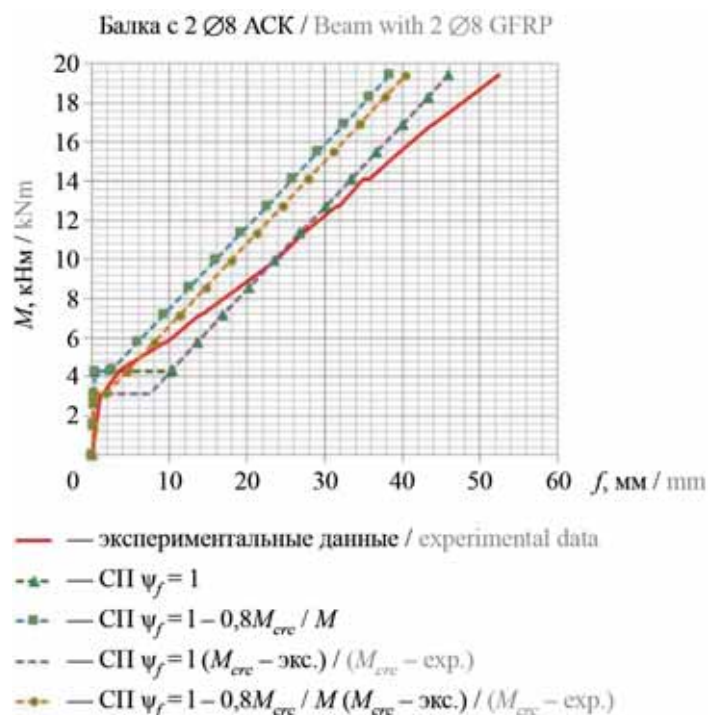


Рис. 4. Сравнение теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами по методике СП 295.1325800.2017 с экспериментальными данными для балки с двумя стержнями Ø8 АСК

Fig. 4. Comparison of theoretical moment-deflection curves according to the SP 295.1325800.2017 method with experimental data for beam reinforced with two bars Ø8 GFRP

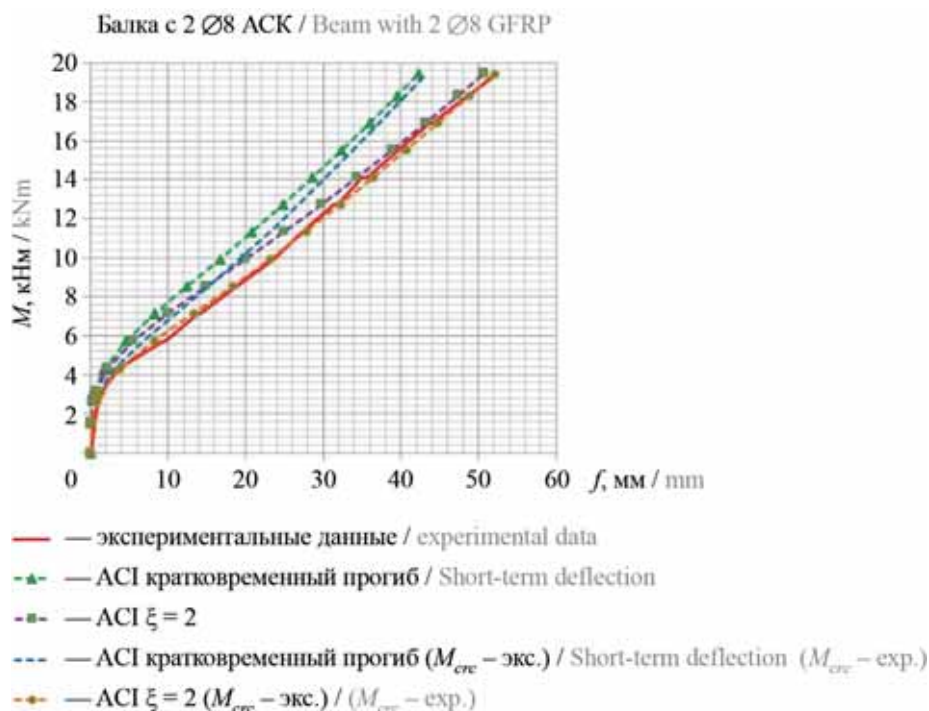


Рис. 5. Сравнение теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами по методике ACI 440.1R-06 с экспериментальными данными для балки с двумя стержнями Ø8 АСК

Fig. 5. Comparison of theoretical moment-deflection curves according to the ACI 440.1R-06 method with experimental data for beam reinforced with two bars Ø8 GFRP

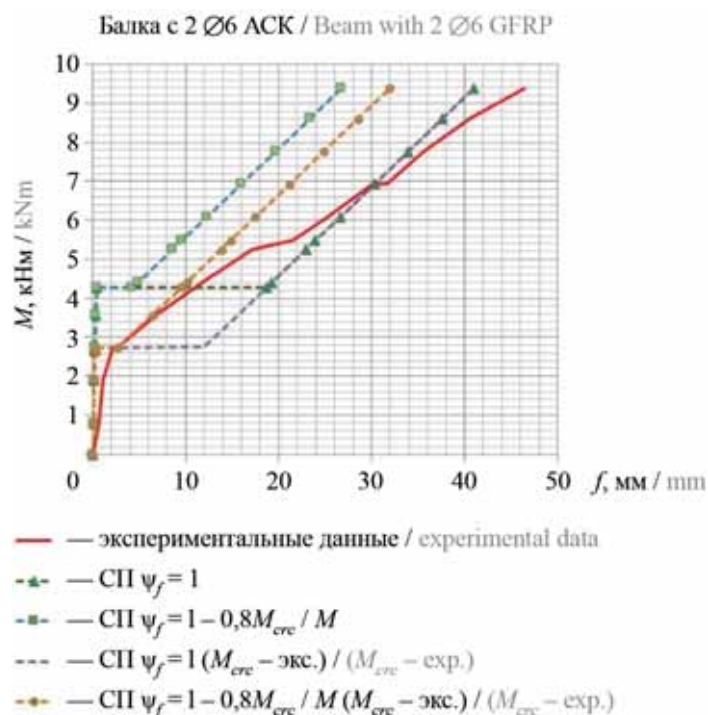


Рис. 6. Сравнение теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами по методике СП 295.1325800.2017 с экспериментальными данными для балки с двумя стержнями Ø6 АСК

Fig. 6. Comparison of theoretical moment-deflection curves according to the SP 295.1325800.2017 method with experimental data for beam reinforced with two bars Ø6 GFRP

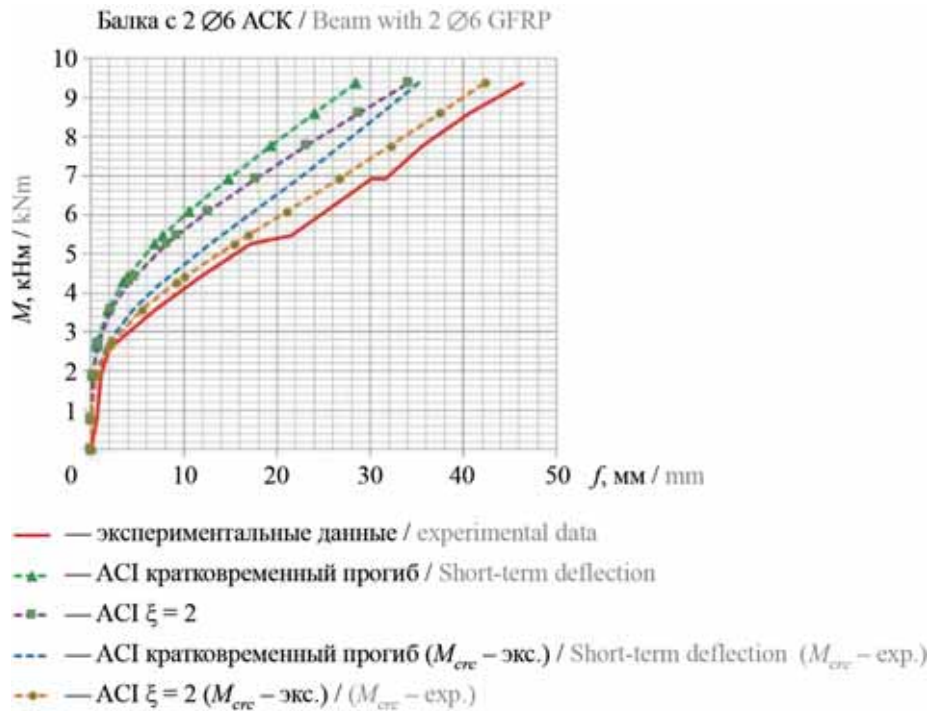


Рис. 7. Сравнение теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами по методике ACI 440.1R-06 с экспериментальными данными для балки с двумя стержнями Ø6 АСК

Fig. 7. Comparison of theoretical moment-deflection curves according to the ACI 440.1R-06 method with experimental data for beam reinforced with two bars Ø6 GFRP

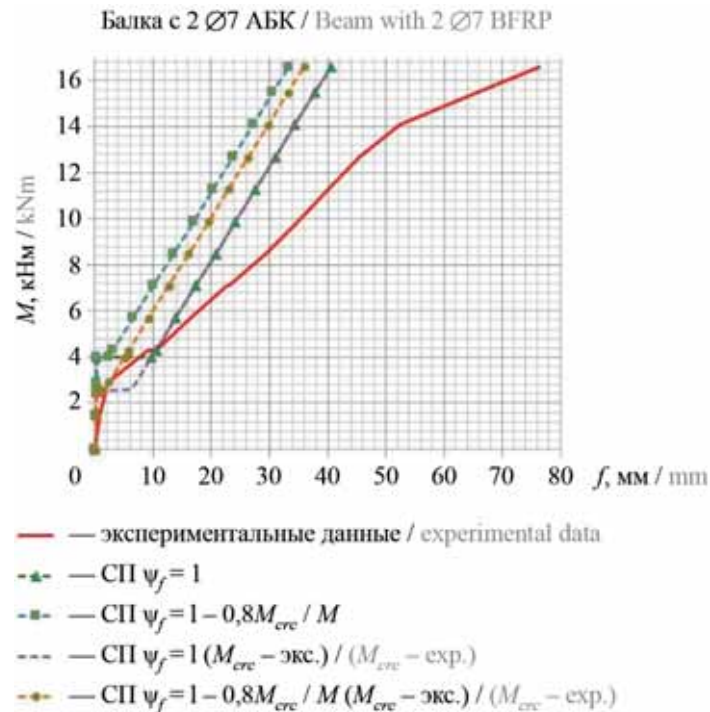


Рис. 8. Сравнение теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами по методике СП 295.1325800.2017 с экспериментальными данными для балки с двумя стержнями Ø7 АБК

Fig. 8. Comparison of theoretical moment-deflection curves according to the SP 295.1325800.2017 method with experimental data for beam reinforced with two bars Ø7 BFRP

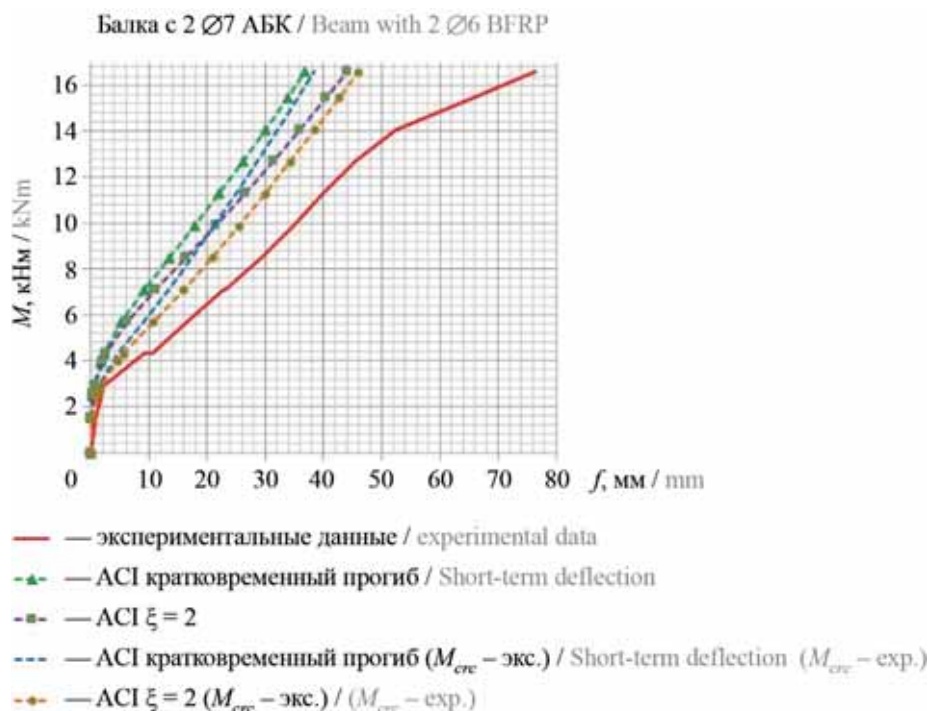


Рис. 9. Сравнение теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами по методике ACI 440.1R-06 с экспериментальными данными для балки с двумя стержнями Ø7 АБК

Fig. 9. Comparison of theoretical moment-deflection curves according to the ACI 440.1R-06 method with experimental data for beam reinforced with two bars Ø7 BFRP

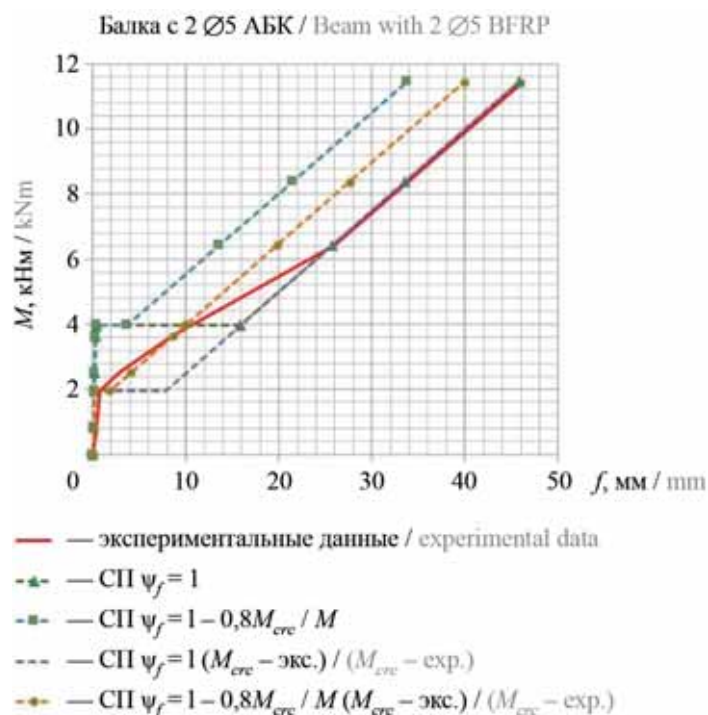


Рис. 10. Сравнение теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами по методике СП 295.1325800.2017 с экспериментальными данными для балки с двумя стержнями Ø5 АБК

Fig. 10. Comparison of theoretical moment-deflection curves according to the SP 295.1325800.2017 method with experimental data for beam reinforced with two bars Ø5 BFRP

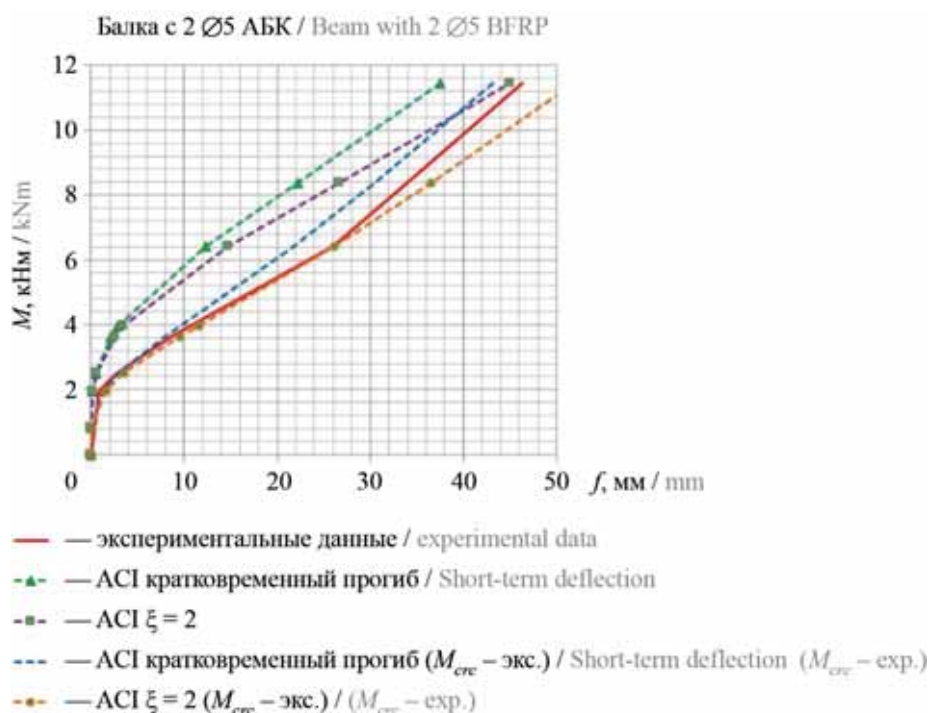


Рис. 11. Сравнение теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами по методике ACI 440.1R-06 с экспериментальными данными для балки с двумя стержнями Ø5 АБК

Fig. 11. Comparison of theoretical moment-deflection curves according to the ACI 440.1R-06 method with experimental data for beam reinforced with two bars Ø5 BFRP

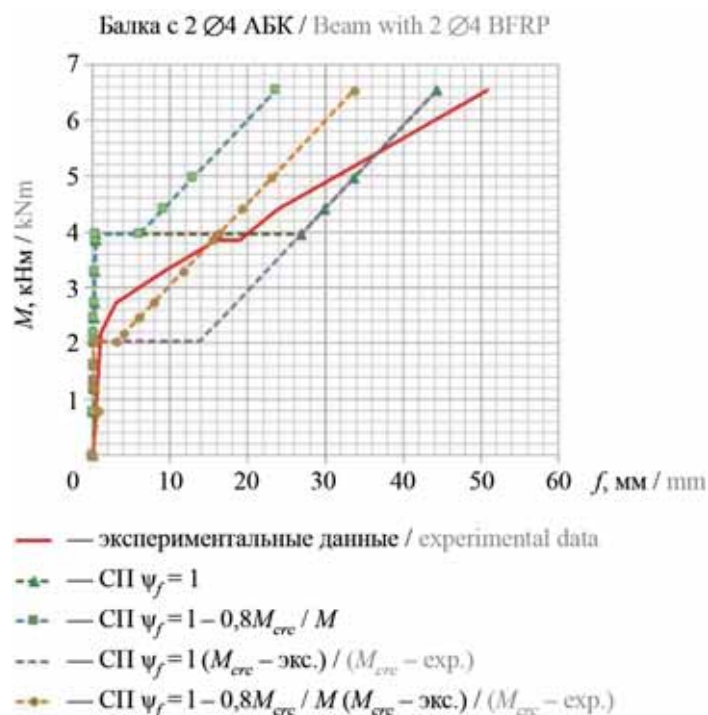


Рис. 12. Сравнение теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами по методике СП 295.1325800.2017 с экспериментальными данными для балки с двумя стержнями Ø4 АБК

Fig. 12. Comparison of theoretical moment-deflection curves according to the SP 295.1325800.2017 method with experimental data for beam reinforced with two bars Ø4 BFRP

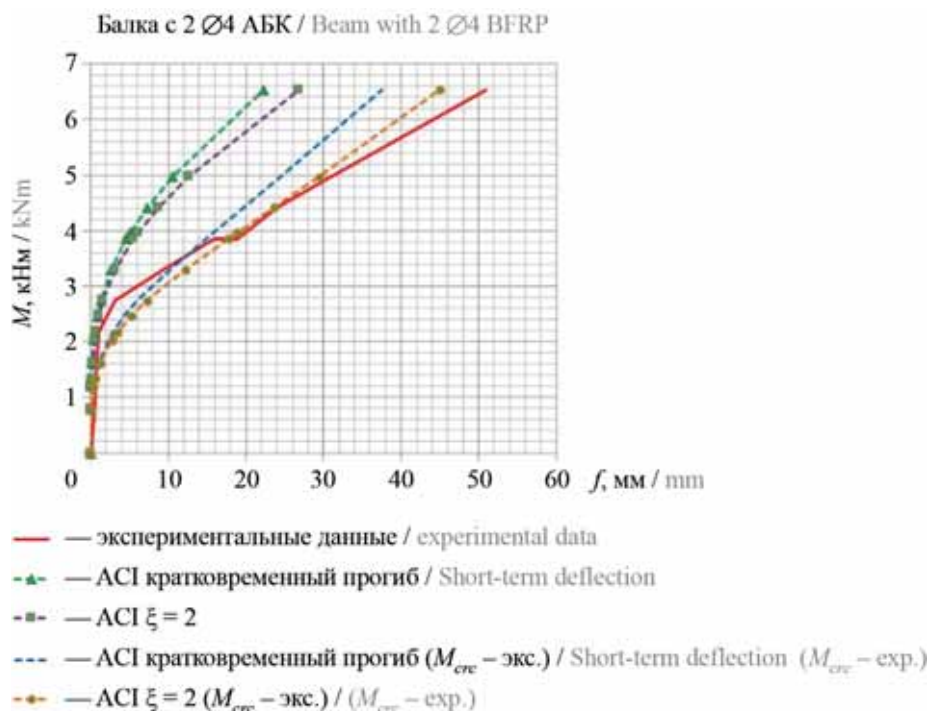


Рис. 13. Сравнение теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами по методике ACI 440.1R-06 с экспериментальными данными для балки с двумя стержнями Ø4 АБК

Fig. 13. Comparison of theoretical moment-deflection curves according to the ACI 440.1R-06 method with experimental data for beam reinforced with two bars Ø4 BFRP

Табл. 2. Сравнение величин экспериментальных и теоретических моментов трещинообразования

Table 2. Comparison of the values of experimental and theoretical of cracking moment

Номер серии Series No.	Количество и диаметр стержней, класс Number of bar, type	Экспериментальные данные Experimental data		Теоретические данные Theoretical data	
		M_{cr}^{exp} , кН·м кН·м	Среднее значение M_{cr}^{exp} , кН·м Mean value M_{cr}^{exp} , кН·м	СП 63.13330.2012, СП 295.1325800.2017 Construction rules and regulations 63.13330.2012, 295.1325800.2017	ACI 440.1R-06
1	2 Ø12 A400	3,575	3,575	3,995	—
	2 Ø8 A400	3,296–4,18	3,738	3,768	—
	2 Ø6 A400	2,57–3,156	2,863	3,682	—
2	2 Ø10 ACK 2 Ø10 GFRP	3,24–3,129	3,185	4,317	3,988
	2 Ø8 ACK 2 Ø8 GFRP	3,016–3,156	3,086	4,295	3,988
	2 Ø6 ACK 2 Ø6 GFRP	3,296–2,737	3,017	4,274	3,988
3	2 Ø7 АБК 2 Ø7 BFRP	2,095–2,57	2,333	3,99	3,773
	2 Ø5 АБК 2 Ø5 BFRP	1,955	1,955	3,973	3,773
	2 Ø4 АБК 2 Ø4 BFRP	1,201–2,039	1,62	3,962	3,773

Работа балок с АКП под нагрузкой характеризуется преимущественно линейной зависимостью $M-f$ после образования трещин вплоть до разрушения. Расчетные диаграммы рассматриваемых методик после предполагаемого образования трещин также прямолинейны. Диаграммы методики СП 295.1325800.2017 в точке образования трещин имеют горизонтальный участок, что вызвано переходом от расчета прогибов элемента без трещин к расчету с их учетом. Оценивая диаграммы методики СП 295.1325800.2017 от начала загрузки до разрушения балок, сложно выбрать наиболее достоверный вариант расчета прогибов. Нет единого варианта расчета, который для всех балок на всех этапах загрузки имел бы наиболее близкие результаты с экспериментальными данными. Предельное отклонение теоретических значений максимального прогиба по методике СП 295.1325800.2017 от опытных составляет 53,6 %, по методике ACI 440.1R-06 — 56,1 %.

Для методики ACI 440.1R-06 наиболее близким к экспериментальным данным является вариант с коэффициентом $\xi = 2$ и использованием эксперимен-

тальных значений момента трещинообразования. В этом расчете кратковременный прогиб умножался на коэффициент $\lambda = 0,6\xi = 0,6 \cdot 2 = 1,2$. При расчете предельное отклонение теоретических значений максимального прогиба от опытных значений составляет 39,8 %. Стоит отметить, что в отличие от расчетных диаграмм методики СП 295.1325800.2017 диаграммы ACI 440.1R-06 по очертаниям наиболее близки к экспериментальным.

Однако учитывая, что при расчете конструкций по второй группе предельных состояний предъявляется требование $f \leq f_u$, т.е. расчетный прогиб не должен превышать предельно допустимого значения, наиболее ответственным участком диаграммы для исследования является интервал $f = (0 \dots f_u)$. В табл. 3 и на рис. 14 показано сравнение теоретических и экспериментальных значений прогибов балок, соответствующих предельно допустимому значению — $(1/200)l_0 = 8,55$ мм.

В табл. 4 представлены предельные и средние отклонения теоретических значений прогибов, приведенные в табл. 3, от величины $[f] = (1/200)l_0 = 8,55$ мм.

Табл. 3. Результаты исследования балок — опытные изгибающие моменты M при прогибе балок $[f] = (1/200)l_0 = 8,55$ мм и соответствующие им теоретические значения

Table 3. Findings of the beam studies, including experimental bending moments M at crack deflection $[f] = (1/200)l_0 = 8,55$ mm and corresponding theoretical data on the deflection of beam specimens

Номер серии / Series No.	Армирование балки Reinforcement of beam specimens	Экспериментальные данные Experimental data		Теоретические данные — прогиб f , мм Theoretical data — deflection f , mm							
		Изгибающий момент при $f = 8,55$ мм, M , кН·м Bending moment at $f = 8,55$ mm, M , кН·м	Ширина раскрытия трещин a_{cr} , мм Crack width a_{cr} , mm	СП 63.13330.2012, СП 295.1325800.2017 Construction rules and regulations 63.13330.2012, 295.1325800.2017				ACI 440.1R-06			
				M_{cre} — теоретический theoretical		M_{cre} — экспериментальный experimental		M_{cre} — теоретический theoretical		M_{cre} — экспериментальный experimental	
				$\psi_f = 1$	$\psi_f = 1 - 0,8 \frac{M_{cre}}{M}$			Кратко- временный Short-term	$\xi = 2$	Кратко- временный Short-term	$\xi = 2$
1	2 Ø12 A400	11,08	0,15	—	—	—	—	—	—	—	—
	2 Ø8 A400	8,1	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—
	2 Ø6 A400	5,58	0,8	—	—	—	—	—	—	—	—
2	2 Ø10 ACK 2 Ø10 GFRP	5,89	0,5	9,618	4,395	5,789	—	3,285	3,942	4,806	5,768
	2 Ø8 ACK 2 Ø8 GFRP	5,576	0,8	13,176	5,533	7,718	—	4,189	5,027	6,544	7,853
	2 Ø6 ACK 2 Ø6 GFRP	3,88	1,1	0,364*	0,364*	6,849	—	2,477	2,972	4,777	5,732
3	2 Ø7 АБК 2 Ø7 BFRP	4,5	0,5	11,007	3,642	6,752	—	2,527	3,032	6,036	7,244
	2 Ø5 АБК 2 Ø5 BFRP	3,755	1,1	0,436*	0,436*	9,09	—	2,386	2,863	8,501	10,201
	2 Ø4 АБК 2 Ø4 BFRP	3,15	1,35	0,305*	0,305*	12,911	—	2,238	2,685	12,518	15,021

Примечание: * — $M < M_{cre}$, по расчету трещины не образуются.

Note: * — $M < M_{cre}$, means no cracking according to the theoretical data.

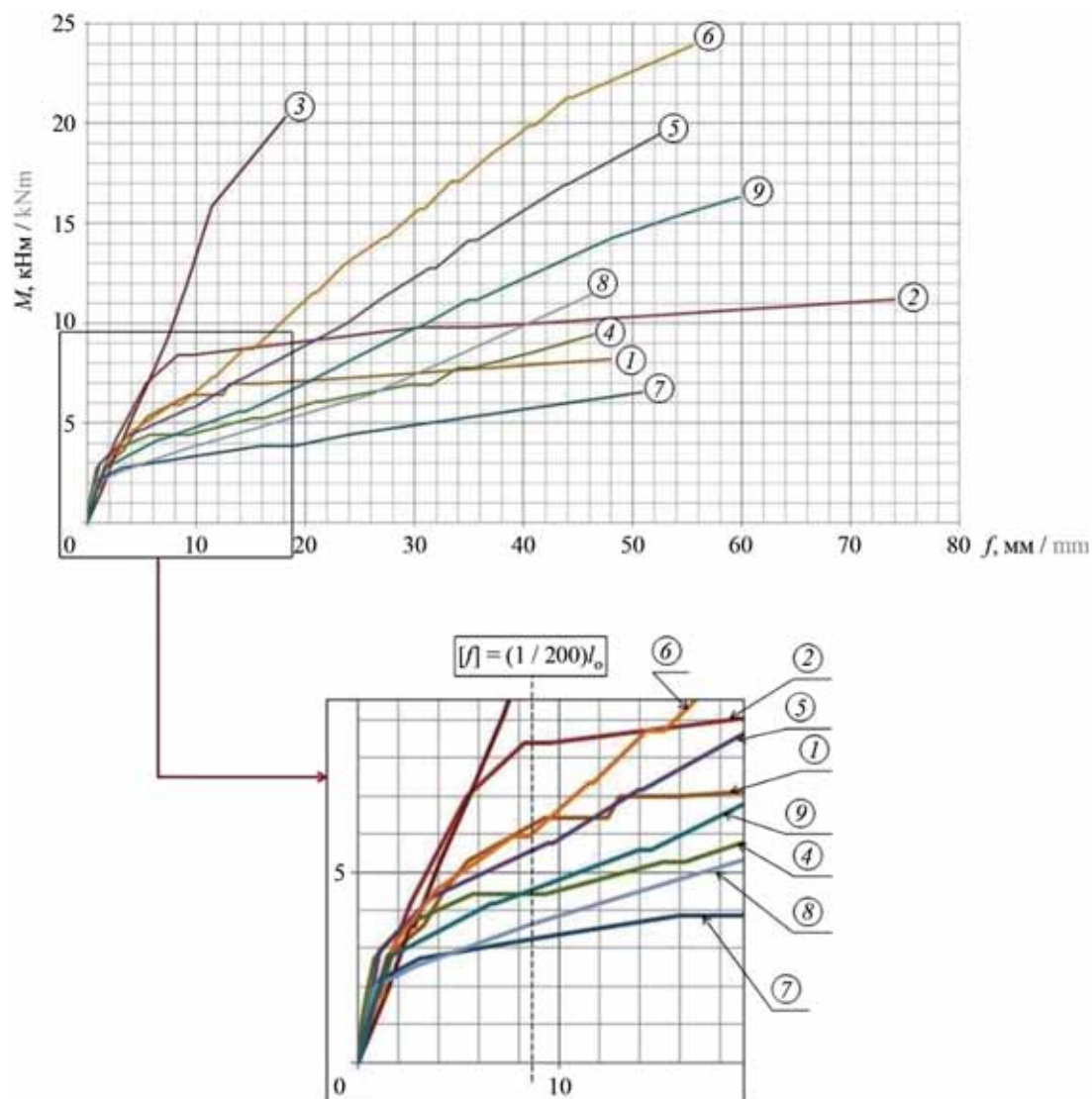


Рис. 14. Зависимости между величинами изгибающего момента и прогибами, полученные по данным испытаний опытных образцов балок: 1 — Ø6 A400; 2 — Ø8 A400; 3 — Ø12 A400; 4 — Ø6 АКК; 5 — Ø8 АКК; 6 — Ø10 АКК; 7 — Ø4 АБК; 8 — Ø5 АБК; 9 — Ø7 АБК

Fig. 14. Moment-deflection curves obtained as a result of testing beam specimens: 1 — Ø6 A400; 2 — Ø8 A400; 3 — Ø12 A400; 4 — Ø6 GFRP; 5 — Ø8 GFRP; 6 — Ø10 GFRP; 7 — Ø4 BFRP; 8 — Ø5 BFRP; 9 — Ø7 BFRP

Табл. 4. Предельные и средние отклонения теоретических значений прогибов (табл. 3) от величины $[f] = (1/200)l_0 = 8,55$ мм
Table 4. Limit and average deviations of the theoretical values of the deflection (Table 3) from the value $[f] = (1/200)l_0 = 8.55$ mm

СП 63.13330.2012, СП 295.1325800.2017 Construction rules and regulations 63.13330.2012, 295.1325800.2017			ACI 440.1R-06			
M_{cre} — теоретический theoretical		M_{cre} — экспериментальный experimental	M_{cre} — теоретический theoretical		M_{cre} — экспериментальный experimental	
$\psi_f = 1$	$\psi_f = 1 - 0,8 \frac{M_{cre}}{M}$		Кратковременный прогиб Short-term deflection	$\xi = 2$	Кратковременный прогиб Short-term deflection	$\xi = 2$
$\frac{11,1 - 96,4}{46,6}$	$\frac{25,3 - 96,4}{59,6}$	$\frac{5,9 - 33,8}{22,1}$	$\frac{51 - 73,8}{66,7}$	$\frac{41,2 - 68,6}{60}$	$\frac{0,6 - 44,1}{28,8}$	$\frac{8,2 - 43,1}{24,7}$

Примечание: в числителе — минимальное и максимальное отклонения, в знаменателе — среднее.

Note: in the numerator — minimum and maximum deviation, in the denominator — mean.

Наиболее близкие к экспериментальным данным результаты дает методика АСІ при $\xi = 2$. Предельное отклонение от опытных составляет 68,6 %. Наиболее близкие показатели к экспериментальным значениям по методике СП получены при $\psi_f = 1 - 0,8M_{crc}/M$. Предельное отклонение от опытных составляет 33,8 %. Для методики АСІ при $\xi = 2$ предельное отклонение — 43,1 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование показало, что неточное определение момента трещинообразования оказывает негативное влияние на результаты расчета прогибов. При использовании экспериментальных значений момента трещинообразования M_{crc} результаты вычислений прогибов по рассматриваемым методикам СП 295.1325800.2017 и АСІ 440.1R-06 ближе к опытным данным, чем при расчетах с расчетными, теоретическими значениями M_{crc} . Для балок с композитной арматурой отклонение теоретических данных момента трещинообразования по методике СП 295.1325800.2017 от опытных составляет 26,2–59,1 %, у методики АСІ 440.1R-06 — 20,1–57,1 %.

Оценивая теоретические зависимости между величинами изгибающего момента и прогибами от начала загрузки до разрушения балок, можно сделать вывод, что наиболее близкой к экспериментальным значениям по величинам прогиба и форме диаграмм является методика АСІ 440.1R-06. При этом более точным служит алгоритм, в котором кратковременный прогиб вычисляется с учетом коэффициента $\lambda = 0,6\xi = 0,6 \cdot 2 = 1,2$ и используются экспери-

ментальные значения момента трещинообразования. При этом варианте расчета предельное отклонение теоретических значений максимального прогиба от опытных составляет 39,8 %. Очертания диаграмм ($M-f$) по методике СП 295.1325800.2017 существенно отличаются от опытных. Выбрать наиболее достоверный вариант расчета из рассмотренных проблематично, ввиду значительного разброса результатов на различных этапах загрузки балок.

При оценке достоверности рассматриваемых методик оценки величин прогибов при достижении предельного значения прогиба $[f] = (1/200)l_0 = 8,55$ мм установлено, что использование экспериментальных значений момента трещинообразования также повысило точность расчетов. Наиболее близкими результатами к экспериментальным данным при использовании экспериментальных значений M_{crc} обладает методика СП 295.1325800.2017 при $\psi_f = 1 - 0,8M_{crc}/M$. Предельное отклонение от опытных показателей составляет 33,8 %.

Полученные результаты показали необходимость совершенствования методики СП 295.1325800.2017 в части расчета прогибов изгибаемых элементов с АКП. На первом этапе возможно приблизить теоретические значения момента трещинообразования к опытным данным путем введения поправочных коэффициентов в выражение по определению M_{crc} : для балок с АСК периодического профиля — 0,7, для АБК с опесчанной поверхностью — 0,5. При скорректированных значениях M_{crc} предельное отклонение теоретических данных при прогибе $[f] = (1/200)l_0 = 8,55$ мм от опытных составляет 30 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Attia K., El Refai A., Alnahhal W. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips with BFRP bars: Experimental testing and numerical simulation // Journal of Composites for Construction. 2020. Vol. 24. No. 2. P. 04020007. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001002
2. Mohammed R.S., Fangyuan Z. Numerical investigation of the behavior of reinforced concrete beam reinforced with FRP bars // Civil Engineering Journal. 2019. Vol. 5. No. 11. Pp. 2296–2308. DOI: 10.28991/cej-2019-03091412
3. Pawłowski D., Szumigala M. Flexural behaviour of full-scale basalt FRP RC beams — experimental and numerical studies // Procedia Engineering. 2015. Vol. 108. Pp. 518–525. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.114
4. Acciai A., D'Ambrisi A., De Stefano M., Feo L., Focacci F., Nudo R. Experimental response of FRP reinforced members without transverse reinforcement: Failure modes and design issues // Composites Part B: Engineering. 2016. Vol. 89. Pp. 397–407. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.01.002
5. Adam M.A., Said M., Mahmoud A.A., Shanou A.S. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 84. Pp. 354–366. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057
6. El-Nemr A., Ahmed E.A., El-Safty A., Benmokrane B. Evaluation of the flexural strength and serviceability of concrete beams reinforced with different types of GFRP bars // Engineering Structures. 2018. Vol. 173. Pp. 606–619. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.089
7. Ju M., Park Y., Park C. Cracking control comparison in the specifications of serviceability in cracking for FRP reinforced concrete beams // Composite Structures. 2017. Vol. 182. Pp. 674–685. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.016
8. Adam M.A., Said M., Mahmoud A.A., Shanou A.S. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars // Construction and Building Materials.

2015. Vol. 84. Pp. 354–366. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057

9. *Al-Sunna R., Pilakoutas K., Hajirasouliha I., Guadagnini M.* Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation // *Composites Part B: Engineering*. 2012. Vol. 43. No. 5. Pp. 2125–2134. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.03.007

10. *Urbanski M., Lapko A., Garbacz A.* Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C structures // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57. Pp. 1183–1191. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.149

11. *Ruan XJ., Lu CH., Xu K., Xuan GY., Ni MZ.* Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars // *Composite Structures*. 2020. Vol. 235. P. 111772. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111772

12. *Barris C., Torres L., Vilanova I., Miàs C., Llorens M.* Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 131. Pp. 231–242. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.11.007

13. *Kim S., Kim S.* Flexural behavior of concrete beams with steel bar and FRP reinforcement // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2019. Vol. 18. No. 2. Pp. 89–97. DOI: 10.1080/13467581.2019.1596814

14. *Pan M.X., Xu X.S.* Study on crack development of concrete beams in bending reinforced with FRP bars // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 61. P. 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/61/1/012037

15. *Lapko A., Urbanski M.* Experimental and theoretical analysis of deflections of concrete beams reinforced with basalt rebar // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 15. No. 1. Pp. 223–230. DOI: 10.1016/j.acme.2014.03.008

16. *Barris C., Torres L., Turon A., Baena M., Mias C.* Experimental study of flexural behaviour of GFRP reinforced // 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2008). Zurich, Switzerland, 2008.

17. *Gross S., Yost J., Kevgas G.* Time-dependent behavior of normal and high strength concrete beams reinforced with GFRP bars under sustained loads // *High Performance Materials in Bridges*. 2003. DOI: 10.1061/40691(2003)40

18. *Barris C., Torres L., Comas J., Mias C.* Cracking and deflections in GFRP RC beams: an experi-

mental study // *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 55. Pp. 580–590. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.07.019

19. *Feizbahr M., Jayaprakash J., Jamshidi M., Keong C.K.* Review on various types and failures of fibre reinforcement polymer // *Middle East Journal of Scientific Research*. 2013. Vol. 13. No. 10. Pp. 1312–1318. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2013.13.10.1180

20. *Бегунова Н.В., Грахов В.П., Возмищев В.Н., Кислякова Ю.Г.* Сравнительная оценка результатов испытаний бетонных балок с композитной арматурой и расчетных данных // *Наука и техника*. 2019. Т. 18. № 2. С. 155–163. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-155-163

21. *Ng P.L., Barros J.A.O., Kaklauskas G., Lam J.Y.K.* Deformation analysis of fibre-reinforced polymer reinforced concrete beams by tension-stiffening approach // *Composite Structures*. 2020. Vol. 234. P. 111664. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111664

22. *Elgabbas F., Ahmed E.A., Benmokrane B.* Flexural behavior of concrete beams reinforced with ribbed basalt-FRP bars under static loads // *Journal of Composites for Construction*. 2017. Vol. 21. Issue 3. P. 04016098. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000752

23. *Борисова Т.А., Зиннуров Т.А., Куклин А.Н.* Исследование влияния температурного воздействия на работу стеклопластиковой арматуры в бетонных конструкциях // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 2 (44). С. 136–144.

24. *Mirsayapov I., Antakov I., Antakov A.* Improving methods of strength design of normal sections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 890. P. 012057. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012057

25. *Антаков А.Б., Антаков И.А.* Экспериментальные исследования изгибаемых элементов с полимеркомпозитной арматурой при длительном приложении нагрузки // *Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции* : мат. III Междунар. (IX Всеросс.) конф. НАСКР-2016. Чебоксары, 2016. С. 67–72.

26. *Pecce M., Manfredi G., Cosenza E.* A Probabilistic assessment of deflections in FRP RC beams // *Proceedings of 5th International Conference on Non-metallic Reinforcement for Concrete Structures — FR-PRCS-5*, Cambridge, 16–18 July, Thomas Telford Publishing. 2001. Vol. 2. Pp. 887–896.

Поступила в редакцию 10 марта 2020 г.

Принята в доработанном виде 5 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 12 апреля 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Илшат Талгатович Мирсаяпов** — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 621651, Scopus: 54403302600, ResearcherID: G-7228-2019, ORCID: 0000-0003-4902-6167; itmir@kgasu.ru;

Игорь Андреевич Антаков — ассистент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 988840, ResearcherID: M-5127-2018, ORCID: 0000-0002-5238-1701; igor788@bk.ru;

Алексей Борисович Антаков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 260835, ORCID: 0000-0001-8712-4134; antakof@mail.ru.

REFERENCES

1. Attia K., El Refai A., Alnahhal W. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips with BFRP bars: Experimental testing and numerical simulation. *Journal of Composites for Construction*. 2020; 24(2):04020007. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001002
2. Mohammed R.S., Fangyuan Z. Numerical investigation of the behavior of reinforced concrete beam reinforced with FRP bars. *Civil Engineering Journal*. 2019; 5(11):2296-2308. DOI: 10.28991/cej-2019-03091412
3. Pawłowski D., Szumigala M. Flexural behaviour of full-scale basalt FRP RC beams — experimental and numerical studies. *Procedia Engineering*. 2015; 108:518-525. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.114
4. Acciai A., D'Ambrisi A., De Stefano M., Feo L., Focacci F., Nudo R. Experimental response of FRP reinforced members without transverse reinforcement: Failure modes and design issues. *Composites Part B: Engineering*. 2016; 89:397-407. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.01.002
5. Adam M.A., Said M., Mahmoud A.A., Shanour A.S. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. *Construction and Building Materials*. 2015; 84:354-366. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057
6. El-Nemr A., Ahmed E.A., El-Safty A., Benmokrane B. Evaluation of the flexural strength and serviceability of concrete beams reinforced with different types of GFRP bars. *Engineering Structures*. 2018; 173:606-619. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.089
7. Ju M., Park Y., Park C. Cracking control comparison in the specifications of serviceability in cracking for FRP reinforced concrete beams. *Composite Structures*. 2017; 182:674-685. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.016
8. Adam M.A., Said M., Mahmoud A.A., Shanour A.S. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. *Construction and Building Materials*. 2015; 84:354-366. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057
9. Al-Sunna R., Pilakoutas K., Hajirasouliha I., Guadagnini M. Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation. *Composites Part B: Engineering*. 2012; 43(5):2125-2134. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.03.007
10. Urbanski M., Lapko A., Garbacz A. Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C structures. *Procedia Engineering*. 2013; 57:1183-1191. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.149
11. Ruan X.J., Lu C.H., Xu K., Xuan G.Y., Ni M.Z. Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars. *Composite Structures*. 2020; 235:111772. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111772
12. Barris C., Torres L., Vilanova I., Miàs C., Llorens M. Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures*. 2017; 131:231-242. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.11.007
13. Kim S., Kim S. Flexural behavior of concrete beams with steel bar and FRP reinforcement. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2019; 18(2):89-97. DOI: 10.1080/13467581.2019.1596814
14. Pan M.X., Xu X.S. Study on crack development of concrete beams in bending reinforced with FRP bars. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 61:012037. DOI: 10.1088/1755-1315/61/1/012037
15. Lapko A., Urbański M. Experimental and theoretical analysis of deflections of concrete beams reinforced with basalt rebar. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2015; 15(1):223-230. DOI: 10.1016/j.acme.2014.03.008
16. Barris C., Torres L., Turon A., Baena M., Mias C. Experimental study of flexural behaviour of GFRP reinforced. *4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2008)*. Zurich, Switzerland, 2008.
17. Gross S., Yost J., Kevgas G. Time-dependent behavior of normal and high strength concrete beams reinforced with GFRP bars under sustained loads. *High Performance Materials in Bridges*. 2003. DOI: 10.1061/40691(2003)40
18. Barris C., Torres L., Comas J., Mias C. Cracking and deflections in GFRP RC beams: an experimental study. *Composites Part B: Engineering*. 2013; 55:580-590. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.07.019
19. Feizbahr M., Jayaprakash J., Jamshidi M., Keong C.K. Review on Various Types and Failures of

Fibre Reinforcement Polymer. *Middle East Journal of Scientific Research*. 2013; 13(10):1312-1318. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2013.13.10.1180

20. Begunova N.V., Grahov V.P., Vozmishchev V.N., Kislyakova I.G. Comparative evaluation of results on test of concrete beams with fiberglass rebar and calculated data. *Science and Technique*. 2019; 18(2):155-163. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-155-163 (rus.).

21. Ng P.L., Barros J.A.O., Kaklauskas G., Lam J.Y.K. Deformation analysis of fibre-reinforced polymer reinforced concrete beams by tension-stiffening approach. *Composite Structures*. 2020; 234:111664. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111664

22. Elgabbas F., Ahmed E.A., Benmokrane B. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Ribbed Basalt-FRP Bars under Static Loads. *Journal of Composites for Construction*. 2017; 21(3):04016098. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000752

23. Borisova T.A., Zinnurov T.A., Kuklin A.N. Investigation of the influence of temperature impact on

the work of fiberglass reinforcement in concrete structures. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018; 2(44):136-144. (rus.).

24. Mirsayapov I., Antakov I., Antakov A. Improving methods of strength design of normal sections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 890:012057. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012057

25. Antakov A., Antakov I. Experimental studies of flexural members with fiberreinforced polymer reinforcement under sustained load application. *New in architecture, design construction and renovation : Proceedings of the III International (IX All-Russia) Conference (NADCR – 2016)*. Cheboksary, 2016; 67-72. (rus.).

26. Pecce M., Manfredi G., Cosenza E. A probabilistic assessment of deflections in FRP RC beams. *Proceedings of 5th International Conference on Non-metallic Reinforcement for Concrete Structures — FR-PRCS-5, Cambridge, 16–18 July, Thomas Telford Publishing*. 2001; 2:887-896.

Received March 10, 2020.

Adopted in revised form on April 5, 2021.

Approved for publication on April 12, 2021.

BIONOTES: **Ilshat T. Mirsayapov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 621651, Scopus: 54403302600, ResearcherID: G-7228-2019, ORCID: 0000-0003-4902-6167; itmir@kgasu.ru;

Igor A. Antakov — assistant of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 988840, ResearcherID: M-5127-2018, ORCID: 0000-0002-5238-1701; igor788@bk.ru;

Alexey B. Antakov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 260835, ORCID: 0000-0001-8712-4134; antakof@mail.ru.

Клеевое соединение композиционных материалов в условиях ускоренного климатического старения

Г.В. Мартынов, Д.Е. Монастырева, Н.С. Астафьева

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Пултрузионный стеклопластик можно назвать материалом будущего благодаря его свойствам — высокой прочности, низкому удельному весу, устойчивости к агрессивной среде. Важные аспекты для развития композиционных материалов — методы обработки поверхностей и способы соединения конструктивных элементов. Клеевое соединение зарекомендовало себя, как наиболее эффективное, но остается необходимость проведения исследований его долговечности. Метод ускоренных циклических термовлажностных испытаний позволит определить ожидаемые изменения в прочности клеевого соединения в сжатые сроки.

Материалы и методы. Образцы, представляющие собой три склеенные пластины строительного стеклопластика СППС, обрабатывали в климатической камере и после каждого цикла испытывали на машине ГРМ-1. Один цикл климатических испытаний включал нахождение в камере с повышенной влажностью и температурой с последующим перемещением в камеру холода. Образцы испытывали до скалывания, фиксировали возникающие разрушающие напряжения. Последний цикл соответствовал пяти годам эксплуатации конструкции.

Результаты. Полученные данные были обработаны, характер изменения прочностных характеристик со временем наглядно представлен в графическом виде. С применением аппроксимирующих зависимостей вычислены коэффициенты снижения прочности клеевого соединения через 100 лет. Проведенные испытания образцов показали значительное изменение характеристик соединений со временем. В первые два года эксплуатации ожидается снижение прочности на 25 %. Последняя характерная точка испытаний, соответствующая пяти годам, продемонстрировала падение до 60 % от изначальных характеристик.

Выводы. Данные результаты следует учитывать на стадии проектирования несущих конструкций, незащищенных от контакта с внешней средой. А коэффициенты снижения прочности через 100 лет возможно включить в нормативные документы для расчета особо ответственных сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: клеевое соединение, климатическое старение, стеклопластик, усилие сдвига, эксплуатация, тепловлажностная обработка, разрушающие напряжения, прогнозирование

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам данной статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мартынов Г.В., Монастырева Д.Е., Астафьева Н.С. Клеевое соединение композиционных материалов в условиях ускоренного климатического старения // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 4. С. 429–437. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.429-437

Adhesive compound of composite materials in conditions of accelerated climatic aging

Gleb V. Martynov, Daria E. Monastireva, Natalia S. Astafieva

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

ABSTRACT

Introduction. Pultruded fiberglass can be called the material of the future due to its properties — high strength, low weight, resistance to aggressive environment. Important aspects for the development of composite materials are surface treatment methods and methods of connecting structural elements. Glue compound has proven itself as the most effective, but there remains a need to conduct studies of its durability. The method of accelerated cyclic thermal tests allows to determine the expected changes in the strength of adhesive bonding in a short time.

Materials and methods. Samples, which are three glued plates of SPPS fiberglass construction, were processed in a climate chamber and after each cycle they were tested on a GRM-1 machine. One climatic test cycle included being in a chamber with high humidity and temperature and then moving into the cold chamber. The specimens were tested prior to spalling, and the resulting disruptive stresses were recorded. The last test cycle corresponded to five years of operation of the structure.

Results. The tests of the samples showed a significant change in the characteristics of the compounds over time. In the first two years of operation, a decrease in strength of 25 % is expected. The last characteristic test point, corresponding to five years, showed a drop to 60 % of the initial characteristics.

Conclusions. The results should be considered at the design stage of supporting structures that are not protected from contact with the external environment. The factors of strength reduction after 100 years may be included in the regulatory documents for the calculation of especially important structures.

KEYWORDS: adhesive bonding, climatic aging, fiberglass, shear force, operation, heat and moisture treatment, destructive stresses, prediction

Acknowledgements: Authors would like to thank the anonymous reviewers of this article.

FOR CITATION: Martynov G.V., Monastireva D.E., Astafieva N.S. Adhesive compound of composite materials in conditions of accelerated climatic aging. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):429-437. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.429-437 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Возможности модификации такого материала, как пултрузионный стеклопластик, являются достаточно обширными благодаря особенностям технологии его производства, а также путем изменения угла ориентации волокон [1]. Обработка волокон смолами обеспечивает высокую устойчивость к агрессивным средам и монолитность, стеклянные волокна становятся легкими и прочными, хоть это и не отменяет необходимость уделения особого внимания термостойкости материала [2, 3]. Данный материал применим в любых гражданских и промышленных зданиях, инженерных сооружениях [4]. С конца прошлого века целые мосты возводились без использования классических строительных материалов вследствие низкой стоимости и простоты монтажа конструкций из композитов [5–7]. Однако стеклопластик — относительно молодой материал, что не позволяет на опытных основаниях утверждать о его долговечности в масштабах столетий. Для таких ответственных инженерных сооружений, как авто- и железнодорожные мосты нужен гарант прочности и устойчивости в долгосрочной перспективе. С целью обеспечения подобных показателей на стадии проектирования требуются проведение экспериментальных исследований по ускоренному старению в условиях климатического воздействия и учет соответствующих понижающих коэффициентов по потере прочности со временем [8]. Существует множество способов соединения конструкций из композиционных материалов. Можно разделить их на две группы — механические и клеевые. Первая группа обладает рядом недостатков ввиду специфики структуры пултрузионного стеклопластика. Например, из-за анизотропности и неоднородности материала сверление может снизить прочность и даже привести к разрушению конструкции. Более рационально применение клеевых соединений, обуславливающих равномерную концентрацию напряжений и хорошую изоляцию [9, 10]. Отсутствие больших остаточных напряжений и концентраторов напряжений создает такое перераспределение. Группа ученых из Делфтского технического университета (Нидерланды), Университетского колледжа Дублина (Ирландия) и Университета Саленто (Италия) продемонстрировала увеличение сопротивления сдвигу клеевого соединения до 31,7 МПа при кратковременном УФ-облучении композитов [11]. Кроме этого, клеевое соединение дает возможность склеивания тонкостен-

ных деталей. К недостаткам этого соединения можно отнести необходимость подготовки поверхностей перед склеиванием и невозможность демонтажа соединения. Во многом прочность клеевого соединения зависит от качества контактирующих поверхностей. Множество исследований посвящено различным методам обработки. В ряде экспериментальных работ коллег из Университета Северной Дакоты (США) в качестве оптимального определено шлифование шкуркой [12]. Несмотря на неравномерность и трудоемкость процесса, в результате будет получен рельеф с хорошей адгезионной способностью [13]. Р.В. Хуменюк произвел оценку прочности клеевых соединений, однако влияние климатического старения на изменение прочности таких соединений во времени учтено не было [14]. Учеными из Балтийского федерального университета имени И. Канта произведена оценка разрушения клеевых соединений под действием окружающей среды, но авторы сконцентрировали внимание на механике образования трещины без каких-либо долгосрочных прогнозных данных [15]. В издании «Новости материаловедения» были опубликованы результаты исследований работоспособности клеевых соединений в условиях, близких к прибрежным условиям Арктики [16]. Хотя клеевое соединение имеет сложную химическую природу, оно оказалось универсальным и применимым даже в экстремальных условиях. Тем не менее особенность проводимых ранее исследований — их полевой и не долгосрочный характер. Испытания осуществлялись на исследовательских северных станциях в течение пяти лет — такой подход невозможно реализовать для всех необходимых видов композитов и, к сожалению, он не дает гарантий сохранения свойств на более длительном промежутке времени. Алжирскими учеными из Университета Амар Телиджи (Лагуат) замечено, что механические свойства стеклопластика сильно зависят от термического старения, однако в контексте клеевого соединения материал рассмотрен не был [17]. Негативное влияние атмосферной влажности и холодных климатических условий на характеристики стеклопластика изучено в работах [18, 19], что вызывает необходимость испытаний соединений из этого материала и прогнозирования их работоспособности для успешного применения в долгосрочной перспективе.

Таким образом, большое количество научных исследований посвящено климатическому старению стеклопластика как материала и прочности клеевых соединений, их практическому применению без уче-

та климатических факторов. Это подтверждается наличием научных статей, монографий, исследовательских работ и учебных пособий, затрагивающих прочность соединения как обязательный аспект проектирования и технологии выполнения клеевых соединений, в то время как сфера климатических испытаний остается малоизученной. Циклически выполненные испытания позволят достичь наиболее приближенного к реальности результата расчета прочности клеевых соединений. Исходя из них можно получить коэффициенты снижения прочности, которые впоследствии дадут возможность увеличить точность расчетных значений. Предполагается наибольшее снижение разрушающих напряжений в первые годы эксплуатации. Изменение снижения прочности во времени позволит оценить эффективность использования данного решения.

Цель данной статьи заключается в выявлении эффективности применения клеевых соединений композитных материалов с точки зрения изменения прочностных свойств материала во времени.

В рамках поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Проведение климатических испытаний образцов из стеклопластика профильного пултрузионного строительного (СППС).
2. Осуществление испытаний образцов из СППС на сдвиг.
3. Исходя из полученных данных, вычисление коэффициентов снижения прочности.
4. Проведение сравнительного анализа полученных результатов и формулировка выводов об эффективности применения клеевых соединений в долгосрочной перспективе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определение прочности клеевого соединения образцов из композиционного материала СППС проводилось в НИИ мостов согласно российскому государственному стандарту ГОСТ 15613.1-84. В качестве материалов для исследований были приняты пластины СППС-340 и клей Sikadur-330. Конструкция и форма образцов для определения прочности клеевого соединения показаны на рис. 1 и 2.

Испытания на климатическое старение выполняют циклически по режиму, разработанному в соответствии с требованиями ГОСТ 9.707-81, метод 2. Режим одного цикла ускоренных испытаний, имитирующих воздействие положительной температуры и влажности воздуха, отрицательной температуры и перепадов температуры, приведен в табл. 1. Продолжительность одного цикла испытаний, имитирующих один год эксплуатации изделия, составляет 216 ч. Изменение температурного воздействия за один цикл показано на рис. 3. Климатические испытания выполняют следующим образом: образцы помещают в камеру тепла и влаги и выдерживают

при температуре $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажности $(75\pm 3)\%$ в течение 208 ч, затем из камеры тепла и влаги образцы переносят в камеру холода.

Дальнейшие испытания образцов производились на испытательной машине ГРМ-1 (рис. 4). Образец из композиционного материала доводился до разрушения клеевого соединения.

Стойкость клеевого соединения конструкционного стеклопластика СППС на старение при воздействии климатических факторов оценивалась по напряжениям скалывания.

Предел прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон определялся по формуле:

$$\tau_{\text{ск}} = \frac{P_c}{2bl}, \quad (1)$$

где P_c — разрушающая нагрузка, Н; b — ширина площади скалывания, $b = 75$ мм; l — длина площади скалывания, $l = 75$ мм.

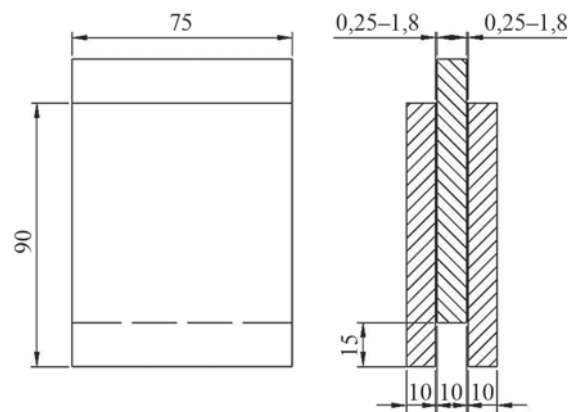


Рис. 1. Образцы для определения прочности клеевого соединения

Fig. 1. Samples to determine the strength of adhesive bonding

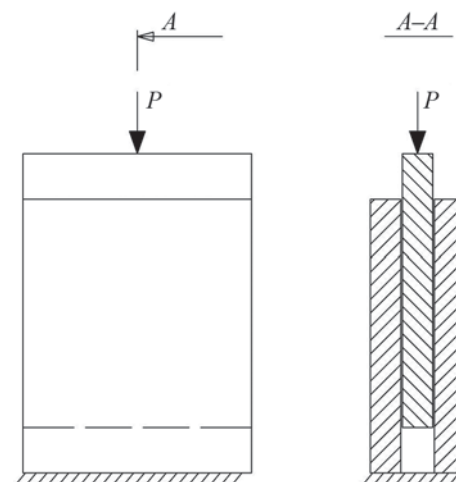


Рис. 2. Схема приложения нагрузки при испытании образцов

Fig. 2. Load application scheme for testing samples

Табл. 1. Режим одного цикла ускоренных испытаний

Table 1. Single cycle accelerated test mode

Имитирующее воздействие Imitating impact	Продолжительность воздействия, ч Duration impact, h	Относительная влажность воздуха, % Relative humidity, %	Температура, °C Temperature, °C	Оборудование Equipment
Воздействие положительной температуры и влажности воздуха Impact positive temperature and humidity	206	85±3	+60 +20	Камера тепла и влаги Heat and moisture chamber
Воздействие отрицательной температуры Negative temperature effect	6	Не регламентируется Not regulated	–60	Камера тепла и холода Chamber of heat and cold
Воздействие перепадов температуры Impact of temperature drops	2+2	Не регламентируется Not regulated	От –60 до +60 From –60 to +60	Камера тепла и холода Chamber of heat and cold

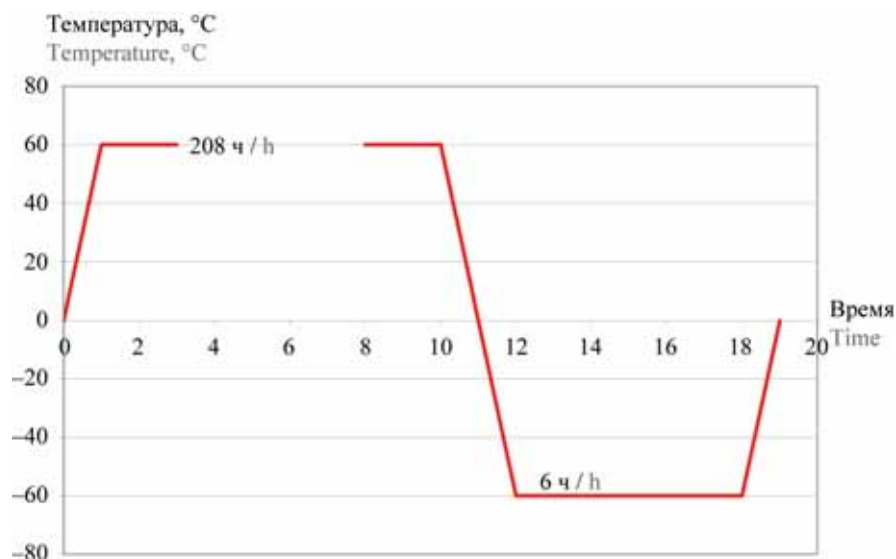


Рис. 3. График изменения температурного воздействия за один цикл

Fig. 3. The graph of temperature changes for 1 cycle



Рис. 4. Испытание образца в машине ГРМ-1

Fig. 4. Sample test in the machine GRM-1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные значения напряжения прочности клеевого соединения СППС при скалывании вдоль волокон до климатических испытаний и после каждого цикла испытаний приведены в табл. 2 и на рис. 5. На рис. 6 представлен вид разрушенных образцов до и после климатических испытаний соответственно.

Согласно рекомендациям п. 2.6.1 ГОСТ 9.707-81 [2] экспериментальные точки обработаны методом наименьших квадратов с использованием полинома второго порядка (приложение 6 ГОСТ 9.707-81 [2]):

$$\tau(t) = A + \frac{B}{(t+1)} + \frac{C}{(t+1)^2}, \quad (2)$$

где A, B, C — определяемые по экспериментальным данным константы; t — время; $\tau(t)$ — контролируемый параметр.

На рис. 7 показаны значения всех экспериментально полученных параметров (отмечены индексом «эксп.») и аппроксимирующие с помощью зависимости (7.2) кривые («ап.»). Значения констант в формуле (2) приведены в табл. 3.

При помощи полученных констант и аппроксимирующей зависимости были вычислены значения контролируемых параметров через 100 лет. Соответствующие коэффициенты снижения прочности занесены в табл. 3. Полученные коэффициенты могут

применяться при соответствующих проектных решениях в проектировании сооружений, в частности мостов. Кроме того, эти результаты можно использовать для сооружений различного уровня ответственности, поскольку прогнозные данные изменения характеристик материалов напрямую влияют на долговечность конструкции. Следует отметить, что применяемая методика, реализующая цикл термовлажностного старения, является избыточно консервативной (в запас) в силу следующих факторов. Исползованная аппроксимирующая зависимость (2) характеризуется резким снижением на начальном этапе с переходом к более пологому участку (рис. 7).

Табл. 2. Результаты испытаний клеевых соединений

Table 2. The test results of adhesive joints

Число циклов Number of cycles	Параметр Parameter	Разрушающие напряжения клеевого соединения τ_b , МПа Breaking stress of adhesive bonding, τ_v , MPa	Жесткость сдвига клеевого шва G/η , МПа/мм Stiffness of the glue line G/η , MPa/mm	Абсолютная предельная деформация клеевого шва $\gamma_b \cdot \eta_{кл}$, мм Absolute limiting deformation of glue line $\gamma_v \cdot \eta_{gl}$, mm	Работа разрушения клеевого шва $A_{V,cm} \cdot \eta_{кл}$, Дж/см ³ Work destruction glue seam $A_{V,cm} \cdot \eta_{gl}$, J/sm ³
0	Среднее значение Average value	28,3	159	> 0,280	> 4,76
1	Среднее значение Average value	26,3	163	> 0,264	> 4,51
2	Среднее значение Average value	23,8	139	> 0,315	> 3,84
3	Среднее значение Average value	18,8	138	> 0,300	> 2,23
4	Среднее значение Average value	16,6	136	> 0,171	> 1,72
5	Среднее значение Average value	17,1	128	> 0,187	> 1,92

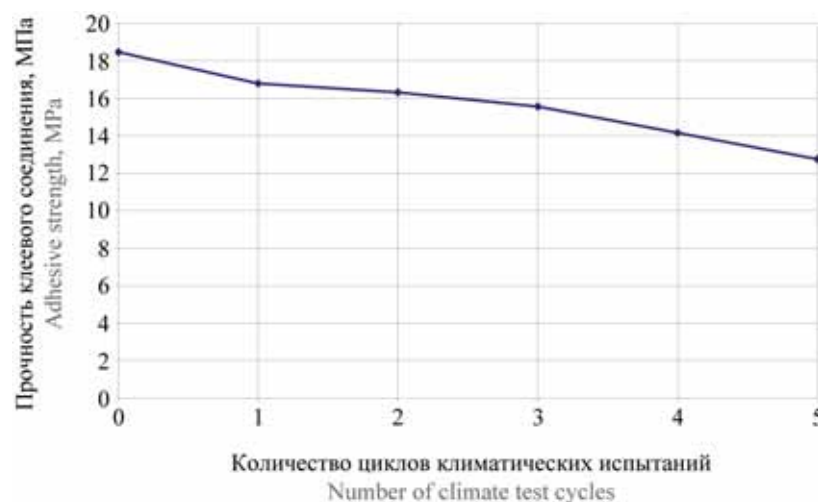


Рис. 5. Изменение прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон

Fig. 5. The change in adhesive strength when splitting along the fibers

В настоящее время получены показатели для начального и переходного участков, а увеличение количества съёмов приведет к добавлению точек на пологом участке. При этом возможно сделать более оптимистический прогноз исследуемых параметров. Кроме того, для полученных сведений характерно отличие значений для первых двух съёмов по сравнению с последующими. Эта особенность была отмечена и при обработке аналогичных данных для болтовых соединений. Возможно, данный факт связан с различием условий ста-

рения или хранения образцов. Говоря о других факторах, влияющих на старение материалов, например, УФ-излучение, группа ученых из Якутска и Барнаула [20], показала, что оно приводит к разрушению и микротрещинам на поверхности композиционных материалов даже в холодном климате. Такие результаты доказывают необходимость дальнейшего расширения и систематизации экспериментальных сведений о свойствах соединений полимерных композиционных материалов в различных климатических условиях.



Рис. 6. Вид разрушения образцов: *a* — в исходном состоянии; *b* — после пяти циклов старения

Fig. 6. Type of destruction of samples: *a* — in the initial state; *b* — after five cycles of aging

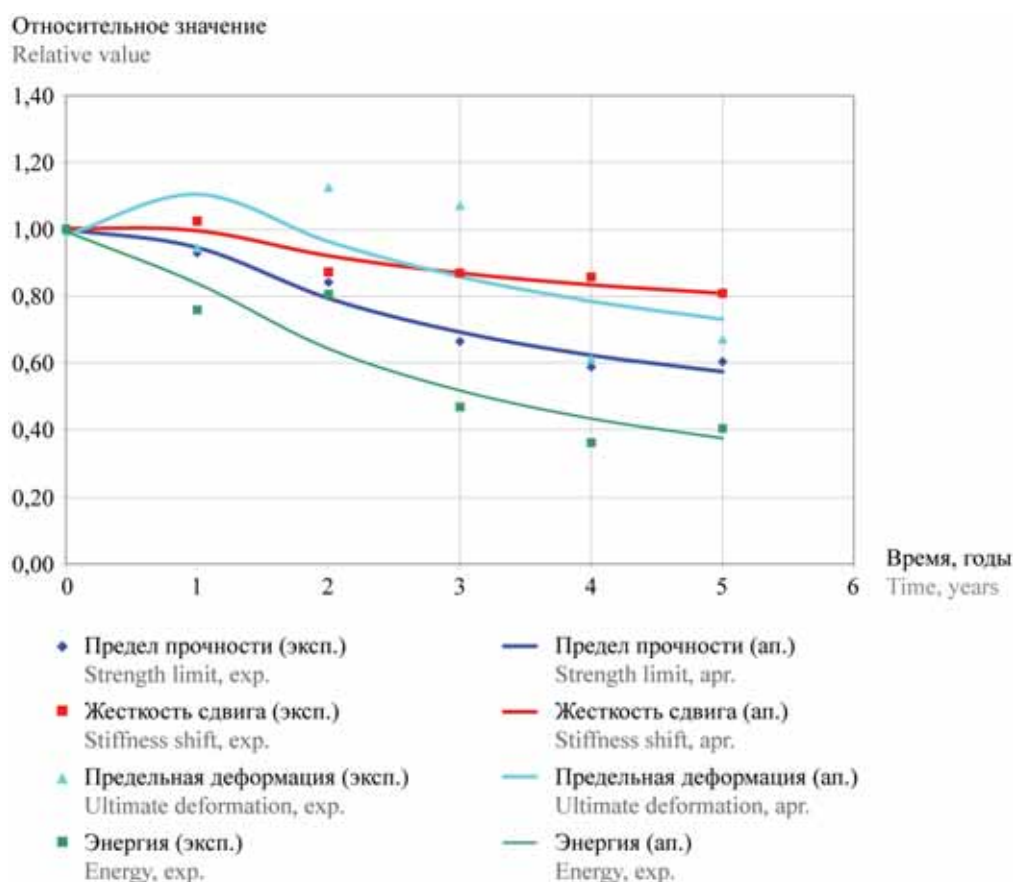


Рис. 7. Относительное снижение исходных значений параметров прочности при климатическом воздействии

Fig. 7. The relative decrease in the initial values of the parameters of the shear strength under climatic effects

Табл. 3. Значения констант в формуле (2) $\tau(t)$, коэффициент снижения прочности за 100 летTable 3. The values of the constants in the formula (2) $\tau(t)$, coefficient of strength reduction for 100 years

Выборка Sample	Константы в формуле (2), $\tau(t)$ Constants in the formula (2), $\tau(t)$			Коэффициент снижения прочности за 100 лет Coefficient strength reduction for 100 years
	A	B	C	
Разрушающие напряжения клеевого соединения τ_b , МПа Breaking stress of adhesive bonding τ_b , MPa	0,287	1,920	–1,210	3,27
Жесткость сдвига клеевого шва G/η , МПа/мм Stiffness of the glue line G/η , MPa/mm	0,659	1,000	–0,660	< 1,49
Абсолютная предельная деформация клеевого шва $\gamma_b \cdot \eta_{кл}$, мм Absolute ultimate deformation of glue line $\gamma_b \cdot \eta_{gl}$, mm	0,406	2,220	–1,640	< 2,33
Работа разрушения клеевого шва $A_{V,cm} \cdot \eta_{кл}$, Дж/см ³ Work destruction glue seam, $A_{V,cm} \cdot \eta_{gl}$, J/sm ³	–0,165	3,378	–2,210	–

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По итогам испытаний склеенных образцов из СППС на скалывание в ходе пяти циклов климатических испытаний установлены зависимости основных прочностных характеристик от времени эксплуатации. Отметим наиболее существенные результаты:

- получена количественная оценка предполагаемого снижения разрушающих напряжений: разрушающие напряжения клеевого соединения значительно снижаются в течение первых двух лет эксплуатации (25 %), что необходимо учитывать при

конструировании соответствующих несущих соединений;

- последний климатический цикл, соответствующий пяти годам эксплуатации, привел к снижению прочности образцов до 60 % от изначальной;
- аппроксимацией были вычислены коэффициенты снижения прочности клеевых соединений через 100 лет использования. Возможно применение полученных показателей при проектировании сооружений повышенной ответственности и включение в соответствующие нормативные документы, в том числе в СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы».

ЛИТЕРАТУРА

1. Дементьева Л.А., Куцевич К.Е., Лукина Н.Ф., Петрова А.П. Использование клеевых связующих для получения полимерных композиционных материалов // Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 2 (20). С. 3.
2. Startsev V.O., Molokov M.V., Blaznov A.N., Zhurkovskii M.E., Erofeev V.T., Smirnov I.V. Determination of the heat resistance of polymer construction materials by the dynamic mechanical method // Polymer Science, Series D. 2017. Vol. 10. No. 4. Pp. 313–317. DOI: 10.1134/S1995421217040141
3. Попов В.М., Никонов А.П., Остроушко М.Н. К созданию клеевых соединений с клеевыми прослойками повышенной теплопроводности // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2016. Т. 4. № 5–4 (25–4). С. 111–115.
4. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Труды ВИАМ. 2016. № 8 (44). С. 52–59. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7
5. Danilov A. CFRP reinforcement adhesive joint performance on the transversely damaged steel elements under axial tension // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00033. DOI: 10.1051/mateconf/201711700033
6. Matter M.T., Starsich F., Galli M., Hilber M., Schlegel A.A., Bertazzo S. et al. Developing a tissue glue by engineering the adhesive and hemostatic properties of metal oxide nanoparticles // Nanoscale. 2017. Vol. 9. No. 24. Pp. 8418–8426. DOI: 10.1039/c7nr01176h
7. Wang H., Hao X., Hua L., Zhou H. Study on ultrasonic vibration assisted carbon fiber reinforced plastics adhesion // Huazhong Keji Daxue Xuebao. 2016. No. 5. Pp. 127–132.
8. Ли Р.И., Мироненко А.В. Деформационно-прочностные свойства клеевых соединений, выполненных перспективной полимер-полимерной композицией // Информационные технологии и инновации на транспорте : мат. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. Орел, 2016. С. 265–269
9. Федоров В.С., Копаница Д.Г., Клопотов А.А., Абазаев Ю.А., Устинов А.М., Данильсон А.И. и др. Экспериментальные исследования упругопластической деформации клеевых соединений методом корреляции цифровых изображений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 2 (61). С. 79–97.

10. Karabinesh S.S., Annenkov O.V. The strength property of welding, glue and gluwelding joints under different types of loading // *Scientific papers SWorld*. 2016. DOI: 10.21893/2410-6720-2016-44-1-028

11. Quan D., Alderliesten R., Dransfeld C., Tsakoniatis I., De Freitas S.T., Scarselli G. et al. Significantly enhanced structural integrity of adhesively bonded PPS and PEEK composite joints by rapidly UV-irradiating the substrates // *Composites Science and Technology*. 2020. Vol. 199. P. 108358. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108358

12. Zhang D., Huang Y. Influence of surface roughness and bondline thickness on the bonding performance of epoxy adhesive joints on mild steel substrates // *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 153. P. 106135. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106135

13. Tsverava V.G., Nepovinnykh V.I., Rusin M.Y. Fractography features of fracture surfaces of glued joints made using an elastic adhesive // *Polymer Science, Series D*. 2018; Vol. 11. No. 3. Pp. 256–262. DOI: 10.1134/S199542121803019X

14. Humenyuk R.V. Assessment of strength glued joints on a mixture of basalt fiber epoxy resin edp // *Scientific Notes*. 2015. Vol. 51. Pp. 52–54.

15. Muru G.N., Koryagin S.I., Byilov S.V., Velikhanov N.I., Sharkov O.V. Research technique for subcritical crack extension in adhesive joints //

International Research Journal. 2017. No. 2–3 (56). Pp. 124–128. DOI: 10.23670/IRJ.2017.56.068

16. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Шарова И.А., Куцевич К.Е., Бузник В.М. Работоспособность клеев и материалов на их основе в условиях, близких к прибрежным условиям Арктики // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016. № 2 (20). С. 1.

17. Belaid S., Chabira S.F., Balland P., Sebaa M., Belhouideg S. Thermal aging effect on the mechanical properties of polyester fiberglass composites // *Journal of Materials and Environmental Science*. 2015. Vol. 6. No. 9. Pp. 2795–2803.

18. Startsev O.V., Kychkin A.K., Lebedev M.P., Polyakov V.V. Effects of moisture on aging of polymer composite materials in a cold climate // *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 30. Pp. 162–166. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.025

19. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K., Polyakov V.V. Effects of cold climates on polymer composite material properties // *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 30. Pp. 76–81. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.013

20. Kychkin A.K., Startsev O.V., Lebedev M.P., Polyakov V.V. Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the distraction of polymer composite materials in a cold climate // *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 30. Pp. 71–75. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.012

Поступила в редакцию 03 февраля 2019 г.

Принята в доработанном виде 23 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 23 апреля 2021 г.

О Б АВТОРАХ: Глеб Вадимович Мартынов — студент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 5046-0475, ORCID: 0000-0002-2179-8811; martynovgleb@rambler.ru;

Дарья Евгеньевна Монастырева — студент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 3376-624902; dm12@rambler.ru;

Наталья Серафимовна Астафьева — кандидат технических наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 6806-1076, ORCID: 0000-0003-0386-1781; natalia.astafeva@inbox.ru.

REFERENCES

1. Dementeva L.A., Kutsevich K.E., Lukina N.F., Petrova A.P. The use of adhesive binders for production of polymeric composite materials. *Material Science and Technology News*. 2016; 2(20):3. (rus.).

2. Startsev V.O., Molokov M.V., Blaznov A.N., Zhurkovskii M.E., Erofeev V.T., Smirnov I.V. Determination of the heat resistance of polymer construction materials by the dynamic mechanical method. *Polymer Science, Series D*. 2017; 10(4):313-317. DOI: 10.1134/S1995421217040141

3. Popov V.M., Nikonov A.P., Ostroushko M.N. To the creation of adhesive joints with adhesive layers of increased thermal conductivity. *Actual Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*. 2016; 4(5-4):(25-4):111-115. (rus.).

4. Kutsevich K.E., Dementyeva L.A., Lukina N.F. Properties and application of polymer composite materials based on glue prepregs. *VIAM Proceedings*. 2016; 8(44):52-59. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7 (rus.).

5. Danilov A. CFRP reinforcement adhesive joint performance on the transversely damaged steel elements under axial tension. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00033. DOI: 10.1051/mateconf/201711700033
6. Matter M.T., Starsich F., Galli M., Hilber M., Schlegel A.A., Bertazzo S. et al. Developing a tissue glue by engineering the adhesive and hemostatic properties of metal oxide nanoparticles. *Nanoscale*. 2017; 9(24):8418-8426. DOI: 10.1039/c7nr01176h
7. Wang H., Hao X., Hua L., Zhou H. Study on ultrasonic vibration assisted carbon fiber reinforced plastics adhesion. *Huazhong Keji Daxue Xuebao*. 2016; 5:127-132.
8. Li R.I., Mironenko A.V. Deformation-strength properties of adhesive joints made by a promising polymer-polymer composition. *Information technologies and innovations in transport: materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference*. Orel, 2016; 265-269. (rus.).
9. Fedorov V.S., Kopanitsa D.G., Klopotov A.A., Abzaev Y.A., Ustinov A.M., Danil'son A.I. et al. Digital image correlation of elasto-plastic deformation of adhesive bonding. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2017; 2:79-97. (rus.).
10. Karabinesh S.S., Annenkov O.V. The strength property of welding, glue and gluwelding joints under different types of loading. *Scientific papers SWorld*. 2016. DOI: 10.21893/2410-6720-2016-44-1-028
11. Quan D., Alderliesten R., Dransfeld C., Tsakoniatas I., De Freitas S.T., Scarselli G. et al. Significantly enhanced structural integrity of adhesively bonded PPS and PEEK composite joints by rapidly UV-irradiating the substrates. *Composites Science and Technology*. 2020; 199:108358. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108358
12. Zhang D., Huang Y. Influence of surface roughness and bondline thickness on the bonding performance of epoxy adhesive joints on mild steel substrates. *Progress in Organic Coatings*. 2021; 153:106135. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106135
13. Tsverava V.G., Nepovinnikh V.I., Rusin M.Y. Fractography features of fracture surfaces of glued joints made using an elastic adhesive. *Polymer Science, Series D*. 2018; 11(3):256-262. DOI: 10.1134/S199542121803019X
14. Humenyuk R.V. Assessment of strength glued joints on a mixture of basalt fiber epoxy resin edp. *Scientific Notes*. 2015; 51:52-54.
15. Muru G.N., Koryagin S.I., Byilov S.V., Velikhanov N.I., Sharkov O.V. Research technique for subcritical crack extension in adhesive joints. *International Research Journal*. 2017; 2-3(56):124-128. DOI: 10.23670/IRJ.2017.56.068
16. Petrova A.P., Lukina N.F., Sharova I.A., Kutsevich K.E., Buznik V.M. Operability of glues and materials on their basis in the conditions close to conditions of the arctic. *Materials science news. Science and technology*. 2016; 2:1. (rus.).
17. Belaid S., Chabira S.F., Balland P., Sebaa M., Belhouideg S. Thermal aging effect on the mechanical properties of polyester fiberglass composites. *Journal of Materials and Environmental Science*. 2015; 6(9):2795-2803.
18. Startsev O.V., Kychkin A.K., Lebedev M.P., Polyakov V.V. Effects of moisture on aging of polymer composite materials in a cold climate. *Procedia Structural Integrity*. 2020; 30:162-166. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.025
19. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K., Polyakov V.V. Effects of cold climates on polymer composite material properties. *Procedia Structural Integrity*. 2020; 30:76-81. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.013
20. Kychkin A.K., Startsev O.V., Lebedev M.P., Polyakov V.V. Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the distraction of polymer composite materials in a cold climate. *Procedia Structural Integrity*. 2020; 30:71-75. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.012

Received February 03, 2019.

Adopted in revised form on April 23, 2021.

Approved for publication on April 23, 2021.

BIONOTES: **Gleb V. Martynov** — student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 5046-0475, ORCID: 0000-0002-2179-8811; martynovgleb@rambler.ru;

Daria E. Monastyreva — student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 3376-624902; 02dm12@rambler.ru;

Natalia S. Astafieva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 6806-1076, ORCID: 0000-0003-0386-1781; natalia.astafeva@inbox.ru.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 721:502.12.911.8

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.438-462

Межгосударственные «зеленые» стандарты для формирования экологически безопасной среды жизнедеятельности

В.И. Теличенко¹, А.А. Бенуж¹, Е.А. Сухинина²

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

² *Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (СГТУ имени Гагарина Ю.А.); г. Саратов, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с негативной экологической ситуацией на планете определена необходимость использования «зеленых» стандартов в строительстве, регулируемых экологическими нормативами, для снижения нагрузки на природу и создания благоприятных условий для человека. Выявлено, что одиннадцать из семнадцати целей устойчивого развития, утвержденных Генеральной Ассамблеей ООН, взаимосвязаны со строительством. При этом «зеленые» стандарты в проектировании служат механизмом реализации этих целей и регуляторами для создания экологически безопасного пространства для жизни и работы.

Материалы и методы. Рассмотрены этапы становления экологического законодательства в строительстве. Ценным является изучение особенностей формирования нормативных документов в области охраны природы и экологического проектирования (середина XX – начало XXI вв.), переход к созданию национальных российских «зеленых» стандартов. Изучен механизм разработки системы межгосударственных стандартов на базе Технического комитета.

Результаты. Проанализировано состояние российского экологического законодательства и требования российских «зеленых» стандартов. Выделены преимущества и недостатки действующих систем экологической сертификации, основные аспекты экологической оценки объектов строительства с выявлением приоритетных направлений. Определена необходимость использования межгосударственных экологических стандартов в архитектурно-строительном проектировании с выделением векторов дальнейшего развития в градостроительном направлении. Показаны особенности становления «зеленого» строительства в России, как драйвера для Таможенного Евразийского экономического союза.

Выводы. Обозначен приоритет формирования «зеленой» среды жизнедеятельности на базе введения новых нормативных документов по экологически устойчивому архитектурно-строительному проектированию для популяризации Национального «зеленого» стандарта в строительстве на межгосударственном уровне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: «зеленое» строительство, «зеленый» стандарт, система экологической сертификации, устойчивое развитие, «зеленая» среда жизнедеятельности, экоподходы, межгосударственный стандарт, архитектурно-строительное проектирование, нормативы, технический комитет

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Теличенко В.И., Бенуж А.А., Сухинина Е.А. Межгосударственные «зеленые» стандарты для формирования экологически безопасной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 4. С. 438–462. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.438-462

Interstate green standards of formation sustainable built environment vital activity

Valeriy I. Telichenko¹, Andrey A. Benuzh¹, Elena A. Suhinina²

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

² *Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU); Saratov, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Due to the negative environmental situation on Earth, the necessity to use “green” standards in construction, regulated by environmental standards, to reduce the negative impact on nature and create favorable living environment for humans was determined. It was revealed that eleven of the seventeen Sustainable Development Goals approved at the United Nations General Assembly are interrelated with construction. At the same time, “green” design standards are a mechanism for achieving Sustainable Development Goals as well as regulatory tool for creating an environmentally friendly environment for living and working.

Materials and methods. The stages of the formation of environmental legislation in construction are studied. Specific features of the formation of regulatory documents in the field of environmental protection and environmental design (mid 20th – early

21st centuries), as well as the transition to the creation of National Russian “green” standards are reviewed. The mechanism of development of interstate standards on the basis of the Technical Committee is being studied.

Results. National environmental legislation and Russian national “green” standards regulatory requirements are studied. The advantages and disadvantages of current environmental certification systems and core aspects of buildings environmental assessment are highlighted. The necessity for the use of interstate environmental standards in design and construction is determined along with the allocation of strategy for further development in the urban planning field. Specific features of the formation of “green” construction in Russia, as a driver for the Eurasian Customs Union are revealed.

Conclusions. The priority of forming “green” living environment on the basis of the introduction of new regulatory framework on environmentally sustainable design to promote the National “green” standard in construction at the interstate level is outlined.

KEYWORDS: green building, environmental standard, environmental certification system, sustainable development, green living environment, eco-approaches, interstate standard, architectural and construction design, regulations, technical committee

FOR CITATION: Telichenko V.I., Benuzh A.A., Suhinina E.A. Interstate green standards of formation sustainable built environment vital activity. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):438-462. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.438-462 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

С ускорением темпов урбанизации растет потребность в устойчивом городском планировании [1–7] и деформационной устойчивости архитектурно-градостроительных объектов¹. Из-за нестабильной и даже опасной экологической ситуации существующие города и современная архитектура нуждаются в новом подходе к *экологическому проектированию* [8–12], новому экоустойчивому стилю мышления, включающему такие качества, как логичность, системность, синергетичность, диалектичность, широта видения экологических проблем и возможных последствий их решения [13].

Следующим поколениям проектировщиков, архитекторов и дизайнеров придется исправлять слишком много ошибок, если сегодня не изменить нашего отношения к потреблению ресурсов, воссозданию природных компонентов при новом строительстве или реконструкции [14].

Экологическое проектирование — это деятельность по созданию благоприятных условий для пользователя, уменьшению использования природных ресурсов при проектировании, строительстве, эксплуатации и утилизации объекта с целью снижения давления на природную экосистему [15–19]. Современное экологическое строительство регулируется *«зелеными» стандартами*, ускоряющими переход от традиционного проектирования, оказывающего пагубное давление на естественное окружение, к безопасному *устойчивому развитию* [20].

Концепция устойчивого развития — модель, объединяющая экономическое, социальное, экологическое направления, при этом политическая составляющая регулирует общественную жизнь [21–25]. 25 сентября 2015 г. на саммите ООН в Нью-Йорке была принята Повестка дня в области устойчивого развития до 2030 года, содержащая семнадцать целей², очевидно, что строительство взаимосвязано

с одиннадцатью из семнадцати целей³, при этом «зеленые» стандарты являются механизмом их реализации [26–31].

«Зеленый» стандарт — это документ для экологической оценки зданий, территорий, внедрения экологических решений и *«зеленых» технологий*, включающий такие аспекты, как прилегающая территория, водозффективность, энергосбережение, материалы и отходы, микроклимат и социальное благополучие с присуждением соответствующего экологического сертификата объекту сертифицирования в зависимости от количества набранных баллов [32–36].

«Зеленые» технологии — один из основных компонентов производственной деятельности, создающий на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) продукта его соответствие условиям окружающей при-

³ Одиннадцать целей ООН в области устойчивого развития, взаимосвязанные со строительством: обеспечение здорового образа жизни и содействие благополучию для всех в любом возрасте; обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех; обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех; содействие поступательному, всеохватному и устойчивому экономическому росту, полной и производительной занятости и достойной работе для всех; создание стойкой инфраструктуры, содействие всеохватной и устойчивой индустриализации и инновациям; обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов; обеспечение перехода к рациональным моделям потребления и производства; принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями; сохранение и рациональное использование океанов, морей и морских ресурсов в интересах устойчивого развития; защита и восстановление экосистем суши и содействие их рациональному использованию, рациональное лесопользование, борьба с опустыниванием, прекращение и обращение вспять процесса деградации земель и прекращение процесса утраты биоразнообразия; партнерство в интересах устойчивого развития.

¹ В переводе на английский — urban resilience.

² Цели в области устойчивого развития. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>

родной и техногенной среды с целью повышения ее качества⁴.

Организация комфортных условий для жизни [33–41] занимает одно из важных направлений развития России, что видно из распределения бюджета национальных проектов до 2024 года⁵.

Для улучшения качества архитектурно-градостроительной среды особенно важным становится актуализация действующих нормативно-технических документов и установление ограничения на использование устаревших технологий в проектировании, что возможно за счет применения обновленных нормативов и межгосударственных «зеленых» стандартов [42–46].

Объектом исследования являются: 1) нормативные документы Российской Федерации в области экологического права, архитектурно-градостроительного проектирования и экологического строительства; 2) деятельность Технического комитета (ТК 366) по разработке и внедрению межгосударственных «зеленых» стандартов; 3) российские экологические стандарты (системы экологической сертификации) в строительстве.

Предметом научного исследования становится качественная оценка существующей нормативной базы по экологическому проектированию Российской Федерации и действующих экологических стандартов с определением приоритетных направлений дальнейшего развития.

Цель данной статьи — обзор нормативных документов и экологических стандартов в архитектурно-градостроительном проектировании, сравнение и анализ наиболее значимых из них, а также оценка перспективы создания межгосударственных «зеленых» стандартов.

В рамках исследуемой темы определены следующие задачи:

- изучение базы российских нормативов по охране окружающей среды и экологическому строительству в период с середины XX по начало XXI вв.;
- анализ российских экологических стандартов в строительстве, их преимущества и недостатки при экосертификации;

⁴ Экологическая безопасность, «зеленые» стандарты и технологии. URL: <https://mgsu.ru/universityabout/Struktura/Institut/IDPO/pk/environmental-safety-and-green-standards-and-technologies.php>

⁵ Человеческий капитал (здравоохранение, образование, демография, культура) — 5,7 трлн руб; комфортная среда для жизни (безопасные и качественные автомобильные дороги, жилье и городская среда, экология) — 9,9 трлн руб.; экономический рост (предпринимательство, цифровая экономика, производительность труда и поддержка занятости, международная кооперация и экспорт, комплексный план модернизации и расширения инфраструктуры) — 10,1 трлн руб. [62].

- выявление необходимости перехода на новые межгосударственные «зеленые» стандарты для формирования безопасной среды жизнедеятельности в России и ближайшем зарубежье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Требования экологических нормативно-правовых актов и «зеленых» стандартов в строительстве нацелены на создание комфортных условий внутри помещений и на прилегающей территории, уменьшение давления на природное окружение в процессе строительства, эксплуатации и утилизации объекта [47–56].

Разработка нормативных документов по охране природных богатств и регулированию строительных процессов в СССР началась с середины XX в. При этом этап формирования экологического подхода в архитектурно-градостроительном проектировании имеет длительную историю с выявлением его предшественников [57, 58].

Принципы экологического подхода в архитектурно-градостроительном проектировании [59–61] стали зарождаться еще в древности. Это — выбор «здорового» места для города и жилья; строительство, безопасное для природы; взаимосвязь с окружением; подражание природным компонентам; включение зеленых насаждений в градостроительное пространство; благоприятная ориентация по сторонам света; выбор объемно-планировочного решения в зависимости от климата; компактность объемов и городов; пассивное энергосбережение зданий за счет солнечной энергии; природные и местные материалы для строительства; вода из местных источников [63–65].

Доктор философских наук О.Н. Яницкий, проанализировав российскую экологическую культуру XX в., определил четыре этапа ее становления: эпоха зарождения (1917–1929 гг.); эпоха застоя (1929–1960 гг.); эпоха стабильности (1960–1985 гг.); эпоха реформ (1985–1999 гг.) [66].

Другими исследователями установлено, что становление экологического законодательства в XX–XXI вв. происходило в четыре периода⁶:

- Первый период (1917–1950 гг.) можно охарактеризовать формированием природных комплексов и возникновением науки об охране природы. В 1930–1940 гг. с увеличением производственных процессов сбережение природных богатств стало определяться как «единая система мероприятий, направленная на защиту, развитие, качественное обогащение и рациональное использование природных фондов страны»⁷. Ускоренные темпы индустриализации

⁶ История экологического права. URL: http://otherreferats.allbest.ru/ecology/00040234_1.html

⁷ Материалы из резолюции Первого Всероссийского съезда по охране природы. М.: Кремль, 1929.

зации в СССР после Второй мировой войны не предусматривали индивидуального подхода в организации городской среды, все было поставлено на поток [67, 68]. Первые нормативы в области регулирования строительной деятельности вводятся только после 1940-х годов.

- Второй период (1950–1980 гг.) отличается увеличивающимся загрязнением окружающей среды в связи с ростом промышленного оборота и производственных предприятий. Стандартизация и унификация в строительстве с игнорированием природно-климатических условий способствовали росту городов с одинаковыми массивами панельных зданий, повторяющимися решениями общественных пространств, не приспособленных для разнообразных жизненных процессов и отдыха. В 1960–1980 гг. в Советском Союзе происходило развитие и становление природоохранного законодательства с введением лесных, земельных и водных кодексов по охране природных ресурсов.

- Третий период (1980–1990 гг.) характеризуется ускоренными темпами становления экологического законодательства и разработкой природоохранных мероприятий. Урбанизация проявлялась в повышении плотности застройки, поточном строительстве, четкости, симметричности и упорядоченности городской среды, стандартизации проектов с повторяющимися решениями площадей, увеличении масштаба жилой застройки и уменьшении расстояния между домами, происходила потеря человеческого масштаба в пространстве. В России формируется обширная законодательная база по охране окружающей среды и строительным нормативам.

- Четвертый период (1990-е годы – по настоящее время) основан на организации новой формы взаимодействия общества и природы, когда больше стали задумываться об энерго-, водосбережении, сохранении природных ресурсов и создании «здоровых» условий для жизни. В XXI в. переход к концепции устойчивого развития городов связан с введением в практику новых экоподходов, отвечающих изменяющимся требованиям общества [69, 70]. Проводится работа по созданию и применению первых межгосударственных «зеленых» стандартов.

В процессе научного исследования определено, что нормативы по экологии и архитектурно-градостроительному проектированию регулируют следующие аспекты:

- 1) охрану природных ресурсов;
- 2) прилегающую территорию;
- 3) водоэффективность;
- 4) энергосбережение;
- 5) материалы;
- 6) отходы;
- 7) микроклимат;
- 8) «зеленое» финансирование;
- 9) планировочные решения.

Рассмотрим существующие нормативы РФ для каждого из разделов подробнее:

1. Охрана природных ресурсов.

Нормативно-правовые акты, регулирующие общественные отношения в сфере взаимодействия общества и природы, разделяют на три раздела:

- отраслевые по охране отдельных природных объектов (лесных, водных, земельных);
- комплексные по охране в целом природной среды и ее комплексов;
- экологизированные в различных отраслях права (хозяйственного, административного, уголовного и проч.), регулирующие чрезмерное давление на природу⁸.

Первым нормативно-правовым актом советского государства стал Декрет о земле (1917 г.), устанавливающий изменение экономических отношений по землепользованию — изъятие земли из товарных отношений с организацией условий для ее охраны. В последующем были приняты декреты о лесах (1918 г.), о недрах земли (1919 г.), об охране памятников природы (1921 г.), определяющие тенденции к бережному использованию природных компонентов.

Сегодня большое значение в экологии страны имеют: утверждение комплекса мероприятий по снижению выброса загрязняющих веществ в атмосферу; увеличение площади особо охраняемых территорий и увеличение на них посетителей; применение федеральной электронной схемы обращения с твердыми коммунальными отходами; информационная система анализа воздуха.

Главным российским документом является Конституция РФ⁹, включающая ряд положений по экологической безопасности и рациональному использованию природных богатств.

В основе природоохранного законодательства страны лежит Федеральный закон № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», регулирующий «отношения между обществом и природой».

Также следует выделить ряд законов, направленных на поддержание благоприятной окружающей среды и регулирующих все роды деятельности¹⁰.

⁸ История экологического права. URL: <https://ecoportal.su/public/law/view/758.html>

⁹ Конституция РФ принята всенародным голосованием 12.12.1993 с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 01.07.2020.

¹⁰ ФЗ «Об экологической экспертизе» (1995 г.); ФЗ «Об особо охраняемых природных территориях» (1995 г.); ФЗ «О радиационной безопасности населения» (1995 г.); ФЗ «Об отходах производства и потребления» (1998 г.); ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (1999 г.); Закон РФ «О недрах» (1992 г.); ФЗ «О животном мире» (1995 г.); ФЗ «О специальных экологических программах реабилитации радиационно-загрязненных участков территорий» (2001 г.); ФЗ «Об основах технического регулирования в Российской Федерации» (2003 г.).

Земельный кодекс РФ (2001 г.) содержит требования по защите окружающей среды, охране и купле-продаже земель. Водный кодекс РФ (1995 г.) закрепляет охрану водных объектов от загрязнения, засорения и истощения. Лесной кодекс РФ (1997 г.) определяет рациональное использование, защиту и воспроизводство лесных ресурсов¹¹.

Важным нормативом является Экологическая доктрина РФ (2002 г.), определяющая цели, задачи и принципы проведения в стране государственной экологической политики на долгосрочный период [71]. Различные указы Президента и постановления Правительства закрепляют концепцию перехода к устойчивому развитию, охране земельных и водных объектов¹².

Сегодня климатические изменения — одна из наиболее важных общемировых проблем. В Указе Президента от 08.02.2021 № 76 «О мерах по реализации научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений» указано в шестимесячный срок разработать и утвердить Федеральную научно-техническую программу в области экологического развития РФ и климатических изменений на 2021–2030 годы, предусматривающую создание наукоемких технологических решений по улучшению состояния окружающей среды, адаптации к климатическим изменениям и их последствиям с целью сбалансированного социально-экономического развития РФ в сфере устойчивого развития и снижения выбросов парниковых газов¹³.

В ряде российских регионов (Москве, Санкт-Петербурге, российской части Баренц-региона, Калужской области, Свердловской области и др.), обеспокоенных увеличивающимся количеством выбросов парниковых газов, уже несколько лет разрабатывают стратегии адаптации к изменению климата. Москва пока является единственным городом

в России, вошедшим в инициативную группу городов по вопросам изменения климата. В столице проходят различные мероприятия, посвященные данной проблеме, на трех Климатических форумах городов обсуждались вопросы снижения выбросов CO₂ и адаптации к изменениям климата на субнациональном уровне. В 2015 г. создано Российское партнерство за сохранение климата, объединяющее компании, озабоченные вопросами климатических изменений и снижением выбросов парниковых газов.

2. Прилегающая территория.

В РФ разработан и действует ряд нормативов, регулирующих территориальное планирование и градостроительное проектирование¹⁴. В данных документах наибольшее внимание уделено правильному размещению строения на участке, предписывается рациональное использование территории, недопущение разрушения естественных экологических систем.

Одним из основных нормативных документов, регламентирующих градопланирование, является Градостроительный кодекс Российской Федерации № 190-ФЗ (ред. от 31.07.2020), содержащий принципы законодательства о градостроительной деятельности, правила землепользования и застройки, общие положения о документах территориального планирования, основы проектирования генеральных планов, порядок установления территориальных зон¹⁵.

Принятый в 2016 г. профессиональный стандарт «Градостроитель» поддерживает семь принципов стратегического планирования пространственного развития территории в РФ до 2025 года¹⁶. Федеральный закон № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» (2014 г.) включает ряд положений о правовом регулировании, принципах и задачах стратегического планирования.

В СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*» описан ряд мероприятий по планировке и застройке новых и реконструкции существующих городских и сельских муниципальных образований на территории РФ.

По мнению специалистов, в РФ не до конца определен статус нормативно-правовых актов в сфе-

¹¹ Нормативно-правовые основы природопользования и охраны окружающей среды. URL: <http://eko-priroda.ru/ohrana-okruzhayuschej-sredy/111-normativno-pravovye-osnovy/>

¹² Указ «О федеральных природных ресурсах» (1993 г.); Указ «О концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию» (1996 г.); постановления Правительства РФ «Об утверждении Положения о порядке осуществления государственного контроля за использованием и охраной земель» (1992 г.), «Об утверждении Положения об осуществлении государственного контроля за использованием и охраной водных объектов» (1996 г.), «Об утверждении Положения о ведении государственного мониторинга водных объектов» (1997 г.).

¹³ О мерах по реализации научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений : Указ Президента РФ от 08.02.2021 г. № 76. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400193112/>

¹⁴ Федеральный закон № 33-ФЗ «Об особо охраняемых природных территориях»; СНиП 2.07.01-89*. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений; СНиП III-10-75. Благоустройство территории.

¹⁵ Градостроительный кодекс Российской Федерации. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/

¹⁶ Пространственное сплочение; пространственная справедливость; комплексный подход; безусловная ценность каждого места; равнозначность уровней пространственного развития; обеспечение сбалансированности пространственного развития; повышение управляемости пространственного развития.

ре градостроительства и землепользования: с одной стороны, они рассматриваются как инструмент повышения эффективности строительного комплекса и защиты интересов пользователей территории, с другой — как источник административных барьеров¹⁷.

К сожалению, действующие градостроительные нормативы допускают застройку городских территорий с повышенной плотностью без качественной социальной инфраструктуры; удобной транспортной и безопасной пешеходной сети; с недостатком зеленых насаждений и благоустроенных общественных пространств для горожан.

3. Водозффективность.

Важной темой является проблема сохранения наиболее ценных и уязвимых акваторий, охрана биоразнообразия и защита морских экосистем, подверженных антропогенной нагрузке со стороны нефтегазового сектора, судоходства, рыболовства и туризма. В повестке развития РФ до 2024 года меры по повышению экологической устойчивости природопользования в отношении морских ресурсов в числе приоритетных не значатся. При управлении использованием российскими морскими ресурсами каждый участник рынка стремится к наибольшей прибыли, не учитывая давление на экосистемы¹⁴.

Недостаточно документов относительно сбережения питьевой и сбора дождевой воды с кровли и на участке. Только с 2020 г. в России начал действовать ГОСТ Р 58875-2020 ««Зеленые» стандарты. Озеленяемые и эксплуатируемые крыши зданий и сооружений. Технические и экологические требования», закрепляющий: положения и общие требования к «зеленым» кровлям; типологию «зеленых» крыш; особенности конструктивных решений; содержание зеленых насаждений; особенности полива и распределения дождевой воды.

4. Энергосбережение.

Первые российские нормы в области энергосбережения строительного комплекса стали разрабатываться с 70-х годов XX в. (СНиП II-3-79* «Строительная теплотехника»), вводились стандарты по повышению тепловой эффективности ограждающих конструкций зданий и строительных материалов¹⁸. В конце 1980-х годов внедрялись первые нормативы по применению возобновляемых источников энергии в южных регионах России¹⁹.

ФЗ «Об энергосбережении» (1996 г.) включал ряд вопросов по рациональному использованию энергетических ресурсов, осуществлению государственного надзора за их эффективным применением²⁰. В 2000 г. начинает действовать ГОСТ Р 51387-99 «Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения», закрепляющий основные понятия, принципы и цели в области нормативно-методического обеспечения энергосбережения страны. Также с 2000 г. вводятся энергетические паспорта для зданий на срок не более 10 лет. В ФЗ № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» была определена энергетическая стратегия развития России до 2030 года.

В 2009 г. в РФ насчитывалось более сорока трех региональных законов об энергосбережении, на территории сорока семи субъектов действовало более шестисот программ в области повышения эффективности использования энергии, в том числе сорок две региональных и более пятисот городских и муниципальных программ [71].

В 2010 г. вышел Приказ Министерства регионального развития РФ № 262 «О требованиях энергетической эффективности зданий, строений, сооружений», согласно которому с 2011 г. увеличены показатели по энергоэффективности и понижению коэффициента теплопередачи на 15 % при строительстве.

Требования экологичности и энергоэффективности экономики страны регулируются двумя основными Указами Президента РФ: Указ № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» (2008 г.) нацелен на 40%-ное снижение энергоемкости; Указ № 752 «О сокращении выбросов парниковых газов» (2013) ориентирован на 25%-ное снижение выбросов парниковых газов.

К нормам ресурсосбережения и экологического менеджмента в РФ также можно отнести ряд следующих ГОСТов²¹. В некоторых законодательных ак-

теплохладоснабжение жилых и общественных зданий и сооружений. Нормы проектирования.

²⁰ Этот закон включает основные положения, сходные с требованиями Директивы ЕС 2010/31/EU.

²¹ ГОСТ Р 52104-2003. Ресурсосбережение. Термины и определения; ГОСТ 31607-2012. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения; ГОСТ 31532-2012. Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения; ГОСТ Р 52107-2003. Ресурсосбережение. Классификация и определение показателей; ГОСТ Р ИСО 50001-2012. Системы энергетического менеджмента; ГОСТ Р 54195-2010. Ресурсосбережение. Промышленное производство. Руководство по определению показателей (индикаторов) энергоэффективности.

¹⁷ 2020–2030: Десятилетие действий для ЦУР в России. Вызовы и решения. М., 2020. 142 с.

¹⁸ ГОСТ 16381-77*. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Классификация и общие технические требования; ГОСТ 25380-82. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции; ГОСТ 26253-84. Здания и сооружения. Метод определения теплоустойчивости ограждающих конструкций.

¹⁹ ВСН 52-86. Установки солнечного горячего водоснабжения. Нормы проектирования; ВСН 56-87. Геотермальное

тах и поручениях Правительства РФ рассматривается развитие электроэнергетики страны²².

Нестабильность экономической ситуации, рост цен на электричество и угроза дефицита полезных ископаемых в нашем государстве создают необходимость проведения обязательного энергоаудита и контроля энергоэффективных решений при возведении, реконструкции и эксплуатации объектов строительства [72].

5. Материалы.

Большая часть экологических нормативов посвящена составу, классификации и особенностям использования строительных материалов. Относительно безопасного применения материалов в строительстве используются различные ГОСТы²³. В данных документах в наименьшей степени учитывается экологичность материалов, расчет ЖЦ продукта и возможность повторного использования [73].

В ГОСТ Р 57274.2-2016/EN 15643-2:2011 «Устойчивое развитие в строительстве. Часть 2. Принципы оценки экологических показателей» выделены «Типы данных и их отнесение к жизненному циклу строительного объекта»²⁴. Этот документ является одной

из частей серии европейских стандартов EN15443 и устанавливает конкретные требования для оценки экологических показателей строительных объектов с учетом технических и функциональных решений. Ключевым этапом развития оценки стоимости ЖЦ в России стало принятие ФЗ № 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд», который существенно активизировал применение данной методологии.

6. Отходы.

В нашем государстве принят ряд документов относительно обращения с отходами²⁵, значительная часть документов посвящена регулированию вредных выбросов от промышленных предприятий. В сфере обращения с твердыми бытовыми отходами (ТБО) на федеральном и региональном уровнях не внедряются практические меры по повторному их использованию, сокращению и предотвращению образования. Вместо этого активно поддерживается государством отрасль мусоросжигания. Также Минприроды поддерживает введение льготного тарифа на электроэнергию, генерируемую при утилизации свалочного газа на полигонах коммунальных бытовых отходов. В Национальный проект «Экология»

²² Энергетическая стратегия России на период до 2030 года (Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р), Стратегия развития электросетевого комплекса и Госпрограмма РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики» (утв. Распоряжениями Правительства РФ от 03.04.2013 № 511-р и 512-р). Кроме того, разработан стратегический план мероприятий «Повышение доступности энергетической инфраструктуры» (Распоряжение Правительства РФ от 30.06.2012 № 1144-р).

²³ ГОСТ 14.322-83. Нормирование расхода материалов. Основные положения; ГОСТ Р 57418-2020. Материалы и изделия минераловатные теплоизоляционные. Метод оценки устойчивости характеристик теплопроводности к воздействию знакопеременных температур; ГОСТ Р 59137-2020. Классификация пожарной опасности строительных материалов и конструкций. Часть 1. Классификация на основе результатов испытаний по определению реакции на огонь; ГОСТ 5382-2019. Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа; ГОСТ 34395-2018. Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях; ГОСТ Р 58080-2018. Материал композиционный на основе целлюлозы для впитывающих бумажных изделий санитарно-гигиенического назначения. Технические условия; ГОСТ Р ИСО 14040. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура; ГОСТ Р ИСО 14044. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и рекомендации.

²⁴ Соответствие данных жизненному циклу объекта; воздействия и особенности, специфичные для строительного объекта в процессе его жизненного цикла; воздействия и особенности строительного объекта, специфичные для его эксплуатации, и проч.

²⁵ Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» (ст. 11–13); Постановление Правительства РФ от 26.10.2000 № 818 «О порядке ведения государственного кадастра отходов и проведения паспортизации опасных отходов»; Приказ Минприроды России от 02.12.2002 № 786 «Об утверждении федерального классификационного каталога отходов»; СанПиН 2.1.7-95. Правила очистки населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почв. Порядок хранения, транспортировки, захоронения и утилизации (токсичных) промышленных отходов; СП 2.1.7.1386-03. Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления; ГОСТ Р 51769-2001. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Документирование и регулирование деятельности по обращению с отходами производства и потребления. Основные положения; ГОСТ 30775-2001. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов. Основные положения; ГОСТ Р 53691-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Паспорт отхода I–IV класса опасности. Основные требования; ГОСТ Р 53692-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов; ГОСТ Р 53791-2010. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения; ГОСТ Р 54099-2010. Ресурсосбережение. Вторичные материальные ресурсы. Основная номенклатура вторичного сырья; ГОСТ Р 54964-2012. Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости; ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению.

пока не включены задачи по раздельному сбору и уменьшению образования отходов²⁶.

В РФ недостаточно нормативов по рациональному обращению с твердыми коммунальными (ТКО) и отходами производства и потребления, селективному сбору и внедрению методов переработки ТКО с возможностью последующего использования [73].

7. Микроклимат.

Параметры безопасной среды жизнедеятельности регулируются в ряде документов серии СНиП, СанПиН, СП, ГОСТ и проч. Первые строительные нормативы по организации здоровых условий (требуемой вентиляции, допустимого уровня шума, освещенности, инсоляции, защиты от вибрации, ультразвука и электромагнитных полей) стали вводиться в конце 1970–80-х годов²⁷.

В СанПиН 2.1.2.1002-00 «Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям» и других аналогичных документах определены требования к воздушной среде, микроклимату, естественному и искусственному освещению, отделке помещений, инженерному оборудованию. Требования по организации комфортной среды в жилых зданиях закреплены в: СНиП 2.08.01-89*; СНиП 31-01-2003; СП 31-107-2004 и др.

8. «Зеленое» финансирование.

С 2020 г. в России началась работа над проектами согласно «зеленой» таксономии²⁸.

В ноябре 2020 г. Минэкономразвития России стало координатором по развитию «зеленого» финансирования. «Правительство России утвердило за Минэкономразвития координирующую роль по вопросам развития инвестиционной деятельности и привлечения внебюджетных средств в проекты устойчивого (в том числе зеленого) развития»²⁹. В рамках данной программы обозначены основные критерии

для проектов и систем верификации проектов развития, планируется создание дорожной карты, стимулирующей инструменты финансирования устойчивого развития.

В силу многих политических и экономических проблем Россия находится в начале пути по использованию «зеленых» технологий и ESG-подходов, при этом потенциал их внедрения до 2023 г. оценивается в 3 трлн руб.

На данный момент намечены основные этапы запуска национальной системы «зеленого» финансирования в нашей стране, включающие:

- решение Правительства о формировании системы (Распоряжение от 18.11.2020 № 3024-р)³⁰;
- дизайн национальной системы «зеленого» финансирования и государственную поддержку «зеленых» финансов;
- основы государственной политики в области экологического развития России до 2030 г., определяющие требования по увеличению строительства объектов, соответствующих системам добровольной экологической сертификации, на основе международного опыта использования «зеленых» стандартов в строительстве³¹;
- совершенствование нормативно-правовой и методологической базы г. Москва по «экологизации» закупок для государственных нужд, использования экологических показателей при оценке эффективности государственных программ, разработки стандартов «зеленого» строительства при реализации Экологической стратегии Москвы на период до 2030 года³²;
- запуск полномасштабных систем «зеленого» финансирования (в соответствии с поручением Президента РФ до 16.07.2022 «Реализация национального проекта чистый воздух»).

stalo_koordinatorom_po_razvitiyu_zelyonogo_finansirovaniya.html

³⁰ Распоряжение Правительства РФ от 18.11.2020 № 3024-р, включающее положения о привлечении внебюджетных средств в проекты устойчивого развития в России и механизмов реализации основных направлений «зеленого» устойчивого развития в нашем государстве. URL: <http://ips.pravo.gov.ru:8080/default.aspx?pn=0001202011200033>

³¹ Указ Президента Российской Федерации от 08.02.2021 № 76 «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102080007?index=0&rangeSize=1>

³² Постановление Правительства Москвы от 10.07.2014 № 394-ПП «Об основных положениях новой экологической политики города Москвы на период до 2030 года». URL: https://www.mos.ru/upload/photobank/common/upload/10.07.2014_64-02-902_14_Sobyanin_S.S._Birukov_P.P._1f79b8380a83dfc3bc34639fb96862cf.pdf

²⁶ Минприроды РФ поддерживает введение зеленого тарифа для утилизации свалочного газа. URL: <https://neftegaz.ru/news/ecology/199517-minprirody-rf-podderzhivaet-vvedenie-zelenogo-tarifa-dlya-utilizatsii-svalochnogo-gaza/>

²⁷ ГОСТ 12.4.021-75. Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Общие требования; ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности; СНиП II-12-77. Нормы проектирования. Защита от шума; СН 541-82. Инструкция по проектированию наружного освещения городов, поселков и сельских населенных пунктов.

²⁸ В июне 2020 г. Всемирный банк выпустил руководство о принятии «зеленой» таксономии — «озеленения» финансовых систем с целью достижения задач в сфере экологической устойчивости, развития рынка экологически устойчивого капитала через содействие банкам в создании «зеленых» финансовых продуктов.

²⁹ Минэкономразвития России стало координатором по развитию «зеленого» финансирования. URL: https://www.economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_rossii_

23 марта 2021 г. на XVI Международном финансовом онлайн-форуме Национальной финансовой ассоциации (НФА) С. Швецов (первый заместитель председателя Центробанка) рассказал о разработке проекта «зеленой» ипотеки на льготных условиях, которой занимается институт развития «Дом.рф»³³. Становится важным определение категорий «зеленого» жилья, что простимулирует застройщиков переосмыслить строительные процессы и наиболее интенсивно включать «зеленые» технологии, энергоэффективные решения и экологические архитектурно-градостроительные приемы проектирования. «Если население будет предъявлять спрос на зеленую недвижимость, а государство будет субсидировать зеленую ипотеку, строительным компаниям будет выгодно производить зеленую продукцию», что в скором времени приведет к повышению экоустойчивости среды жизнедеятельности в России.

9. Планировочные решения.

В ряде нормативных документов описываются различные планировочные и объемно-композиционные решения для объектов различного функционального назначения.

К примеру, в СП 55.13330.2016 «Дома жилые многоквартирные» учитываются: анализ территории, благоприятной для строительства; возможность сохранения рельефа с естественным водоотводом; нормы по инсоляции; соблюдение отступов между строениями; классификация малоэтажной жилой застройки; расчет парковок, воды и других показателей; рациональная прокладка инженерных сетей и расположения подземных инженерных сетей; строительство жилых домов с местом приложения труда; организация сферы обслуживания с учетом радиусов доступности; пешеходная доступность до основных сервисов и многое др.

В СП 54.13330.2016 «Здания жилые многоквартирные» описывается: учет климата района строительства (требования к микроклимату); естественное освещение помещений; защита от шума, инфразвука и вибрации; ширина проездов и подъездов для пожарных машин; рекомендуемые расстояния между зданиями; их этажность и протяженность в зависимости от сейсмичности района строительства и пр.

В СП 118.13330.2012 «Общественные здания и сооружения» регламентируются: общие требования к габаритам помещений и высоте; обеспечение санитарно-эпидемиологических требований; долговечность и ремонтпригодность; организация безопасности посетителей и пр.

Переход к созданию национальных российских «зеленых» стандартов был обусловлен необходимостью использования экологических решений для спортивных сооружений Олимпийских игр в Сочи

2014, как необходимость соответствия международным экотребованиям.

В 2009–2010 гг. в России создаются первые Советы по экостроительству (RuGBC, НП СПЗС), адаптирующие требования международных систем экологической сертификации к российским реалиям и разрабатывающие российские «зеленые» стандарты в строительстве.

В августе 2012 г. был утвержден первый экологический стандарт ГОСТ Р 54964-2012 «Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости», закрепляющий комплекс экологических требований к объектам недвижимости (строительство зданий, безопасных для природы, сокращение использования энергетических и водных ресурсов, применение возобновляемых видов энергии, создание комфортных условий для человека).

К текущему периоду в нашем государстве разработано более пятнадцати систем для экологической сертификации объектов строительства: Корпоративный Олимпийский зеленый стандарт; «Зеленые стандарты», НП-СПЗС 1.1.М-2011 «Малоэтажное строительство»; САР-СПЗС «Административные здания; СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011; ГОСТ Р 54964-2012; СДС «РУСО. Футбольные стадионы»; Eco Village; GREEN ZOOM; GREEN ZOOM City; «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Оценка соответствия требованиям «зеленых» стандартов. Общие положения» и др.

Действующие российские экостандарты опираются на следующую нормативную базу:

- ГОСТы по водоснабжению, шумовым ограничениям, ресурсосбережению, охране природы, использованию нетрадиционных видов энергии, ограничению хладагентов, качеству воздуха, экологическому менеджменту³⁴.
- Своды правил по градостроительному проектированию, ограничению шума, организации освещения, устройству автомобильных дорог, климатологии, тепловой защите зданий, организации парковок³⁵.
- СанПиНы по созданию безопасных условий внутри помещений, качеству атмосферного воздуха,

³⁴ ГОСТ 25151-82, ГОСТ 12.1.003-83, ГОСТ 29265-91, ГОСТ 30166-95, ГОСТ 30494-96, ГОСТ 15.101-98, ГОСТ 17.1.1.01-77, ГОСТ 17.8.1.01-86, ГОСТ 30772-2001, ГОСТ 31168-2003, ГОСТ 12.1.012-2004, ГОСТ Р 51090-97, ГОСТ Р 51238-98, ГОСТ Р 51388-99, ГОСТ Р 51387-99, ГОСТ Р 51521-99, ГОСТ Р ИСО 14031-2001, ГОСТ Р 52106-2003, ГОСТ Р 52024-2003, ГОСТ Р ИСО 6879-2005, ГОСТ Р ИСО 14001-2007.

³⁵ СП 42.13330.2011, СП 44.13330.2011, СП 51.13330.2011, СП 34.13330.2011, СП 52.13330.2011, СП 54.13330.2011, СП 55.13330.2011, СП 31.13330.2011, СП 30.13330.2011, СП 131.13330.2011, СП 113.13330.2011, СП 117.13330.2011, СП 60.13330.2011, СП 50.13330.2011, СП 118.13330.2011, СП 23-103-2003.

³³ ЦБ назвал курирующее «зеленую» ипотеку в России ведомство. URL: <https://iz.ru/1142279/2021-03-25/tcb-nazval-kuriruiushchee-zelenuiu-ipoteku-v-rossii-vedomstvo>

организации естественного освещения, защите от электромагнитных полей и радиационной безопасности, качеству питьевой воды³⁶.

Нормативы, на которые ссылаются российские «зеленые» стандарты, на данный момент не имеют единой методической основы и комплексного подхода к безопасному и экологическому проектированию, согласно общемировым целям устойчивого развития. Значительная часть критериев действующих систем экологической сертификации не имеет четкой доказательной нормативной базы, к примеру, «организация велосипедных парковок и велопроездов при городском планировании», «внедрение зеленого транспорта», «сбор дождевой воды с кровли и территории с возможностью повторного использования», «повсеместное использование возобновляемых источников энергии», «использование покрытий с высоким коэффициентом отражения на кровле и территории», «использование экологичных материалов с учетом полного жизненного цикла продукта», «строительные материалы с долей переработанного сырья», «раздельный сбор отходов по категориям для дальнейшей переработки» и многое др.

Некоммерческим партнерством инженеров «АВОК» разработан ряд нормативов по энергетической эффективности объектов строительства, созданию благоприятных микроклиматических условий, внедрению усовершенствованных инженерных систем³⁷.

³⁶ СанПиН 2.1.2.1002-00, СанПиН 2.2.4.0-95, СанПиН 2.1.6.1032-01, СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076-01, СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03, СанПиН 2.1.2.2645-10, СанПиН 2.1.7.1287-03, СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03, СанПиН 2.2.4.1191-03, СанПиН 2.6.1.2523-09, СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03, СанПиН 2.1.4.1074-01.

³⁷ Р НП «АВОК» 7.5-2020. Обеспечение микроклимата и энергосбережение в крытых плавательных бассейнах. Нормы проектирования; Р НП «АВОК» 7.9-2019. Проектирование систем вентиляции и кондиционирования воздуха помещений предприятий общественного питания; Р НП АВОК 5.4.1–2020. Расчет и проектирование регулируемой естественной и гибридной вентиляции в многоэтажных жилых домах; Р НП «АВОК» 5.5.1–2018. Расчет параметров систем противодымной защиты жилых и общественных зданий; СТО НП «АВОК» 2.2.4–2015. Рекомендации по повышению энергетической эффективности систем вентиляции и кондиционирования воздуха; Р НП «АВОК» 4.4–2013. Системы водяного напольного отопления и охлаждения жилых, общественных и производственных зданий; Р НП «АВОК» 2.3–2012. Руководство по расчету теплопотерь помещений и тепловых нагрузок на систему отопления жилых и общественных зданий; Р НП «АВОК» 4.1.6–2009. Системы отопления с потолочными подвесными излучающими панелями; СТО НП «АВОК» 8.1.3-2007. Автоматизированные системы управления зданиями. Часть 3. Функции и др. документы. URL: https://www.abok.ru/norm_doc/#3.

В НИУ МГСУ в 2016 году при инициативе Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) был создан первый в России Технический комитет по стандартизации «Зеленые технологии среды жизнедеятельности» (ТК 366).

ТК 366 исследует новые направления в науке и технике, обеспечивает усовершенствование известных результатов и нормативно-технической документации и внедрение «зеленых» технологий в архитектурно-градостроительное проектирование на базе новых экологических государственных стандартов.

На первом заседании ТК 366 было принято решение о создании рабочей группы по стандартизации терминологии в области деятельности Технического комитета. Члены комитета подчеркнули важность в определении понятий, терминов документации комитета, точного перевода зарубежных терминов и специфики их использования в России. Было принято решение о плане разработки межгосударственных «зеленых» стандартов, подписан меморандум о взаимопонимании в сфере экологической безопасности между НИУ МГСУ и компанией BRE с целью развития экологического проектирования зданий и сооружений в России³⁸, обоснования целесообразности создания Межгосударственного технического комитета (МТК)³⁹.

На текущий период основными задачами МТК являются:

- предложения в программу работ по межгосударственной стандартизации в части, закрепленной за МТК;
- рассмотрение возможности применения международных, региональных и национальных стандартов на межгосударственном уровне;

³⁸ По заявлению столичных властей из Департамента природопользования в ближайшие годы именно нормами системы BREEAM планируют руководствоваться при реализации программы реновации Москвы.

³⁹ В составе МТК должно быть, как правило, не менее пяти полноправных членов, при этом в составе каждого МПК должно быть не менее трех полноправных членов. В предложении о создании МТК приводятся: наименование организации, которой предлагается поручить ведение секретариата МТК, с характеристикой ее области деятельности и опыта работы в данной области и в области стандартизации; предложения по структуре и кандидатурам председателя МТК, его заместителя (при необходимости) и ответственного секретаря МТК и обоснование их компетентности; перечень межгосударственных стандартов, которые предлагается закрепить за МТК; перечень межгосударственных стандартов, которые предполагается разработать в области деятельности МТК в ближайшие годы (от двух до пяти лет). Национальный орган, проявивший инициативу по созданию нового МТК, направляет предложение о его создании во все национальные органы. URL: <http://www.mgs.gost.ru/TKSUGGEST>

• разработка межгосударственных стандартов и обновления действующих российских стандартов⁴⁰.

Первые национальные «зеленые стандарты», разработанные в НИУ МГСУ и утвержденные приказами Росстандарта, были приняты 15 января 2019 г., к ним относятся:

- «Зеленые стандарты». «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности и «зеленая» инновационная продукция. Термины и определения;
- «Зеленые стандарты». «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Классификация;
- «Зеленые стандарты». «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Критерии отнесения;
- «Зеленые стандарты». «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Оценка соответствия требованиям зеленых стандартов. Общие положения».

На текущий период ТК 366 ведется активная деятельность по дальнейшей разработке межгосударственных и усовершенствованию действующих государственных стандартов⁴¹ [74, 75].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье производится анализ нормативной базы по экологическому проектированию РФ и действующих российских экологических стандартов в строительстве.

К экологическому законодательству можно отнести: нормы по охране природных ресурсов, документы в области экологического права и строительного законодательства.

⁴⁰ ГОСТ 1.4-2015. Межгосударственный стандарт. Межгосударственная система стандартизации. Межгосударственные технические комитеты по стандартизации. М., 2016.

⁴¹ ГОСТ Р. Зеленые технологии. Общие положения и руководящие принципы; ГОСТ Р. Зеленые технологии территориального планирования; ГОСТ Р. Зеленые технологии градостроительной деятельности; ГОСТ Р. Зеленые технологии объекта капитального строительства; ГОСТ Р. Зеленые технологии жилищно-коммунального хозяйства; ГОСТ Р. Зеленые технологии текущего и капитального ремонта зданий и сооружений; ГОСТ Р. Зеленые технологии благоустройства прилегающей территории; ГОСТ Р. Зеленые технологии управления и утилизации отходов; ГОСТ Р. Зеленые технологии при производстве продукции; ГОСТ Р. Зеленые технологии при предоставлении транспортных услуг; «Зеленые» стандарты. Экологический туризм. Экологическое проектирование и эксплуатация объектов инфраструктуры; «Зеленые» стандарты. Экологический туризм. Технические и экологические требования к объектам инфраструктуры на особо охраняемых природных территориях; «Зеленые» стандарты. Экологический туризм. Оценка эффективности устойчивого развития экопарков и многие др.

В результате рассмотрения более трехсот нормативно-правовых актов в сфере охраны природы и экологического строительства была проведена систематизация законодательных требований РФ по экологическому проектированию по следующим разделам: 1) охрана природных ресурсов; 2) прилегающая территория; 3) водоеффективность; 4) энергосбережение; 5) материалы; 6) отходы; 7) микроклимат; 8) «зеленое» финансирование; 9) планировочные решения, с выделением четырех этапов становления экологического законодательства.

Первый этап: зарождение экологического законодательства (1950–1970 гг.) — разработка первых нормативных документов.

Второй этап: развитие экологического законодательства (1971–1990 гг.) — развитие полноценной законодательной базы.

Третий этап: становление экологического законодательства (1991–2010 гг.) — формирование окончательных нормативно-правовых актов и условий для нового подхода к экологическому использованию.

Четвертый этап: переосмысление экологического законодательства (2011–2021 гг.) — переход на межгосударственные «зеленые» стандарты серии ГОСТ Р.

Проведем анализ законодательной базы РФ по экологическому проектированию по четырем выделенным этапам (табл. 1).

В результате анализа законодательной базы РФ по экологическому проектированию выявлено, что наибольшее количество нормативов за рассматриваемый временной период (1950–2021 гг.) принято по охране природных ресурсов (31 %), на втором месте — нормативно-правовые акты по созданию благоприятных микроклиматических условий внутри зданий и на прилегающей территории (24 %), на третьем месте — нормативы по энергосбережению (17,7 %).

Наименьшее количество нормативов принято по выбору безопасных материалов для строительства (4,7 %), управлению отходами (4,5 %) и повышению водоеффективности объектов строительства (3,4 %). Новым направлением государственной политики в 2020 г. стало «зеленое» финансирование, закрепленное наименьшим количеством законодательных документов (0,1 %).

Этап с 1991 по 2010 гг. является наиболее продуктивным по введению наибольшего количества документов по экологическому законодательству (40,62 %).

Для определения основных аспектов и приоритетных направлений при экологической сертификации рассмотрим некоторые российские «зеленые» стандарты и разделы их экологической оценки (табл. 2).

Выявлено, что все вышеперечисленные стандарты в обязательном порядке учитывают такие аспекты экологичности, как повышение качества прилегающей территории, энергоэффективность, водоеффективность, микроклимат, материалы и отходы.

Табл. 1. Анализ законодательной базы РФ по экологическому проектированию

Table 1. Analysis of the legislative framework of the Russian Federation on environmental design

Аспекты экологического строительства Aspects of ecological construction	Примерное количество документов по годам (законы, указы, постановления, СНиПы, СанПиНы, ГОСТы, СП, ИСО, П, Р и др.) Approximate number of documents per year (laws, orders, decrees, regulations, SNiPy, SanPiNy, GOST, SP, ISO, P, R, etc.)				
	Первый этап (1950–1970 гг.), % The first stage (1950–1970), %	Второй этап (1971–1990 гг.), % The second stage (1971–1990), %	Третий этап (1991–2010 гг.), % The third stage (1991–2010), %	Четвертый этап (2011–2021 гг.), % The fourth stage (2011–2021), %	Всего документов, % All documents, %
1. Охрана природных ресурсов 1. Protection of natural resources	1,12	17,28	9,24	3,36	31
2. Прилегающая территория 2. Contiguous area	0,3	0,84	0,84	3,92	5,9
3. Водоеффективность 3. Water efficiency	0,1	1,12	1,96	0,22	3,4
4. Энергосбережение 4. Energy conservation	0,56	1,96	13,72	1,46	17,7
5. Материалы 5. Supplies	0,1	1,12	1,4	2,08	4,7
6. Отходы 6. Waste	0,1	0,1	3,46	0,84	4,5
7. Микроклимат 7. Microclimate	0,1	7,56	7,84	8,50	24
8. «Зеленое» финансирование 8. Green fund	–	–	–	0,1	0,1
9. Планировочные решения 9. Planning decisions	0,1	1,4	2,16	5,04	8,7
Всего документов по этапам: Total documents by stage:	2,48	31,38	40,62	25,52	100

Табл. 2. Российские экологические стандарты в строительстве различных организаций
Table 2. Russian environmental standards in the construction of various organizations

Название экостандартов/год введения Name of environmental standards/year of introduction				
«Зеленые стандарты», 2017 г. “Green Standards”, 2017	СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011 «Зеленое строительство. Здания жилые и общественные», 2011 г. STO NOSTROY 2.35.4-2011 “Green construction. Residential and public buildings”, 2011	ГОСТ Р 54964-2012 «Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости», 2012 г. GOST R 54964-2012 “Assessment of compliance. Environmental requirements for real estate”, 2012	GREEN ZOOM «Новое строительство», 2019 г. GREEN ZOOM “New construction”, 2019	ПНСТ 352-2019 «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Общие положения, 2019 г. PNST 352-2019 “Green” standards. “Green” technologies are the medium of vitality. General provisions, 2019
Разделы экологической оценки/количество требований по разделу, % Sections of ecological assessment/number of requirements by section, %				
1. Предотвращение загрязнения 1. Pollution prevention	1. Комфорт и качество внешней среды 1. Comfort and quality of the environment	1. Экологический менеджмент 1. Environmental management	1. Расположение застраиваемой территории и организация транспортного обеспечения 1. Location of the built territory and the organization of transport provision	1. Управление средой жизнедеятельности 1. Management of a medium of activity
0,7	21,7	5,67	6,36	9,1
2. Выбор участка 2. Selection of an area	2. Качество архитектуры и планировки объекта 2. Architecture and layout quality	2. Инфраструктура и качество внешней среды 2. Infrastructure and environmental quality	2. Экологическая устойчивость застраиваемой территории 2. Environmental sustainability of the built-up area	2. Комфорт среды жизнедеятельности 2. Comfort in the living environment
4,9	17,36	24,57	17,32	14,3
3. Инфраструктура 3. Infrastructure	3. Комфорт и экология внутренней среды 3. Comfort and ecology of the inner environment	3. Качество архитектуры и планировка объекта 3. Quality of architecture and object planning	3. Водоэффективность 3. Water efficiency	3. Энергоэффективность среды жизнедеятельности 3. Energy efficiency of living environment
7,7	13,2	17,01	8,48	15,5

4. Ландшафтное обустройство и сохранение или восстановление среды обитания 4. Landscape and conservation or restoration of living conditions	4. Контроль и управление воздушной средой 4. Control and management of the environment	4. Комфорт и экология внутренней среды 4. Comfort and ecology of the environment	4. Энергоэффективность и снижение вредных выбросов в атмосферу 4. Energy efficiency and reduction of harmful emissions into the atmosphere	4. Транспорт среды жизнедеятельности 4. Transport of living environment
11,2	4,34	11,34	14,84	5,2
5. Уменьшение светового загрязнения и эффект локального нагревания 5. Reduction of light pollution and the effect of local heating	5. Рациональное водопользование 5. Rational water use	5. Качество санитарной защиты и утилизации отходов 5. Quality of sanitary protection and utilization of waste	5. Экологически рациональный выбор строительных материалов и управление отходами 5. Ecologically rational selection of construction materials and waste management	5. Вода среды жизнедеятельности 5. Water in the living environment
4,9	6,51	5,67	14,84	7,8
6. Регулирование ливневых стоков и рациональное водопользование 6. Regulation of rainwater drainage and rational water use	6. Энергосбережение и энергоэффективность 6. Energy saving and energy efficiency	6. Рациональное водопользование и регулирование ливневого стока 6. Rational water use and regulation of rainwater drainage	6. Экология внутренней среды зданий 6. Ecology of the environment of the building	6. Воздух среды жизнедеятельности 6. Air in the living environment
6,3	8,68	9,45	29,68	11,7
7. Энергосбережение и атмосфера 7. Energy conservation and the atmosphere	7. Применение альтернативной и возобновляемой энергии 7. The use of alternative and renewable energy	7. Энергосбережение и энергоэффективность 7. Energy saving and energy efficiency	7. Инновации 7. Innovations	7. Материалы среды жизнедеятельности 7. Materials of living environment
16,8	4,34	13,06	6,36	7,8
8. Материалы и ресурсы 8. Supplies and resources	8. Экология создания, эксплуатации и утилизации объекта 8. Ecology of creation, operation and utilization of the object	8. Охрана окружающей среды при строительстве, эксплуатации и утилизации объекта 8. Environmental protection during construction, operation and disposal of the object	8. Региональные особенности 8. Regional specificities	8. Отходы среды жизнедеятельности 8. Waste of living environment
5,6	8,68	7,56	2,12	10,4

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Название экостандартов/год введения Name of environmental standards/year of introduction				
«Зеленые стандарты», 2017 г. “Green Standards”, 2017	СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011 «Зеленое строительство. Здания жилые и общественные», 2011 г. STO NOSTROY 2.35.4-2011 “Green construction. Residential and public buildings”, 2011	ГОСТ Р 54964-2012 «Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости», 2012 г. GOST R 54964-2012 “Assessment of compliance. Environmental requirements for real estate”, 2012	GREEN ZOOM «Новое строительство», 2019 г. GREEN ZOOM “New construction”, 2019	ПНСТ 352-2019 «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Общие положения, 2019 г. PNST 352-2019 “Green” standards. “Green” technologies are the medium of vitality. General provisions, 2019
	9. Экономическая эффективность 9. Economic efficiency	9. Обеспечение безопасности жизнедеятельности 9. Ensuring the safety of life	–	9. Землепользование среды жизнедеятельности 9. Land management of living environment
	6,51	5,67	–	5,2
10. Безопасность 10. Safety	10. Качество подготовки и управления проектом 10. Quality of preparation and project management	–	–	10. Безопасность среды жизнедеятельности 10. Safety of living environment
4,2	8,68	–	–	11,7
11. Санитарно-гигиеническое соответствие 11. Sanitary and hygienic condition	–	–	–	11. Инновации среды жизнедеятельности 11. Innovation of living environment
7,7	–	–	–	1,3
12. Отходы, выбросы и хранение опасных материалов 12. Waste, emissions and storage of hazardous materials	–	–	–	–
3,5	–	–	–	–
13. Участие в разработке проектной документации аккредитованного специалиста 13. Participation in the development of project documentation by an accredited specialist	–	–	–	–
0,7	–	–	–	–

Сравним некоторые разделы исследуемых российских экологических стандартов («Зеленые стандарты», СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011 «Зеленое строительство. Здания жилые и общественные», ГОСТ Р 54964-2012 «Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости», GREEN ZOOM «Новое строительство», ПНСТ 352-2019 «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Общие положения») по количеству требований в процентах и значимости аспектов экооценки (табл. 3).

Из проведенного сравнительного анализа наиболее значимых аспектов экологичности в строительстве пяти российских систем экологической сертификации объектов недвижимости можно сделать вывод, что наибольшее значение при экологической оценке уделяется параметрам микроклимата и внутренней среды здания (11,34–29,68 %), наименьшее количество требований представлено в разделах, касающихся водоэффективности объекта строительства, использования экологичных материалов и рационального обращения с отходами (3,5–14,84 %).

Если провести параллель с действующими российскими экологическими нормативами в данной области, также можно наблюдать *наименьшее количество документов в области рационального водопотребления, выбора экологичных материалов и раздельного сбора отходов* (3,4–4,7 %). Наибольшее количество нормативов в России действует в сфере организации благоприятных микроклиматических условий в помещениях и на прилегающей территории (24 %).

Основными преимуществами экологической сертификации объектов недвижимости считаются: уменьшение использования ресурсов; снижение давления на природную экосистему; комфортная среда для пользователя; снижение затрат на эксплуатацию; внедрение «зеленых» технологий; повышение арендной платы для собственника; развитие конкурентных преимуществ объекта сертифицирования на рынке недвижимости; инвестирование высококачественного продукта и снижение рисков для заказчика.

Недостатками экосертификации по «зеленым» стандартам в России становятся: нехватка специально обученных кадров для организации контроля экологических мероприятий; критерии «зеленых» стандартов тяжелы для восприятия архитекторов и градостроителей [76]; затраты на сертификацию объектов, финансируемых из бюджетных средств, исключаются из сметной стоимости на этапе госэкспертизы по причине отсутствия нормативов, определяющих методику расчета размера затрат, включенных в федеральный реестр; для подтверждения результатов оценки требуются дополнительные расчеты и финансовые вложения; недостаток норм и межгосударственных стандартов для экологического проектирования [77, 78].

В нашем государстве на низком уровне находится ознакомление населения с преимуществами эко-

устойчивого проектирования, в отличие от зарубежных стран, активно пропагандирующих информацию о необходимости использования «зеленых» технологий. Основным направлением экологической политики должно стать введение непрерывного экологического образования во всех структурах общества — от детского сада, школы до колледжа и университета [79]. Необходимо изменение поведения потребителей при организации всестороннего информирования, массового обучения, проведения рекламных кампаний, внедрения обучающих программ в школах и других образовательных учреждениях [80, 81].

На данный момент особенно важным становится использование межгосударственных экологических стандартов в архитектурно-градостроительном проектировании (серии ГОСТ Р) с выделением их приоритетных направлений.

Государственная система национальных «зеленых» стандартов ГОСТ Р для формирования «зеленой» экономики РФ определяет следующие цели:

- включение национальных «зеленых» стандартов в Постановление Правительства РФ № 985 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил» (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации;
- создание междисциплинарного научного направления по использованию «зеленых» национальных нормативных документов по укрупненной группе специальностей и направлений, включение «зеленых» стандартов в научно-технические программы и проекты, предусматривающие проведение фундаментальных и поисковых научных исследований;
- использование национальных «зеленых» стандартов при реализации природоохранной деятельности с наименьшим воздействием на природу.

В силу принятия ряда законодательных документов Президентом РФ в ближайшем будущем «зеленые» стандарты в строительстве станут доступной альтернативой для многих регионов России. При этом соответствие зданий и территорий единому Национальному экологическому стандарту в строительстве может стать обязательным на государственном уровне.

Особенностями развития «зеленого» строительства в России, как драйвера для Таможенного Евразийского экономического союза (ЕАЭС), стало активное сотрудничество российских организаций, в частности МТК, со странами ближнего зарубежья по продвижению целей устойчивого развития и внедрению межгосударственных «зеленых» стандартов в строительстве.

Табл. 3. Сравнение аспектов экологичности российских экологических стандартов в строительстве
Table 3. Comparison of environmental aspects of Russian environmental standards in construction

Наиболее значимые аспекты экологичности в строительстве The most important aspects of environmental friendliness in construction					
Экостандарт Ecostandard	Повышение качества прилегающей территории Increasing the quality of the territory	Энергоэффективность Energy efficiency	Водоэффективность Water efficiency	Микроклимат Microclimate	Материалы/отходы Supplies/waste
Зеленые стандарты Green Standards	Ландшафтное обустройство и сохранение или восстановление среды обитания (11,2 %) Landscape and conservation or restoration of living conditions (11.2 %)	Энергосбережение и атмосфера (16,8 %) Energy saving and atmosphere (16.8 %)	Регулирование ливневых стоков и рациональное водопользование (6,3 %) Regulation of rainwater drainage and rational water use (6.3 %)	Качество и комфорт среды внутри помещений (25,8 %) Quality and comfort of the premises inside the premises (25.8 %)	Материалы и ресурсы (5,6 %). Отходы, выбросы и хранение опасных материалов (3,5 %) Supplies and resources (5.6 %). Waste, emissions and storage of hazardous materials (3.5 %)
СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011 STO NOSTROY 2.35.4-2011	Комфорт и качество внешней среды (21,7 %) Comfort and quality of the environment (21.7 %)	Энергосбережение и энергоэффективность (8,68 %) Energy saving and energy efficiency (8.68 %)	Рациональное водопользование (6,51 %) Rational water use (6.51 %)	Комфорт и экология внутренней среды (13,2 %) Comfort and ecology of the environment (13.2 %)	Экология создания, эксплуатации и утилизации объекта (8,68 %) Ecology of creation, operation and utilization of the object (8.68 %)
ГОСТ Р 54964-2012 GOST R 54964-2012	Инфраструктура и качество внешней среды (24,57 %) Infrastructure and quality of environment (24.57 %)	Энергосбережение и энергоэффективность (13,06 %) Energy saving and energy efficiency (13.06 %)	Рациональное водопользование и регулирование ливневых стоков (9,45 %) Rational water use and regulation of livestock (9.45 %)	Комфорт и экология внутренней среды (11,34 %) Comfort and ecology of the environment (11.34 %)	Качество санитарной защиты и утилизации отходов (5,67 %) Quality of sanitary protection and utilization of waste (5.67 %)
GREEN ZOOM	Экологическая устойчивость застраиваемой территории (17,32 %) Ecological sustainability of the built territory (17.32 %)	Энергоэффективность и снижение вредных выбросов в атмосферу (14,84 %) Energy efficiency and reduction of harmful emissions into the atmosphere (14.84 %)	Водоэффективность (8,48 %) Water efficiency (8.48 %)	Экология внутренней среды зданий (29,68 %) Ecology of the environment of the building (29.68 %)	Экологически рациональный выбор строительных материалов и управление отходами (14,84 %) Ecologically rational selection of construction materials and waste management (14.84 %)
ПНСТ 352-2019 PNST 352-2019	Землепользование среды жизнедеятельности (5,2 %) Land management of living environment (5.2 %)	Энергоэффективность среды жизнедеятельности (15,5 %) Energy efficiency of living environment (15.5 %)	Вода среды жизнедеятельности (7,8 %) Water in the living environment (7.8 %)	Комфорт среды жизнедеятельности (14,3 %) Comfort in the living environment (14.3 %)	Материалы среды жизнедеятельности (7,8 %). Отходы среды жизнедеятельности (10,4 %) Materials of living environment (7.8 %). Waste of living environment (10.4 %)
Всего Total	5,2–24,57 %	8,68–16,8 %	6,3–9,45 %	11,34–29,68 %	3,5–14,84 %

На данный момент «зеленая» Евразия проходит активную стадию по развитию «зеленого» направления во всех сферах общественной жизни. В государствах ЕАЭС (Казахстане, Белоруссии, Киргизии и др.) происходят методологические и нормативные продвижения по «зеленой» тематике. Казахстан уже принял Экологический кодекс, с 2020 г. в стране проходит таксономия «зеленых» видов деятельности и работает «Зеленый» финансовый центр.

В августе 2020 г. Технический комитет по стандартизации «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности и «зеленая» инновационная продукция» (ТК 366) заключил соглашение о вступлении НАО «Международный центр зеленых технологий и инвестиционных проектов» Республики Казахстан в МТК по «зеленым» стандартам с целью оказания содействия Республике Казахстан к переходу к «зеленой экономике» путем продвижения зеленых технологий и привлечения инвестиций.

В октябре 2020 г. МТК и Экологическая организация Таджикистана «Фонд поддержки гражданских инициатив» заключили соглашение о сотрудничестве с целью разработки нормативной правовой основы и внедрения «зеленых» стандартов во всех отраслях экономики Республики Таджикистан.

В декабре 2020 г. был составлен Протокол о сотрудничестве ТК 366 и Киргизской Республики с целью экологизации предприятий и в целом экономики, реализации Программы и плана «зеленой» экономики, интеграции «зеленых» стандартов, утвержденных МТК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Систематизация законодательных требований РФ позволила выделить четыре этапа становления экологического законодательства с 1950 по 2021 гг. Определено наибольшее количество принятых нормативов в рассматриваемый временной период с 1991–2010 гг. Выделены разделы экологического законодательства с наибольшим и наименьшим количеством нормативов и приоритетные направления при экооценке объектов по «зеленым» стандартам.

На сегодняшний день в нашем государстве отсутствует сформированная нормативно-техническая база, целью которой являлось бы проектирование экоустойчивой архитектурно-градостроительной среды. Экологическое сертифицирование объектов недвижимости носит больше рекомендательный характер, иногда только для увеличения конкурентоспособности зданий на рынке недвижимости и рекламы.

Из-за устаревшего экологического законодательства и отсутствия государственных стимулов по объемам «зеленого» строительства Россия заметно отстает от стран ближнего зарубежья. Поэтому существует острая необходимость создания Национального «зеленого» стандарта в строительстве и внедрение обновленных межгосударственных стандартов серии ГОСТ Р.

В РФ только начинает выстраиваться своя система «зеленой» сертификации с комплексным подходом по взаимосвязи ресурсосбережения, энергоэффективности, экологической безопасности и комфортных условий жизнеобеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Botequilha-Leitão A., Díaz-Varela E.R. Performance Based Planning of complex urban social-ecological systems: The quest for sustainability through the promotion of resilience // *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 56. P. 102089. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102089
2. Feleki E., Vlachokostas Ch., Moussiopoulos N. Holistic methodological framework for the characterization of urban sustainability and strategic planning // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 243. P. 118432. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118432
3. Gao Sh., Zhang H. Urban planning for low-carbon sustainable development // *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2020. Vol. 28. P. 100398. DOI: 10.1016/j.suscom.2020.100398
4. Kleszcz J., Maciejko A. Impact of the municipal waste collection system in cities on urban space and the functioning of their inhabitants // *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2020. Vol. 30. No. 1. Pp. 33–42. DOI: 10.2478/ceer-2020-0003
5. Kwak Yo., Park Ch., Deal B. Discerning the success of sustainable planning: A comparative

analysis of urban heat island dynamics in Korean new towns // *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 61. P. 102341. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102341

6. Liang Yu., Du M., Wang X., Xu X. Planning for urban life: A new approach of sustainable land use plan based on transit-oriented development // *Evaluation and Program Planning*. 2020. Vol. 80. P. 101811. DOI: 10.1016/j.evalprogplan.2020.101811

7. Mohamed A., Worku H., Lika T. Urban and regional planning approaches for sustainable governance: The case of Addis Ababa and the surrounding area changing landscape // *City and Environment Interactions*. 2020. Vol. 8. P. 100050. DOI: 10.1016/j.cacint.2020.100050

8. Ali-Toudert F., Ji L., Fährmann L., Czempik S. Comprehensive Assessment Method for Sustainable Urban Development (CAMSUD) — a new multi-criteria system for planning, evaluation and decision-making // *Progress in Planning*. 2020. Vol. 140. P. 100430. DOI: 10.1016/j.progress.2019.03.001

9. Baumanova M. Urban kinaesthetic heritage and production of social sustainability // *Journal of*

Archaeological Science: Reports. 2020. Vol. 32. P. 102445. DOI: 10.1016/j.jasrep.2020.102445

10. Du M., Zhao M., Fu Ya. Revisiting urban sustainability from access to jobs: Assessment of economic gain versus loss of social equity // *Environmental Impact Assessment Review*. 2020. Vol. 85. P. 106456. DOI: 10.1016/j.eiar.2020.106456

11. Nieuwenhuijsen M.J. Urban and transport planning pathways to carbon neutral, liveable and healthy cities; A review of the current evidence // *Environment International*. 2020. Vol. 140. P. 105661. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105661

12. Suleiman L., Olofsson B., Sauri D., Palau-Rof L. A breakthrough in urban rain-harvesting schemes through planning for urban greening: Case studies from Stockholm and Barcelona // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2020. Vol. 51. P. 126678. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126678

13. Теличенко В.И., Слесарев М.Ю. «Зеленая» стандартизация технологий формирования природоподобной среды жизнедеятельности // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. Вып. 5 (116). С. 558–567. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.558-567

14. Нефедов В.А. Ландшафтный дизайн и устойчивость среды. СПб.: Полиграфист, 2002. 295 с.

15. Röck M., Hollberg A., Habert G., Passer A. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages // *Building and Environment*. 2018. Vol. 140. Pp. 153–161. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.05.006

16. Fontana E. Pioneering environmental innovation in developing countries: The case of executives' adoption of Leadership in Energy and Environmental Design // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 236. P. 1. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117675

17. Feng K., Lu W., Wang Ya. Assessing environmental performance in early building design stage: An integrated parametric design and machine learning method // *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 50. P. 101596. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101596

18. Gercek M., Arsan Z.D. Energy and environmental performance based decision support process for early design stages of residential buildings under climate change // *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 48. P. 101580. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101580

19. Hasika V., Ororbiab M., Warnb G.P., Bileca M.M. Whole building life cycle environmental impacts and costs: A sensitivity study of design and service decisions // *Building and Environment*. 2019. Vol. 163. P. 106316. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106316

20. Wu Z., Li H., Feng Yo., Luo X., Chen Q. Developing a green building evaluation standard for interior decoration. A case study of China // *Building and Environment*. 2019. Vol. 152. Pp. 50–58. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.02.010

21. Strong K., Noor A., Aponte J., Banerjee A., Cibulskis R., Diaz T. et al. Monitoring

the status of selected health related sustainable development goals: methods and projections to 2030 // *Global health action*. 2020. Vol. 13. No. 1. P. 1846903. DOI: 10.1080/16549716.2020.1846903

22. Lindsay A.R., Sanchirico J.N., Gilliland T.E., Ambo-Rappe R., Taylor J.E., Krueck N.C. et al. Evaluating sustainable development policies in rural coastal economies // *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*. 2020. Vol. 117. No. 52. Pp. 33170–33176. DOI: 10.1073/pnas.2017835117

23. Moraes L.F.B., Rampasso I.S., Anholon R., Lima G.B.A., Santa-Eulalia L.A., Mosconi E. et al. Assessing risk management in Brazilian social projects: a path towards sustainable development // *International journal of sustainable development and world ecology*. 2020. Vol. 1. P. 1. DOI: 10.1080/13504509.2020.1867251

24. Shi C.X., Feng X.W., Jin Z.N. Sustainable development of China's smart energy industry based on artificial intelligence and low-carbon economy // *Energy and engineering*. 2020. Vol. 1. P. 1. DOI: 10.1002/ese3.856

25. Niet T., Arianpoo N., Kuling K., Wright A.S. Embedding the United Nations sustainable development goals into energy systems analysis: expanding the food-energy-water nexus // *Energy sustainability and society*. 2021. Vol. 1. No. 1. P. 1. DOI: 10.1186/s13705-020-00275-0

26. Leite A., Sousa H.F.P.E., Vidal D.G., Dinis M.P.A. Finding a path for happiness in the context of sustainable development: a possible key // *International journal of sustainable development and world ecology*. 2019. Vol. 27. No. 5. Pp. 396–404. DOI: 10.1080/13504509.2019.1708509

27. Guo J., Chen M., Sun X.L., Wang Z.Z. Xue J.L. Leveraging industrial-technological innovation to achieve sustainable development: A systems thinking perspective // *Plos one*. 2020. Vol. 15. No. 12. P. e0242981. DOI: 10.1371/journal.pone.0242981

28. Su Y.Y., Si H.Y., Chen J.G., Wu G.D. Promoting the sustainable development of the recycling market of construction and demolition waste: A stakeholder game perspective // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 277. P. 122281. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122281

29. Verweij P., Cormont A., van Eupen M., Winoograd M., Hardoy J. Participatory modeling with QUICK-Scan to shape sustainable urban development // *Frontiers in Environmental Science*. 2020. Vol. 8. P. 550799. DOI: 10.3389/fenvs.2020.550799

30. Soler-Dominguez A., Matallin-Saez J.C., de Mingo-Lopez D.V., Tortosa-Ausina E. Looking for sustainable development: Socially responsible mutual funds and the low-carbon economy // *Business strategy and the environment*. 2020. Vol. 1. P. 1. DOI: 10.1002/bse.2713

31. Nazar R., Meo M.S., Ali S. Role of public health and trade for achieving sustainable development goals //

Journal of public affair. 2020. Vol. 1. P. e2585. DOI: 10.1002/pa.2585

32. Varma C.R.S., Palaniappan S. Comparison of green building rating schemes used in North America, Europe and Asia // Habitat International. 2019. Vol. 89. P. 101989. DOI: 10.1016/j.habitatint.2019.05.008

33. Pedro J., Silva C., Pinheiro M.D. Integrating GIS spatial dimension into BREEAM communities sustainability assessment to support urban planning policies, Lisbon case study // Land Use Policy. 2019. Vol. 86. Pp. 424–434. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.02.003

34. Suzer O. Analyzing the compliance and correlation of LEED and BREEAM by conducting a criteria-based comparative analysis and evaluating dual-certified projects // Building and Environment. 2019. Vol. 147. Pp. 158–170. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.09.001

35. Ajayi S.O., Oyedele L.O., Dauda J.A. Dynamic relationship between embodied and operational impacts of buildings: An evaluation of sustainable design appraisal tools // World Journal of Science Technology and Sustainable Development. 2019. Vol. 16. No. 2. Pp. 70–81. DOI: 10.1108/WJSTSD-05-2018-0048

36. Mahmoud S., Zayed T., Fahmy M. Development of sustainability assessment tool for existing buildings // Sustainable Cities and Society. 2019. Vol. 44. Pp. 99–119. DOI: 10.1016/j.scs.2018.09.024

37. Dili A.S., Naseer M.A., Varghese T.Z. Passive control methods of Kerala traditional architecture for a comfortable indoor environment: A comparative investigation during winter and summer // Building and Environment. 2010. Vol. 45. No. 5. Pp. 1134–1143. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.10.018

38. Fransson N., Västfjäll D., Skoog J. In search of the comfortable indoor environment: A comparison of the utility of objective and subjective indicators of indoor comfort // Building and Environment. 2007. Vol. 42. No. 5. Pp. 1886–1890. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.02.021

39. Bluyssen Ph.M. Towards new methods and ways to create healthy and comfortable buildings // Building and Environment. 2010. Vol. 45. No. 4. Pp. 808–818. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.08.020

40. Sadat Korsavi S., Montazami A., Mumovic D. The impact of indoor environment quality (IEQ) on school children's overall comfort in the UK; a regression approach // Building and Environment. 2020. Vol. 185. P. 1. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107309

41. Zhang L., Zhan Q., Lan Yu. Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters // Building and Environment. 2018. Vol. 130. Pp. 27–39. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.12.014

42. Luo F., Liu Ya., Peng J., Wu J. Assessing urban landscape ecological risk through an adaptive

cycle framework // Landscape and Urban Planning. 2018. Vol. 180. Pp. 125–134. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2018.08.014

43. Zhang J., Luo M., Yue H., Chen X., Feng Ch. Critical thresholds in ecological restoration to achieve optimal ecosystem services: An analysis based on forest ecosystem restoration projects in China // Land Use Policy. 2018. Vol. 76. Pp. 675–678. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.02.050

44. Besson M., Delmas E., Poisot T., Gravel D. Complex Ecological Networks // Encyclopedia of Ecology (Second Edition). 2019. Vol. 1. Pp. 536–545. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10564-0

45. Chaffin B.C., Scown M. Social-ecological resilience and geomorphic systems // Geomorphology. 2018. Vol. 305. Pp. 221–230. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.09.038

46. Hansen M.H., Li H., Svarverud R. Ecological civilization: Interpreting the Chinese past, projecting the global future // Global Environmental Change. 2018. Vol. 53. Pp. 195–203. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2018.09.014

47. Николаевский В.С., Якубов Х.Г. Развитие Москвы и современные экологические проблемы мегаполиса // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2008. № 1. С. 37–40.

48. Соколова А.А., Зимич В.В. Проблемы эко-архитектуры в России // Архитектура, градостроительство и дизайн. 2018. № 1 (15). С. 24–28.

49. Паздникова Д.А., Тулинова Т.А. Основные особенности технологий «зеленого» строительства // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2019. Т. 2. С. 262–267.

50. Теличенко В.И., Рудь Н.С. Концепция «Здоровьесбережения» при создании комфортной среды жизнедеятельности // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования : сб. докл. Первой национальной конф. 2020. С. 579–584.

51. Федосихин В.С., Шенцова О.М. Проблема экологического строительства в промышленных моногородах России (на примере города Магнитогорска Уральского федерального округа // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2017. № 1. С. 375–379.

52. Германова Т.В., Керножитская А.Ф. Анализ направлений пространственного развития города Тюмени с учетом экологических факторов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2016. № 4 (24). С. 21–31.

53. Сумеркин Ю.А., Теличенко В.И. Оценка экологической безопасности придомовых территорий жилых районов // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 6. С. 75–79.

54. Прешкин Г.А., Безрукова Т.Л. Подход к измерению стоимости зеленых насаждений на землях

населенных пунктов // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 7. № 1 (25). С. 233–240.

55. Кузнецова А.Р., Altinay L., Асылбаев И.Г., Янбаев Ю.А. Проблемы развития экологического менеджмента в современных условиях // Российский электронный научный журнал. 2014. № 1 (7). С. 67–73.

56. Прокофьева Е.Ю. Экологические приоритеты в проектировании общественных территорий частных загородных поселений // Academia. Архитектура и строительство. 2008. № 3. С. 50–55.

57. Сухинина Е.А. Роль экологических нормативов в формировании архитектурной среды // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2014. № 1 (33). С. 131–139.

58. Сухинина Е.А. Экологические нормативы в архитектурно-градостроительном проектировании. Саратов : СГТУ, 2017. 172 с.

59. Большаков А.Г. Принципы организации прибрежных территорий как экологического каркаса города // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2011. Т. 4. № 2. С. 5–11.

60. Исаева Ю.В. Экологическая архитектура // Альманах мировой науки. 2016. № 11–3(14). С. 119–120.

61. Ярошенко Е.Ю. Экологический подход в архитектуре и градостроительстве // Студенческий вестник. 2018. № 1 (21). С. 60–62.

62. Бенуж А.А. Государственная система национальных «Зеленых» стандартов ГОСТ Р: материалы презентации. М. : МГСУ, 2021. 22 с.

63. Каплина С. Составляющие метода междисциплинарного экологического проектирования // Качество образования. 2013. № 2. С. 58–62.

64. Графкина М.В. Системный анализ и оценка экологической безопасности природно-технических систем при проектировании // Естественные и технические науки. 2008. № 4 (36). С. 242–245.

65. Давиденко П.Н., Петрова З.К. О проектировании ресурсосберегающей и экологической жилой среды // Жилищное строительство. 2003. № 9. С. 3–11.

66. Яницкий О.Н. Экомодернизация России: проблемы, концепции, решения // История и современность. 2008. № 2. С. 96.

67. Смирнов В.И., Кожевников В.С., Гаврилов Г.М. Охрана окружающей среды при проектировании городов. Ленинград : Стройиздат, 1981. 164 с.

68. Маковик Р.С. Экологическое право РФ. Определения, схемы, комментарии: учебное пособие. М. : Юрист, 1996. 86 с.

69. Нефедов В.А. Ландшафтный дизайн и устойчивость среды. СПб. : Полиграфист, 2002. 295 с.

70. Аристова Н.А. Концепция «экодизайна» (экологического проектирования) в правовом регулировании энергоэффективности в ЕС // Инновации и инвестиции. 2013. № 6. С. 121–125.

71. Никонова Е.Р. Архитектурная экология: учебное пособие для студентов направления подготовки 07.03.01 «Архитектура». Пенза : ПГУАС, 2016. 120 с.

72. Туликов А.В. Государственная политика в области энергоаудита и энергосервиса // Энергосбережение. 2011. № 6.

73. Сухинина Е.А. Строительство зданий из вторичного сырья с учетом требований экологических стандартов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 186–201. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.186-201

74. Теличенко В.И. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности: понятия, термины, стандарты // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 4 (103). С. 364–372.

75. Теличенко В.И., Бенуж А.А. Состояние и развитие системы технического регулирования в области зеленых технологий // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 1. С. 118–121.

76. Ключкова О.Н., Сухинина Е.А. Проблемы экологического сертифицирования зданий в России // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 4 (103). С. 396–404.

77. Теличенко В.И., Бенуж А.А., Рудь Н.С., Йейе О.У. Параметры проектирования комфортной среды жизнедеятельности в нормативной документации // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 5. С. 51–56.

78. Бенуж А.А. «Зеленые» стандарты в архитектурно-строительной сфере Российской Федерации // Перспективы развития строительного комплекса : мат. XIV Междунар. науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов. 2020. С. 16–19.

79. Протасов В.Ф., Молчанов А.В. Экология, здоровье и природопользование в России. М. : Финансы и статистика, 1995. С. 278.

80. Большеротов А.Л. Системы оценки экологической безопасности строительства. М. : Изд-во АСВ, 2010. 216 с.

81. Браун В.К., Поляков А.Н. Экологическая премия застройщика // Руководитель строительной организации. 2011. № 1. С. 14–20.

Поступила в редакцию 21 апреля 2021 г.

Принята в доработанном виде 26 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 26 апреля 2021 г.

О Б АВТОРАХ: Валерий Иванович Теличенко — доктор технических наук, профессор, академик, первый вице-президент РААСН, президент МГСУ, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной

энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; PRESIDENT@mgssu.ru;

Андрей Александрович Бенуж — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования зданий и сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 767166, Scopus: 55924719500, ResearcherID: N-7098-2016; abenuzh@gmail.com;

Елена Александровна Сухинина — кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектуры; **Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)**; 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77; РИНЦ ID: 701984, Scopus: 57219089339, ORCID-0000-0003-1593-6357; arx-art-lena@yandex.ru.

REFERENCES

1. Botequilha-Leitão A., Díaz-Varela E.R. Performance Based Planning of complex urban social-ecological systems: The quest for sustainability through the promotion of resilience. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 56:102089. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102089
2. Feleki E., Vlachokostas Ch., Moussiopoulos N. Holistic methodological framework for the characterization of urban sustainability and strategic planning. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 243:118432. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118432
3. Gao Sh., Zhang H. Urban planning for low-carbon sustainable development. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2020; 28:100398. DOI: 10.1016/j.suscom.2020.100398
4. Kleszcz J., Maciejko A. Impact of the municipal waste collection system in cities on urban space and the functioning of their inhabitants. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2020; 30(1):33-42. DOI: 10.2478/ceer-2020-0003
5. Kwak Yo., Park Ch., Deal B. Discerning the success of sustainable planning: A comparative analysis of urban heat island dynamics in Korean new towns. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 61:102341. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102341
6. Liang Yu., Du M., Wang X., Xu X. Planning for urban life: A new approach of sustainable land use plan based on transit-oriented development. *Evaluation and Program Planning*. 2020; 80:101811. DOI: 10.1016/j.evalproplan.2020.101811
7. Mohamed A., Worku H., Lika T. Urban and regional planning approaches for sustainable governance: The case of Addis Ababa and the surrounding area changing landscape. *City and Environment Interactions*. 2020; 8:100050. DOI: 10.1016/j.cacint.2020.100050
8. Ali-Toudert F., Ji L., Fährmann L., Czempik S. Comprehensive Assessment Method for Sustainable Urban Development (CAMSUD) — a new multi-criteria system for planning, evaluation and decision-making. *Progress in Planning*. 2020; 140:100430. DOI: 10.1016/j.progress.2019.03.001
9. Baumanova M. Urban kinaesthetic heritage and production of social sustainability. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2020; 32:102445. DOI: 10.1016/j.jasrep.2020.102445
10. Du M., Zhao M., Fu Ya. Revisiting urban sustainability from access to jobs: Assessment of economic gain versus loss of social equity. *Environmental Impact Assessment Review*. 2020; 85:106456. DOI: 10.1016/j.eiar.2020.106456
11. Nieuwenhuijsen M.J. Urban and transport planning pathways to carbon neutral, liveable and healthy cities; A review of the current evidence. *Environment International*. 2020; 140:105661. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105661
12. Suleiman L., Olofsson B., Sauri D., Palau-Rof L. A breakthrough in urban rain-harvesting schemes through planning for urban greening: Case studies from Stockholm and Barcelona. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2020; 51:126678. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126678
13. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. Green standardization of technologies for the formation of a nature-like living environment. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; 13:5(116):558-567. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.558-567 (rus.).
14. Nefedov V.A. *Landscaping and environmental sustainability*. St. Petersburg, Polygraphist, 2002; 295. (rus.).
15. Röck M., Hollberg A., Habert G., Passer A. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. *Building and Environment*. 2018; 140:153-161. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.05.006
16. Fontana E. Pioneering environmental innovation in developing countries: The case of executives' adoption of Leadership in Energy and Environmental Design. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 236:1. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117675
17. Feng K., Lu W., Wang Ya. Assessing environmental performance in early building design stage: An integrated parametric design and machine learning method. *Sustainable Cities and Society*. 2019; 50:101596. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101596

18. Gercek M., Arsan Z.D. Energy and environmental performance based decision support process for early design stages of residential buildings under climate change. *Sustainable Cities and Society*. 2019; 48:101580. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101580
19. Hasika V., Ororbiab M., Warnb G.P., Bileca M.M. Whole building life cycle environmental impacts and costs: A sensitivity study of design and service decisions. *Building and Environment*. 2019; 163:106316. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106316
20. Wu Z., Li H., Feng Yo., Luo X., Chen Q. Developing a green building evaluation standard for interior decoration: A case study of China. *Building and Environment*. 2019; 152:50-58. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.02.010
21. Strong K., Noor A., Aponte J., Banerjee A., Cibulskis R., Diaz T. et al. Monitoring the status of selected health related sustainable development goals: methods and projections to 2030. *Global Health Action*. 2020; 13(1): 1846903. DOI: 10.1080/16549716.2020.1846903
22. Lindsay A.R., Sanchirico J.N., Gilliland T.E., Ambo-Rappe R., Taylor J.E., Krueck N.C. et al. Evaluating sustainable development policies in rural coastal economies. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*. 2020; 117(52):33170-33176. DOI: 10.1073/pnas.2017835117
23. Moraes L.F.B., Rampasso I.S., Anholon R., Lima G.B.A., Santa-Eulalia L.A., Mosconi E. et al. Assessing risk management in Brazilian social projects: a path towards sustainable development. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*. 2020; 1:1. DOI: 10.1080/13504509.2020.1867251
24. Shi C.X., Feng X.W., Jin Z.N. Sustainable development of China's smart energy industry based on artificial intelligence and low-carbon economy. *Energy and Engineering*. 2020; 1:1. DOI: 10.1002/ese3.856
25. Niet T., Arianpoo N., Kuling K., Wright A.S. Embedding the United Nations sustainable development goals into energy systems analysis: expanding the food-energy-water nexus. *Energy Sustainability and Society*. 2021; 1(1):1. DOI: 10.1186/s13705-020-00275-0
26. Leite A., Sousa H.F.P.E., Vidal D.G., Dinis M.P.A. Finding a path for happiness in the context of sustainable development: a possible key. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*. 2019; 27(5):396-404. DOI: 10.1080/13504509.2019.1708509
27. Guo J., Chen M., Sun X.L., Wang Z.Z., Xue J.L. Leveraging industrial-technological innovation to achieve sustainable development: A systems thinking perspective. *Plos One*. 2020; 15(12):e0242981. DOI: 10.1371/journal.pone.0242981
28. Su Y.Y., Si H.Y., Chen J.G., Wu G.D. Promoting the sustainable development of the recycling market of construction and demolition waste: A stakeholder game perspective. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 277:122281. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122281
29. Verweij P., Cormont A., van Eupen M., Winoograd M., Hardoy J. Participatory modeling with QUICK-Scan to shape sustainable urban development. *Frontiers in Environmental Science*. 2020; 8:550799. DOI: 10.3389/fenvs.2020.550799
30. Soler-Dominguez A., Matallin-Saez J.C., de Mingo-Lopez D.V., Tortosa-Ausina E. Looking for sustainable development: Socially responsible mutual funds and the low-carbon economy. *Business Strategy and the Environment*. 2020; 1:1. DOI: 10.1002/bse.2713
31. Nazar R., Meo M.S., Ali S. Role of public health and trade for achieving sustainable development goals. *Journal of Public Affair*. 2020; 1:e2585. DOI: 10.1002/pa.2585
32. Varma C.R.S., Palaniappan S. Comparison of green building rating schemes used in North America, Europe and Asia. *Habitat International*. 2019; 89:101989. DOI: 10.1016/j.habitatint.2019.05.008
33. Pedro J., Silva C., Pinheiro M.D. Integrating GIS spatial dimension into BREEAM communities sustainability assessment to support urban planning policies, Lisbon case study. *Land use Policy*. 2019; 86:424-434. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.02.003
34. Suzer O. Analyzing the compliance and correlation of LEED and BREEAM by conducting a criteria-based comparative analysis and evaluating dual-certified projects. *Building and Environment*. 2019; 147:158-170. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.09.001
35. Ajayi S.O., Oyedele L.O., Dauda J.A. Dynamic relationship between embodied and operational impacts of buildings: An evaluation of sustainable design appraisal tools. *World Journal of Science Technology and Sustainable Development*. 2019; 16(2):70-81. DOI: 10.1108/WJSTSD-05-2018-0048
36. Mahmoud S., Zayed T., Fahmy M. Development of sustainability assessment tool for existing buildings. *Sustainable Cities and Society*. 2019; 44:99-119. DOI: 10.1016/j.scs.2018.09.024
37. Dili A.S., Naseer M.A., Varghese T.Z. Passive control methods of Kerala traditional architecture for a comfortable indoor environment: A comparative investigation during winter and summer. *Building and Environment*. 2010; 45(5):1134-1143. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.10.018
38. Fransson N., Västfjäll D., Skoog J. In search of the comfortable indoor environment: A comparison of the utility of objective and subjective indicators of indoor comfort. *Building and Environment*. 2007; 42(5):1886-1890. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.02.021
39. Bluyssen Ph.M. Towards new methods and ways to create healthy and comfortable buildings. *Building and Environment*. 2010; 45(4):808-818. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.08.020
40. Sadat Korsavi S., Montazami A., Mumovic D. The impact of indoor environment quality (IEQ) on school children's overall comfort in the UK; a regression approach. *Building and Environment*. 2020; 185:1. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107309

41. Zhang L., Zhan Q., Lan Yu. Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters. *Building and Environment*. 2018; 130:27-39. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.12.014
42. Luo F., Liu Ya., Peng J., Wu J. Assessing urban landscape ecological risk through an adaptive cycle framework. *Landscape and Urban Planning*. 2018; 180:125-134. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2018.08.014
43. Zhang J., Luo M., Yue H., Chen X., Feng Ch. Critical thresholds in ecological restoration to achieve optimal ecosystem services: An analysis based on forest ecosystem restoration projects in China. *Land Use Policy*. 2018; 76:675-678. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.02.050
44. Besson M., Delmas E., Poisot T., Gravel D. Complex ecological networks. *Encyclopedia of Ecology (Second Edition)*. 2019; 1:536-545. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10564-0
45. Chaffin B.C., Scown M. Social-ecological resilience and geomorphic systems. *Geomorphology*. 2018; 305:221-230. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.09.038
46. Hansen M.H., Li H., Svarverud R. Ecological civilization: Interpreting the Chinese past, projecting the global future. *Global Environmental Change*. 2018; 53:195-203. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2018.09.014
47. Nikolaevsky V.S., Yakubov H.G. The development of Moscow and modern ecological problems of the metropolis. *Bulletin of the Moscow State University of Forest — Lesnoy Bulletin*. 2008; 1:37-40. (rus.).
48. Sokolova A.A., Zimich V.V. Problems of eco-architecture in Russia. *Architecture, Urban Planning and Design*. 2018; 1(15):24-28. (rus.).
49. Pazdnikova D.A., Tulinova T.A. The main features of green building technologies. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2019; 2:262-267. (rus.).
50. Telichenko V.I., Rud N.S. The concept of “Health preservation” when creating a comfortable living environment. *Actual problems of the construction industry and education: collection of reports of the First National Conference*. 2020; 579-584. (rus.).
51. Fedosikhin V.S., Shentsova O.M. The problem of ecological construction in industrial monotowns of Russia (on the example of the city of Magnitogorsk in the Ural Federal District. *Far East: Problems of Development of the Architectural and Construction Complex*. 2017; 1:375-379. (rus.).
52. Germanova T.V., Kernozhitskaya A.F. Analysis of the directions of spatial development of the city of Tyumen, taking into account environmental factors. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urban Studies*. 2016; 4(24):21-31. (rus.).
53. Sumerkin Yu.A., Telichenko V.I. Assessment of the ecological safety of the adjacent territories of residential areas. *Industrial and Civil Construction*. 2017; 6:75-79. (rus.).
54. Preshkin G.A., Bezrukova T.L. Approach to measuring the value of green spaces on the lands of settlements. *Forestry Journal*. 2017; 7:1(25):233-240. (rus.).
55. Kuznetsova A.R., Altinay L., Asylbaev I.G., Yanbaev Yu.A. Problems of the development of environmental management in modern conditions. *Russian Electronic Scientific Journal*. 2014; 1(7):67-73. (rus.).
56. Prokofieva E.Yu. Environmental priorities in the design of public areas of private suburban settlements. *Academia. Architecture and Construction*. 2008; 3:50-55. (rus.).
57. Sukhinina E.A. The role of environmental standards in the formation of the architectural environment. *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2014; 1(33):131-139 (rus.).
58. Sukhinina E.A. *Environmental standards in architectural and urban planning*. Saratov, SSTU, 2017; 172. (rus.).
59. Bolshakov A.G. Principles of the organization of coastal territories as the ecological framework of the city. *Bulletin of the Irkutsk State University. Series: Biology. Ecology*. 2011; 4(2):5-11. (rus.).
60. Isaeva Yu.V. Environmental architecture. *Almanac of World Science*. 2016; 11-3(14):119-120. (rus.).
61. Yaroshenko E.Yu. Ecological approach in architecture and urban planning. *Student Bulletin*. 2018; 1(21):60-62 (rus.).
62. Benuzh A.A. *State system of national “Green” standards GOST R: presentation materials*. Moscow, MGSU, 2021; 22. (rus.).
63. Kaplina S. Components of the method of interdisciplinary environmental design. *Quality of Education*. 2013; 2:58-62. (rus.).
64. Grafkina M.V. System analysis and assessment of environmental safety of natural and technical systems during design. *Natural and Technical Sciences*. 2008; 4(36):242-245. (rus.).
65. Davidenko P.N., Petrova Z.K. On the design of a resource-saving and ecological living environment. *Housing Construction*. 2003; 9:3-11. (rus.).
66. Yanitskiy O.N. Eco-modernization of Russia: problems, concepts, solutions. *History and Modernity*. 2008; 2:96. (rus.).
67. Smirnov V.I., Kozhevnikov V.S., Gavrilov G.M. *Environmental protection in the design of cities*. Leningrad, Stroyizdat, 1981; 164. (rus.).
68. Makovik R.S. *Environmental law of the Russian Federation. Definitions, schemes, comments: textbook. allowance*. Moscow, Jurist, 1996; 86. (rus.).
69. Nefedov V.A. *Landscaping and environmental sustainability*. St. Petersburg, Polygraphist, 2002; 295. (rus.).
70. Aristova N.A. The concept of “ecodesign” (ecological design) in the legal regulation of energy ef-

ficiency in the EU. *Innovations and Investments*. 2013; 6:121-125. (rus.).

71. Nikonova E.R. Architectural ecology: textbook manual for students in the direction of training 07.03.01 Architecture. Penza, PGUAS, 2016; 120. (rus.).

72. Tulikov A.V. State policy in the field of energy audit and energy service. *Energoberezhenie*. 2011; 6. (rus.).

73. Sukhinina E.A. Construction of buildings from secondary raw materials taking into account the requirements of environmental standards. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(2):186-201. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.186-201 (rus.).

74. Telichenko V.I. Green technologies of the living environment: concepts, terms, standards. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(4):(103):364-372. (rus.).

75. Telichenko V.I., Benuzh A.A. The state and development of the system of technical regulation in the field of green technologies. *Academia. Architecture and Construction*. 2016; 1:118-121. (rus.).

76. Klochkova O.N., Sukhinina E.A. Problems of ecological certification of buildings in Russia. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(4):(103):396-404. (rus.).

77. Telichenko V.I., Benuzh A.A., Rud N.S., Yeye O.U. Parameters for designing a comfortable living environment in regulatory documents. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 5:51-56. (rus.).

78. Benuzh A.A. "Green" standards in the architectural and construction sector of the Russian Federation. Prospects for the development of the building complex. *Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference of the teaching staff, young scientists and students*. 2020; 16-19. (rus.).

79. Protasov V.F. *Ecology, health and nature management in Russia*. Moscow, Finance and Statistics, 1995; 528. (rus.).

80. Bolsherotov A.L. *Environmental safety assessment systems for construction*. Moscow, ASV Publishing House, 2010; 216. (rus.).

81. Brown V.K., Polyakov A.N. The developer's environmental award. *Head of the Construction Organization*. 2011; 1:14-20. (rus.).

Received April 21, 2021.

Adopted in revised form on April 26, 2021.

Approved for publication on April 26, 2021.

BIONOTES: **Valeriy I. Telichenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, member and first vicepresident Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Power Plants, President of MGSU; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; PRESIDENT@mgssu.ru;

Andrey A. Benuzh — Candidate of Science, Associate Professor of the Department of Design of Buildings and Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 767166, Scopus: 55924719500, ResearcherID: N-7098-2016; abenuzh@gmail.com;

Elena A. Suhinina — Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of Architecture; **Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU)**; 77 Polytechnic st., Saratov, 410054, Russian Federation; ID RISC: 701984, Scopus: 57219089339, ORCID-0000-0003-1593-6357; arx-art-lena@yandex.ru.

Осадка и несущая способность водонасыщенного основания фундамента конечной ширины при статическом воздействии

З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, А. Осман

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

АННОТАЦИЯ

Введение. При кратковременном воздействии статической нагрузки, а также динамической нагрузки, в условиях отсутствия дренажа, следует учитывать распределение тотальных напряжений между скелетом и поровой газосодержащей водой. Ситуация с напряженно-деформированным состоянием (НДС) основания еще больше усложняется, если учитывать степень водонасыщения грунтов основания ($0,8 < S_r \leq 1$). Цель исследования — решение задачи о НДС водонасыщенного грунтового массива, в том числе осадка и несущей способности водонасыщенного основания фундамента конечной ширины в зависимости от степени водонасыщения грунтов, с учетом линейных и нелинейных свойств скелета грунта и сжимаемости поровой газосодержащей воды.

Материалы и методы. В качестве расчетной для описания связи между деформациями и напряжениями грунта используется система уравнений Генки, которая учитывает влияние среднего напряжения на деформационные и прочностные свойства грунта. Система уравнений Генки позволяет представить линейную деформацию грунта как сумму объемных и сдвиговых составляющих грунта этой деформации. Такое представление линейной деформации грунта как нельзя лучше отражает механические свойства грунтовой среды. Также система уравнений Генки дает возможность определить деформацию слоя грунтов в составе сжимаемой толщи основания фундамента конечной ширины в условиях свободных деформаций.

Результаты. В зависимости от линейных и нелинейных деформационных параметров осадка может развиваться по затухающей кривой осадка — нагрузка ($S - p$) и стабилизироваться, и развиваться с незатухающей кривой осадка — нагрузка ($S - p$), переходя на стадию прогрессирующей осадки.

Выводы. Выполнено решение для случаев, когда водонасыщение грунтов основания меняется в диапазоне от 0,8 до 1,0. Показано, что осадка и несущая способность водонасыщенного основания существенно зависят от степени водонасыщения грунтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: осадка, несущая способность, статическое воздействие, физико-механические свойства, степень водонасыщенности, уравнения Генки, НДС грунтового основания, оценка влияния

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Осман А. Осадка и несущая способность водонасыщенного основания фундамента конечной ширины при статическом воздействии // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 4. С. 463–472. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.463-472

Settlement and bearing capacity of water-saturated soils of foundations of finite width under static impact

Zaven G. Ter-Martirosyan, Armen Z. Ter-Martirosyan, Ahmad Othman

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

ABSTRACT

Introduction. In case of brief exposure to static loads or dynamic loads, in conditions of absence of drainage, distribution of total stresses between the skeleton of soil and pore gas-containing water should be taken in account. The situation of the stress-strain state of the base is further complicated when we consider the degree of water-saturation of soil of the foundation ($0,8 < S_r \leq 1$). The aim of the study is to pose and solve problem of the stress-strain state of a water-saturated soil massif, including settlement and bearing capacity of a water-saturated base of a foundation of finite width, depending on the degree of water saturation of soils, taking into account the linear and nonlinear properties of the skeleton of soil and the compressibility of pore gas-containing water.

Materials and methods. Hencky's system of physical equations are used as a calculation model to describe the relationship between deformation and stresses of soil, which takes into account the influence of the average stress on the deformation and strength properties of the soil. This system allows us to represent the linear deformation of the soil as the sum of the volumetric and shear components of the soil of this deformation. In addition allows us too to determine the deformation of the layer of soil, as part of the compressible thickness of the base of foundation with finite width under conditions of free deformations.

Results. Depending on the linear and nonlinear deformation parameters, the settlement can be developed with a damped curve ($S - p$) and stabilize, and can be developed with a non-damped curve ($S - p$) and moved to the stage of progressive settlement.

Conclusions. Solutions have been made for cases when the water-saturation of the base soils changes in the range of 0.8 to 1.0. It is shown that the settlement and bearing capacity of a water-saturated base significantly depends on the degree of water saturation of soils.

KEYWORDS: settlement, bearing capacity, static impact, physical and mechanical properties, degree of water saturation, Hencky's equation, stress-strain state, influence assessment

FOR CITATION: Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Ahmad Othman. Settlement and bearing capacity of water-saturated soils of foundations of finite width under static impact. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):463-472. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.463-472 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Отличительная особенность водонасыщенной грунтовой среды заключается в том, что в ней под воздействием кратковременной статической, пульсирующей, динамической и сейсмических нагрузок неизбежно возникает избыточное по отношению к гидростатическому давлению в естественных условиях $\gamma_w z$ поровое давление [1–6]. Оно может составлять значительную часть приложенного общего σ^{tot} напряжения, которое, как известно, распределяется между скелетом и поровой водой $\sigma^{tot} = \sigma_s + u_w$, пропорционально соотношению их объемной сжимаемости k_s/k_w и их объема в единице объема V_s/V_w или n_s/n_w , причем $n_s + n_w = n$, где n — пористость грунта $n \leq 1$ [7–9]. Это обусловлено тем, что при кратковременном воздействии из водонасыщенного грунта не происходит отток воды, и следовательно, водонасыщенный грунт в этом промежутке находится в условиях закрытой системы, т.е. без дренажа (undrained) [10–11]. Физические и механические свойства водонасыщенного грунта отличаются от свойств грунта в воздушно-сухом состоянии или при степени водонасыщения $S_r = w/w_n < 0,8$ [12–13]. Величину степени водонасыщения определяют также, как отношение удельных весов минеральных частиц γ_s и поровой воды, т.е.

$$S_r = w(\rho_s/\rho_w). \quad (1)$$

Отличаются и механические свойства грунтов при $S_r < 0,8$ и $S_r \geq 0,8$, при этом существенно, так как $\epsilon_w = n\epsilon$ и $\sigma_{tot} = \sigma_s + \sigma_m$. Исходя из этих соотношений устанавливаются механические свойства грунта в целом с индексом u (undrained) [14–15].

Модуль объемной деформации грунта в целом зависит от модулей объемной сжимаемости скелета k_s и поровой воды k_w :

$$k_u = k_s + k_w/n. \quad (2)$$

Коэффициент Пуассона грунта определяется по формуле:

$$\nu_u = (k_u - 2G_s)/(2(k_u + G_s)). \quad (3)$$

Модуль объемной деформации поровой газосодержащей воды рассчитывается по Скемптону:

$$k_w = k_{wg}k_u/(S_r k_u + (1 - S_r)k_{wg}). \quad (4)$$

Коэффициент порового давления $\beta_0 = \Delta u_w/\Delta \sigma_{tot}$ вычисляется по формуле:

$$\beta_0 = K_w/(nK_s + K_w). \quad (5)$$

При действии на водонасыщенный массив местной нагрузки возникает неоднородное напряженно-деформированное состояние (НДС) и тогда:

$$u_w(x, y, z) = \beta_0 \sigma_m(x, y, z). \quad (6)$$

Изложенные выше параметры физических и механических свойств водонасыщенных грунтов при $S_r > 0,8$ представительного объема необходимы для количественной оценки НДС массива водонасыщенного грунта, взаимодействующего с подземными и надземными конструкциями, в том числе фундамента, свай, анкера, ограждений котлована и др. [16–19].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Связь между напряжениями и деформациями водонасыщенного грунта в представительном объеме

В линейной постановке. В этом случае следует использовать систему физических уравнений Гука, первая строчка из шести которой записывается в виде:

$$\epsilon_x = \sigma_x/E_u - \nu(\sigma_y + \sigma_z); \gamma_{xy} = \tau_{xy}/G, \quad (7)$$

где E_u и G — модули линейной и сдвиговой деформаций грунта в целом, причем $E_u = K_u(1 - 2\nu_u)$, или $K_u = E_u/(1 - 2\nu_u)$.

В нелинейной постановке. В таком варианте связи $(\epsilon - \sigma)$ и $(\gamma - \tau)$ для грунтовой среды целесообразным является использовать систему физических уравнений Генки¹, первая из шести строк которой в общем случае записывается в виде:

$$\epsilon_x = \chi_\gamma(\sigma_x - \sigma_m) + \chi_\epsilon \sigma_m; \gamma_{xy} = 2\chi_\gamma \tau_{xy}, \quad (8)$$

где

$$\chi_\gamma = \frac{\gamma_i}{2\tau_i} = \frac{f_\gamma(\epsilon_i, \sigma_{mi})}{2\tau_i};$$

$$\chi_\epsilon = \frac{\epsilon_m}{\sigma_m} = \frac{f_\epsilon(\sigma'_m, \tau_i, \mu_\sigma)}{\sigma'_m}, \quad (9)$$

где $\sigma'_m = \sigma_m \beta_0$, σ_m , ϵ_m — средние значения напряжений и деформаций, при этом $\epsilon_m = (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)/3$; $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$; γ_i , τ_i — интенсивности угловой

¹ Генки Г. Новая теория пластичности, упрочнения, ползучести и опыты над неупругими материалами // Теория пластичности. М.: Изд-во иностр. лит., 1948.

деформации и касательных напряжений соответственно; μ_σ — параметр Надаи – Лоде, $(-1 < \mu_\sigma < 1)$.

Отметим, что при линейной зависимости, когда $\gamma_i/\tau_i = 1/G$, $\varepsilon_m/\sigma_m = 1/K_u$ уравнения Генки (8) переходят в систему уравнений Гука (7).

Параметры этих кривых $k(\sigma_m)$, $G(\sigma_m)$, $v_u(\sigma_m)$ могут быть определены по результатам стандартных трехосных испытаний в условиях отсутствия дренажа (undrained) (рис. 1).

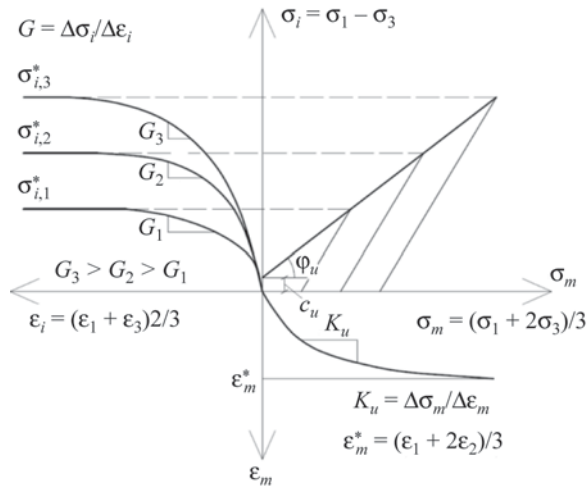


Рис. 1. Схематическое представление результатов стандартных трехосных испытаний грунтов при кинематическом режиме нагружения ($\dot{\varepsilon}_1 = \text{const}$) или ($\dot{\sigma}_1 = \text{const}$) по траектории раздавливания

Fig. 1. Schematic representation of the results of standard triaxial soil tests under a kinematic loading mode ($\dot{\varepsilon}_1 = \text{const}$) or ($\dot{\sigma}_1 = \text{const}$) along the path of crush

Из рис. 1 следует, что зависимости $\varepsilon_i - \sigma_i$ (верхняя левая четверть) и $\varepsilon_m - \sigma_m$ (нижняя правая четверть) отличаются по форме и по существу, так как с ростом $\sigma_i \rightarrow \sigma_i^*$, $\varepsilon_i \rightarrow \infty$, а при росте $\sigma_m \rightarrow \infty$, $\varepsilon_m \rightarrow \varepsilon_m^*$.

Расчетные модели грунтовой среды, принятые в настоящей статье

Использование системы уравнений Генки (8) предполагает, что зависимости $\chi_1 = \gamma_i/\tau_i$ и $\chi_2 = \varepsilon_m/\sigma_m$, полученные на основе анализа результатов трехосных испытаний (рис. 1), будут включены в систему (8). Они необходимы для решения краевых задач, в том числе для количественной оценки величин осадок и несущей способности фундаментов конечной ширины.

В качестве расчетной примем для описания сдвиговых деформаций грунтов со степенью водонасыщения $S_r < 0,8$, когда в грунте не возникает избыточное поровое давление. Как расчетное для описания упругопластических деформаций примем дробно-линейное уравнение Тимошенко², имеющее вид:

² Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.

$$\gamma_i = \frac{\tau_i}{G_0 \left(1 - \tau_i/\tau_i^*\right)}, \quad (10)$$

где G_0 — модуль сдвига при $\tau_i \rightarrow 0$; τ_i , τ_i^* — действующее и предельное значения интенсивности касательных напряжений, причем:

$$\tau_i^* = \sigma_m^{\text{tot}} \text{tg } \varphi_i + c_i, \quad (11)$$

где φ_i , c_i — параметры предельной прямой в координатах $\tau_i - \sigma_m$:

$$\sigma_m = \sigma_m^{\text{tot}} + \gamma z + \sigma_p, \quad (12)$$

где $\sigma_m^{\text{tot}} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$; σ_p — давление переуплотнения (POP — preconsolidation pressure), которое определяют по методу Казагранде в приборах компрессионного сжатия³. В качестве расчетной для описания нелинейной зависимости $\varepsilon_m - \sigma_m$ или $\chi_2(\varepsilon_m/\sigma_m)$ при $S_r < 0,8$ примем модель С.С. Григоряна, т.е. имеем:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_m^* [1 - \exp(-\alpha \sigma_m')], \quad (13)$$

где $\sigma_m' = \sigma_m(1 - \beta_0)$; α — параметр нелинейности.

Для грунтов с $S_r < 0,8$ расчетные модели $\chi(\gamma_i/\tau_i)$ и $\chi_2(\varepsilon_m/\sigma_m)$ можно получить из выражений (10) и (13), заменяя в них σ_m на $\sigma_m(1 - \beta_0)$, где β_0 — коэффициент порового давления (5).

На основании формул (10) и (13) можно определить величины секущих модулей, т.е. получаем:

$$G(\tau_i, \sigma_m) = G_0(1 - \tau_i/\tau_i^*), \quad (14)$$

$$K(\sigma_m) = \varepsilon_m^*/\sigma_m^* [1 - \exp(-\alpha \sigma_m')], \quad (15)$$

при $S_r > 0,8$, $\sigma_m' = \sigma_m(1 - \beta_0)$.

Из анализа выражений (14) и (15) следует, что при $\tau_i \rightarrow \tau_i^*$ $G(\tau_i, \sigma_m) \rightarrow 0$, при $\sigma_m \rightarrow \infty$ $\varepsilon_m \rightarrow \varepsilon_m^*$.

Подставляя эти значения $G(\tau_i, \sigma_m)$ и $K(\sigma_m)$ в уравнения Генки (8), получаем:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z - \sigma_m}{2G_0 \left(1 - \tau_i/\tau_i^*\right)} + \varepsilon_m^* (1 - e^{-\alpha \sigma_m'}). \quad (16)$$

Аналогичным образом можно записать выражения для ε_x , ε_y . Для определения осадки i -го слоя конечной толщины $h_i \approx h/4$ в составе сжимаемой толщи основания заменить $s_z = \varepsilon_z h_j$ для горизонтального перемещения слоя $s_x = \varepsilon_x h_j$.

НДС основания конечной ширины

На рис. 2 представлены изолинии $\sigma_z(z)$, $\sigma_m(z)$, σ_{zg} и $\sigma_{zg} - \sigma_m(z)$, построенные на основе формул Фламана⁴ (плоская задача), а также расчетная схема осадки фундамента конечной ширины. Приведем в первую

³ Casagrande A. The determination of pre-consolidation load and it's practical significance // Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Cambridge (Mass). 1936. Vol. 3.

⁴ Flamant A. On the pressure distribution in a rectangular solid transversely loaded // Comptes Rendus. 1892.

очередь формулы для выявления компонентов напряжений σ_x , σ_z , $\sigma_m(z)$ и $\sigma_z - \sigma_m(z)$. При действии нагрузки $p = \text{const}$ по полосе шириной $b = 2a$ на грунтовое полупространство (плоская задача) [20]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{p}{\pi} \left[\text{arctg} \frac{a-x}{z} + \text{arctg} \frac{a+x}{z} \right] + \frac{2apz(x^2 - z^2 - a^2)}{\pi \left[(x^2 + z^2 - a^2)^2 + 4a^2 z^2 \right]}; \\ \sigma_z &= \frac{p}{\pi} \left[\text{arctg} \frac{a-x}{z} + \text{arctg} \frac{a+x}{z} \right] - \frac{2apz(x^2 - z^2 - a^2)}{\pi \left[(x^2 + z^2 - a^2)^2 + 4a^2 z^2 \right]}; \\ \sigma_m &= \frac{2p(1+\nu)}{3\pi} \left[\text{arctg} \frac{a-x}{z} + \text{arctg} \frac{a+x}{z} \right]; \\ \sigma_z - \sigma_m &= \frac{2p}{\pi} \left(\frac{az}{a^2 + z^2} + \frac{1-2\nu}{3} \text{arctg} \frac{z}{a} \right) + \gamma_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

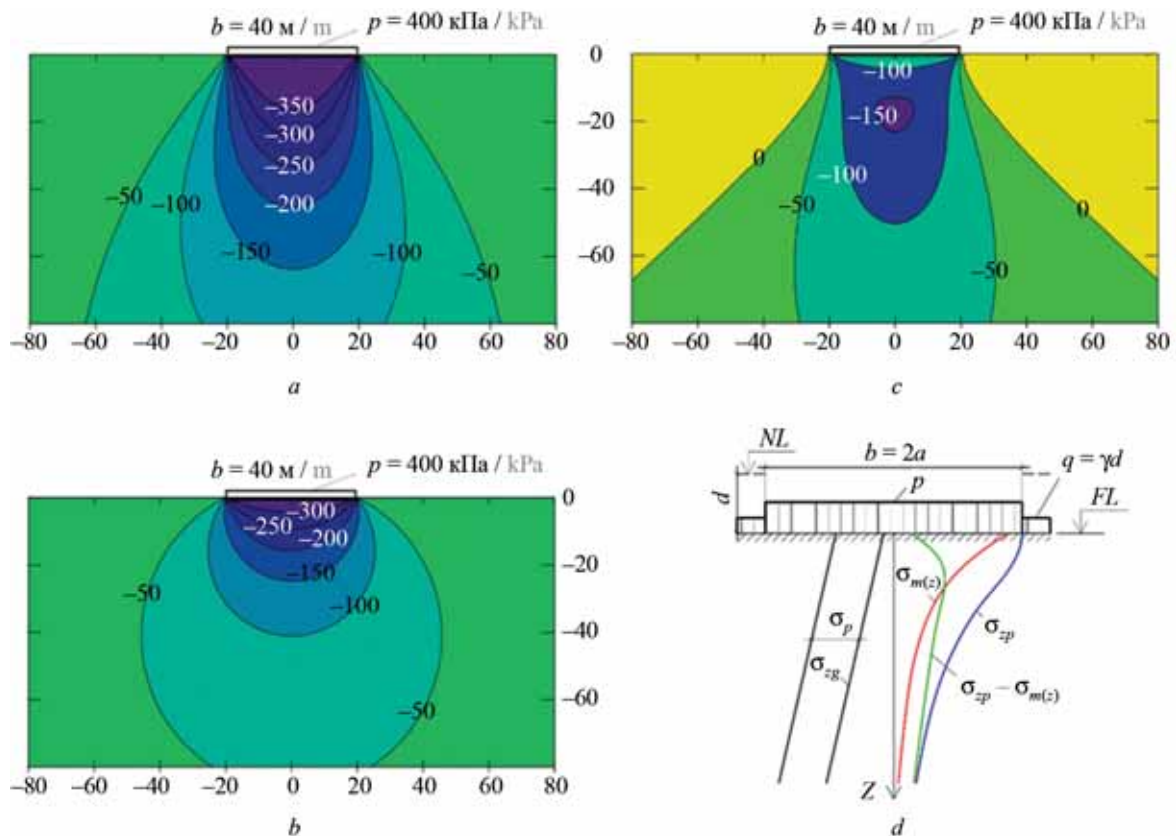


Рис. 2. Изолинии напряжений σ_z (a); σ_m (b); $\sigma_z - \sigma_m$ (c) (при $a = 20$ м; $p = 400$ кПа), и расчетная схема для определения сдвиговых и объемных деформаций грунтового основания (d)

Fig. 2. Isolines of stresses σ_z (a); σ_m (b); $\sigma_z - \sigma_m$ (c) (at $a = 20$ м; $p = 400$ kPa), and the calculation scheme for determining the shear and volumetric deformations of the soil base (d)

Прогноз осадки линейно-деформируемого основания на основе уравнений Генки

В простейшем случае линейной зависимости между напряжениями и деформациями с параметрами среды G и K осадку можно определить аналитическим решением для оси $z(x = 0)$. Тогда можем записать:

$$S = \int_0^{h_a} \frac{\sigma_m}{K} dz + \int_0^{h_a} \frac{\sigma_z - \sigma_m}{2G} dz, \quad (18)$$

где h_a — мощность сжимаемой толщи; σ_z и σ_m определяются по выражению (17) соответственно.

Напряжения σ_m и $\sigma_z - \sigma_m$ на оси $z(x = 0)$ изменяются с глубиной в соответствии с формулой (17).

Подставляя σ_m в первый интеграл (18), получаем осадку основания в пределах h_a от объемной составляющей линейной деформации $\varepsilon_{z,v}$:

$$S_v = \frac{4p(1+\nu)}{3\pi k_w} \left[h_a \operatorname{arctg} \frac{h_a}{a} + \frac{a}{2} \ln \frac{a^2 + h_a^2}{a^2} \right]. \quad (19)$$

Осадка основания от сдвиговой составляющей линейной деформации $\varepsilon_{z,\gamma}$ в пределах h_a после подстановки во второй интеграл (18) $\sigma_z - \sigma_m$ по формуле (17) составит:

$$S_\gamma = \frac{p}{3\pi G} \left[(1-2\nu) h_a \operatorname{arctg} \frac{h_a}{a} + (2-\nu) a \ln \frac{a^2 + h_a^2}{a^2} \right]. \quad (20)$$

Избыточное поровое давление в водонасыщенном основании в любой точке $m(x, z)$ можно определить по формуле:

$$u_w(x, z) = \beta_0 \sigma_m(x, z). \quad (21)$$

Рассмотрим пример. Даны: $a = 2$ м; $h = 12$ м; $\nu = 0,33$; $k_s = 40\,000$ кПа; $p = 400$ кПа; $G = 5113$ кПа. Получены: $S_v = 2,18$ см; $S_\gamma = 21,05$ см. Отсюда следует, что $S_\gamma > S_v$ и $S_\gamma/S_v \approx 10$.

На рис. 3 построены графики $S_\gamma - p$, $S_v - p$ и $u_w(p)$ для точки на глубине $z = b$, полагая, что $k_w = f(S_r)$, $k_w = (1) > k_w = (2) > k_w = (3), \dots$

Начальная p^* и предельная p^{} критическая нагрузка на водонасыщенное основание (рис. 4)**

Начальную критическую нагрузку на водонасыщенное основание можно определить по формуле З.Г. Тер-Мартirosяна [21], которая имеет вид:

$$p^* = \frac{\pi(\gamma'Z_{\max} + \gamma'd + c \operatorname{ctg} \varphi)}{\sin \alpha^* / \sin \alpha - B\alpha^*}, \quad (22)$$

где

$$\alpha^* = \arccos(B \sin \alpha);$$

$$B = 1 - \beta_0(1 + \nu_u)/3. \quad (23)$$

Выражение (22) в частном случае, когда $S_r < 0,8$, $\beta_0 = 0$, $B = 1$, совпадает с решением Пузыревского⁵. В случае полного водонасыщения при $\beta_0 = 1$, $B = 0,5$, $\nu_u = 0,5$, p^* имеет линейное значение.

Предельное значение несущей способности (рис. 4) можно определить по формуле Прандтля (1920), которая имеет вид:

$$p^{**} = (q + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi) \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{\pi \operatorname{tg} \varphi} - c \cdot \operatorname{ctg} \varphi. \quad (24)$$

Сравнения p^* при $S_r < 0,8$ и $S_r = 1$ при $b = 2,0$ м, $c = 0,1$ МПа, $Z_{\max} = 0$, $\varphi = 30^\circ$ позволяют получить, что $p^* = 10,2$ МПа и $p^* = 5,64$ МПа. Это означает, что начальная критическая нагрузка в полностью водонасыщенном грунте в два раза меньше, чем при водонасыщенном основании при $S_r < 0,8$, т.е. когда $\beta_0 = 0$.

Аналогичная ситуация возникает при установлении предельной нагрузки по Прандтлю, если в выражение (24) вместо φ и c подставить φ_u и c_u , из которых определяются результаты неконсолидированно-недренированных испытаний (НН).

⁵ Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: учебное пособие для строительных вузов. М.: Высш. школа, 1978. 447 с.

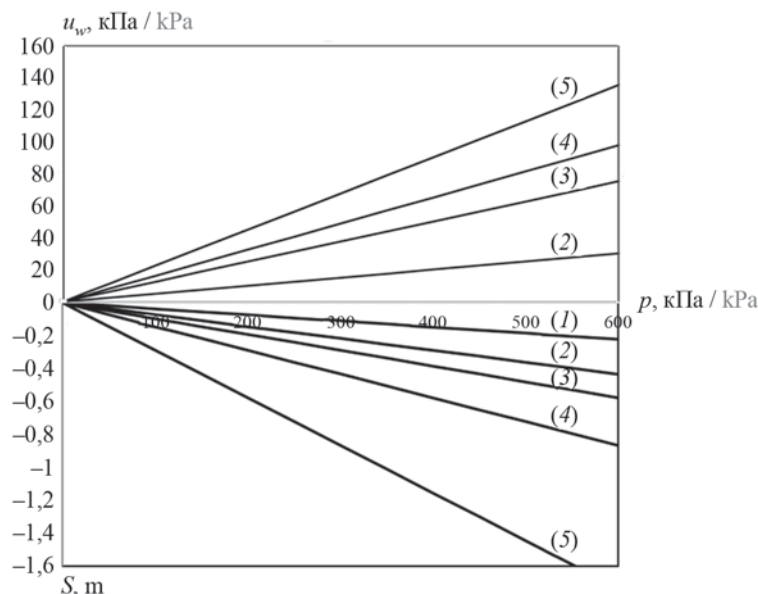


Рис. 3. Графики $(S_\gamma - p)$ — (1), $(S_v - p)$ — (2–5) при разных $k_w - k_w(2) > k_w(3) > k_w(4) > k_w(5)$, и зависимости $u_w(p, S_r)$, верхняя часть графика при $S_r(2) < S_r(3) < S_r(4) < S_r(5)$, рассчитанные по формулам (18)–(21)

Fig. 3. Diagrams $(S_\gamma - p)$ — (1), $(S_v - p)$ — (2–5), for different $k_w - k_w(2) > k_w(3) > k_w(4) > k_w(5)$, and dependences $u_w(p, S_r)$, the upper part of the diagram for $S_r(2) < S_r(3) < S_r(4) < S_r(5)$, calculated by formulas (18)–(21)

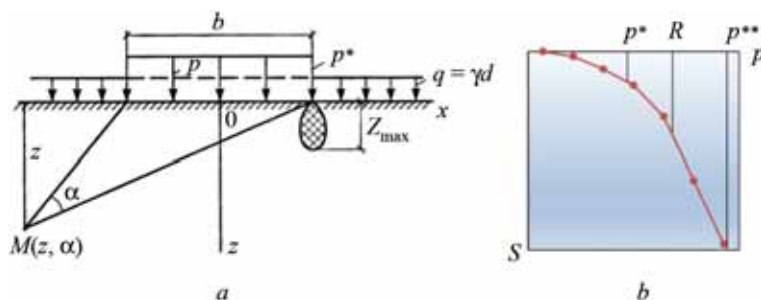


Рис. 4. Схематическое представление расчета $p^*(u)$, $p^{**}(u)$ и место R в кривой зависимости, $S - p(p^* < R < p^{**})$, где R — расчетное сопротивление грунта по СП⁶ (a); кривая $S - p$, рассчитанная по модели Кулона – Мора (b)

Fig. 4. Schematic representation of the calculation $p^*(u)$, $p^{**}(u)$, and place of R in the dependence curve, $S - p(p^* < R < p^{**})$, where R — the calculated soil resistance according to SP⁶ (a); calculated curve $S - p$ by the Coulomb – Mohr model (b)

⁶ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Осадка и несущая способность водонасыщенного основания фундамента конечной ширины

Из приведенных выше формул (16) следует, что осадку j -го слоя конечной высоты h_j в составе сжимаемой толщи основания (рис. 4) можно определить по формуле:

$$S_i = \left\{ \frac{\sigma_{z,j} - \sigma_{m,j}}{2G_{0,j} \left(1 - \tau_{i,j} / \tau_{i,j}^* \right)} + \varepsilon_{m,j}^* \left(1 - e^{-\alpha \sigma_{m,j}'} \right) \right\} h_j, \quad (25)$$

где $\tau_{i,j}^* = \sigma_{m,j}' \tan \phi + c$, $\sigma_{m,j}' = \sigma_{0,j} m_j$ и

$$S_j = S_j(\gamma) + S_j(\varepsilon), \quad (26)$$

$$S = \sum_{j=1}^{i=n} S_j. \quad (27)$$

На рис. 5 представлена схема осадки основания фундаментов конечной ширины методом суммирования осадок элементарных слоев $S_j'(h_j)$ и на рис. 6 зависимой $S_j(\gamma) - \sigma_{z,j}$ и $S_j(\varepsilon) - \sigma_{z,j}$, а также S_j .

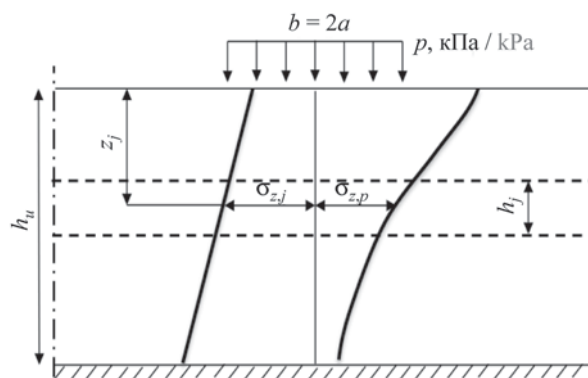


Рис. 5. Расчетная схема осадки основания фундаментов конечной ширины методом суммирования осадок элементарных слоев $S_j'(h_j)$ на основе модели Генки; нижняя граница сжимаемой толщи (НГСТ) рассчитывается по условиям СП $\sigma_{z\gamma} = 2\sigma_{zp}$

Fig. 5. Calculation diagram of the settlement of the foundation of finite width by the method of summation of the settlement of elementary layers $S_j'(h_j)$ based on the Genki model; NGST — the lower limit of the compressible layer is determined according to the conditions of SP $\sigma_{z\gamma} = 2\sigma_{zp}$

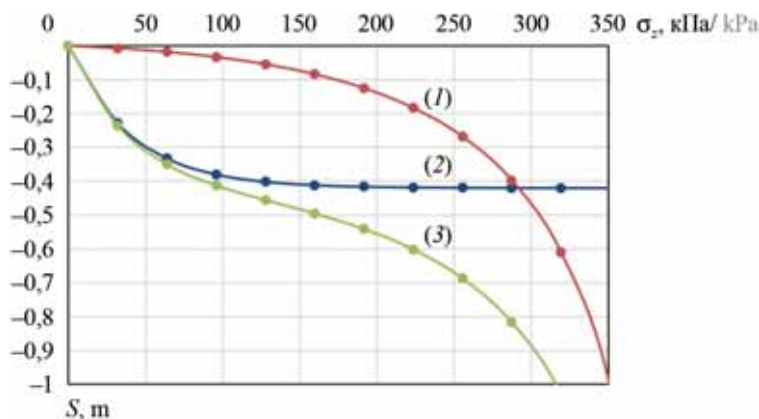


Рис. 6. Графики зависимости $S_j(\gamma)$ — 1, $S_j(\varepsilon)$ — 2 и $S_j = S_j(\gamma) + S_j(\varepsilon)$ — 3, рассчитанные по формулам (25) при $S_r < 0,8$

Fig. 6. Dependence plots $S_j(\gamma)$ — 1, $S_j(\varepsilon)$ — 2 and $S_j = S_j(\gamma) + S_j(\varepsilon)$ — 3, calculated by formulas (25) at $S_r < 0,8$

Ниже приводятся результаты расчета осадки водонасыщенного основания (рис. 7) при одинаковых параметрах деформируемости скелета грунта (G^e , v^e , c и ϕ , α и ϵ_m^*).

Отметим, что результаты расчета кривых осадка – нагрузка $S-p$ в упругопластической постановке (модель Кулона – Мора), рассчитанные при разных параметрах деформируемости и прочности, приведены в работе [21]. Вид этих кривых подобен кривым, полученным на основе модели Генки и при нелинейных объемных и сдвиговых деформациях (рис. 7). На рис. 8 показаны зависимости $S-p$, полученные различными методами (LE — Linear lastic, MC — Mohr-Coloumb, HS — hardening soil и UBC3D-PLM).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Осадка и несущая способность оснований фундаментов конечной ширины являются основными

расчетными параметрами при проектировании оснований зданий и сооружений.

Расчеты показывают, что на величины этих параметров (осадка и несущая способность), а также на вид кривой осадка – нагрузка $S-p$ существенное влияние оказывают геомеханическая модель основания, в том числе ее размеры (ширина, глубина, начальные и граничные условия), а также расчетные модели грунтовой среды (линейная, нелинейная и реологическая) и тип системы физических уравнений (Гука или Генки).

На точность и достоверность прогноза осадки и несущей способности основания фундамента конечной ширины влияют также отношение ширины фундамента b к размерам расчетной области (длина, ширина), т.е. b/H , особенно в методе оценки МКЭ (Plaxis и др.).

Используемая в настоящей работе расчетная модель с возможностью горизонтальных деформаций

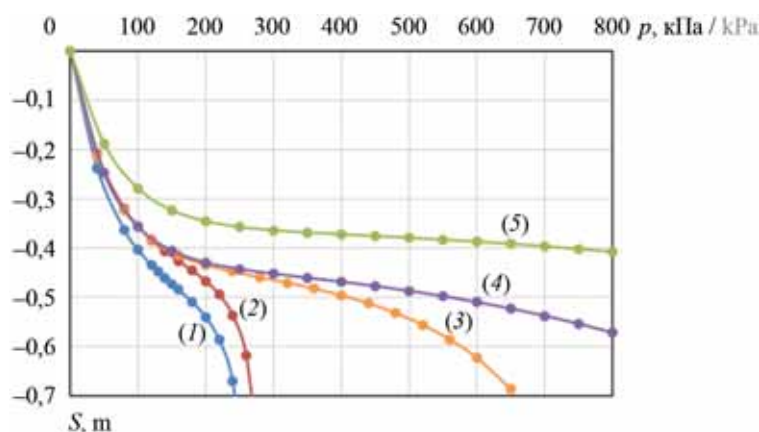


Рис. 7. Графики зависимости $S-p$ полученные по формулам (25) и (26) при одинаковых значениях параметров деформируемости скелета грунта (G^e , v^e , c и ϕ , α и ϵ_m^*)

Fig. 7. Dependence plots $S-p$, obtained by formula (25) and (26) at the same values of the parameters of the deformability of the soil skeleton (G^e , v^e , c and ϕ , α and ϵ_m^*)

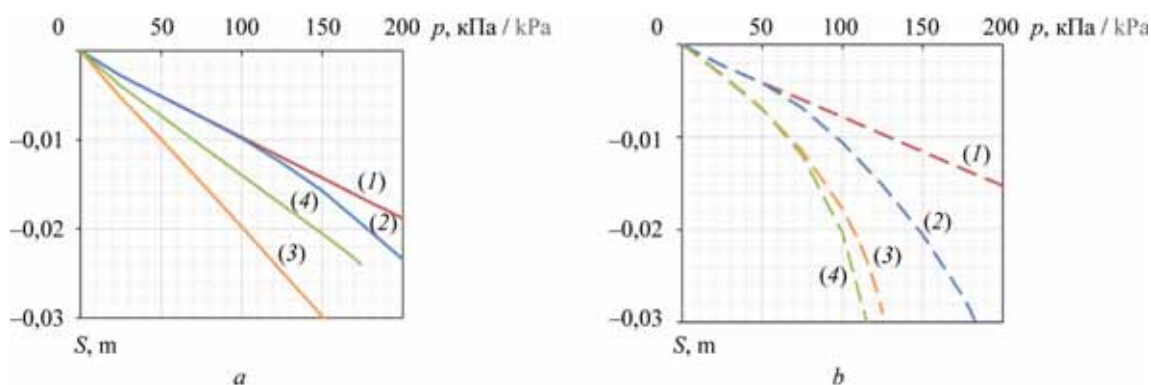


Рис. 8. Графики зависимости $S-p$, полученные при $S_r = 0,8$ — (a) и $S_r = 0,9999$ — (b) по методам LE — 1, MC — 2, HS — 3, UBC3D — 4

Fig. 8. Dependence plots $S-p$, obtained at $S_r = 0,8$ — (a) and $S_r = 0,9999$ — (b) by methods LE — 1, MC — 2, HS — 3, UBC3D — 4

слоев $\varepsilon_x \neq 0$ наряду с упругопластической моделью при сдвиге и нелинейной модели при объемной деформации грунта в составе физических уравнений Генки позволила линейную деформацию грунта $\varepsilon(\sigma, \tau)$ представить в виде суммы объемной и сдвиговой составляющих этой линейной деформации $\varepsilon_z = \varepsilon_z^e + \varepsilon_z^p$. Только в этом случае кривая деформации – напряжения $\varepsilon_z - \sigma_z$ может развиваться как по затухающей, так и по незатухающей (двойная кривизна) траектории.

Расчетная модель осадки основания при ограничении горизонтальных перемещений $\varepsilon_z - \sigma_z$ неиз-

бежно приводит к затухающей деформации с ростом σ_z при любой модели грунта.

Расчеты осадок основания, приведенные в данной статье, на основе моделей Генки – Тимошенко – Григорян с учетом расчетных параметров деформируемости $K, G^e, \varepsilon^*, \alpha$ и при прочности ϕ и c , входящих в эти модели, показали, что при подборе разной комбинации данных параметров кривая осадка – нагрузка $S - p$ может иметь затухающий и незатухающий с ростом p характер, в том числе, в виде кривой с двойной кривизной. Такой результат в прикладной механике грунтов получен впервые.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хасанов Р.Р., Галеев Р.Р. Влияние режима сочетания циклического и статического нагружений на деформации и физико-механические характеристики водонасыщенных суглинистых грунтов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4 (50). С. 263–270.
2. Bensoula M., Missoum H., Bendani K. Liquefaction potential sand-silt mixtures under static loading // Revista de la construcción. 2018. Pp. 196–208. DOI: 10.7764/RDLC.17.2.196
3. Dutta T.T., Saride S., Jallu M. Effect of saturation on dynamic properties of compacted clay in a resonant column test // Geomechanics and Geoengineering. 2017. Vol. 12. Issue 3. Pp. 181–190. DOI: 10.1080/17486025.2016.1208849
4. Zhao H.Y., Indraratna B., Ngo T. Numerical simulation of the effect of moving loads on saturated subgrade soil // Computers and Geotechnics. 2021. Vol. 131. P. 103930. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103930
5. Орехов В.В. Расчет взаимодействия сооружений и водонасыщенных грунтовых оснований при статических и сейсмических воздействиях // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 2. С. 8–12.
6. Zeybek A., Madabhushi S.P.G. Simplified Procedure for Prediction of Earthquake-Induced Settlements in Partially Saturated Soils // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2019. Vol. 145. Issue 11. P. 04019100. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002173
7. Тер-Мартirosян З.Г., Нгуен Хуи Хуен. Влияние степени водонасыщения глинистого грунта на его напряженно-деформированное состояние // Вестник МГСУ. 2012. № 8. С. 112–120. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.8.112-120
8. Кузнецова А.С., Пономарев А.Б. Лабораторные исследования прочностных характеристик фиброармированного песка различной степени водонасыщения // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 6 (47). С. 127–132.
9. Мащенко А.В., Пономарев А.Б., Моисеева Ю.Ю. Анализ изменения деформационных свойств глинистого грунта, армированного геосинтетическими материалами при разном показателе текучести // Транспорт. Транспортные Сооружения. Экология. 2014. № 3. С. 106–118.
10. Файзиев Х., Байматов Ш.Х., Рахимов Ш.А. К расчету неустановившейся фильтрации в анизотропных грунтовых плотинах без дренажа // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке : сб. ст. по мат. XXXII–XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 32–37.
11. Jahromi S.G., Gutierrez M. Estimation of liquefaction from case histories // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 134–141. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.10.134-141
12. Смолин Ю.П., Караулов А.М., Востриков К.В. Решение задачи об определении осадки водонасыщенного анизотропного грунта, уплотняемого в условиях компрессии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 6 (702). С. 113–121.
13. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Сидоров В.В. Опыт преобразования слабых водонасыщенных грунтов сваями конечной жесткости // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 3 (114). С. 271–281. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3.271-281
14. Ощепкова И.А., Сычкина Е.Н. Анализ влияния степени водонасыщенности на деформационные характеристики полускальных грунтов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. 2012. № 2 (6). С. 8–16.
15. Jafarzadeh F., Ahmadinezhad A., Sadeghi H. Effects of initial suction and degree of saturation on dynamic properties of sand at large strain // Scientia Iranica. 2021. Vol. 28. Issue 1. Pp. 156–174. DOI: 10.24200/sci.2019.51796.2452
16. Vernay M., Morvan M., Breul P. Evaluation of the degree of saturation using Skempton coefficient B // Geomechanics and Geoengineering. 2020. Vol. 15. Issue 2. Pp. 79–89. DOI: 10.1080/17486025.2019.1620349

17. Kherat C. Effect of oil-contamination and water saturation on the bearing capacity and shear strength parameters of silty sandy soil // *Engineering Geology*. 2019. Vol. 257. P. 105138. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.05.015

18. Minaeian V., Dewhurst D. N., Rasouli V. Deformational behaviour of a clay-rich shale with variable water saturation under true triaxial stress conditions // *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2017. Vol. 11. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.gete.2017.04.001

19. Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г., Чинь Туан Вьет, Лузин И.Н. Осадка и несущая способность длинной сваи // *Вестник МГСУ*. 2015. № 5. С. 52–60. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.5.52-61

20. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Курилин Н.О. Осадка и несущая способность оснований фундаментов конечной ширины. // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2021. № 1. С. 8–13. URL: <https://ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/6839>

21. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З. *Механика грунтов*. М. : Изд-во АСВ, 2020. 912 с.

Поступила в редакцию 9 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 5 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 12 апреля 2021 г.

О Б АВТОРАХ: Завен Григорьевич Тер-Мартirosян — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; **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: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; ter-martirosyanzg@mgsu.ru;

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

Ахмад Осман — аспирант кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5017-7512, Scopus: 57209307846, ResearcherID: AAK-5389-2021, ORCID: 0000-0002-1089-199X; othman.ahmd@yandex.ru.

REFERENCES

1. Khasanov R.R., Galeev R.R. The influence of the combination of cyclic and static loading on deformations and physico-mechanical characteristics of water-saturated loamy soils. *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019; 4(50):263-270. (rus.).

2. Bensoula M., Missoum H., Bendani K. Liquefaction potential sand-silt mixtures under static loading. *Revista de la construcción*. 2018; 196-208. DOI: 10.7764/RDLC.17.2.196

3. Dutta T.T., Saride S., Jallu M. Effect of saturation on dynamic properties of compacted clay in a resonant column test. *Geomechanics and Geoengineering*. 2017; 12(3):181-190. DOI: 10.1080/17486025.2016.1208849

4. Zhao H.Y., Indraratna B., Ngo T. Numerical simulation of the effect of moving loads on saturated subgrade soil. *Computers and Geotechnics*. 2021; 131:103930. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103930

5. Orekhov V.V. Analysis of interaction between structures and saturated soil beds subject to static and seismic effects. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015; 2:8-12. (rus.).

6. Zeybek A., Madabhushi S.P.G. Simplified Procedure for Prediction of Earthquake-Induced Settlements in Partially Saturated Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2019; 145(11):04019100. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002173

7. Ter-Martirosyan Z.G., Nguyen Huy Hiep. Influence of the Saturation Percentage of the Clay-Bearing Soil on Its Stress-Strain State. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 8:112-120. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.8.112-120. (rus.).

8. Kuznetsova A.S., Ponomaryov A.B. Laboratory testing of the strength characteristics of fiber reinforced sand with various water saturations. *Bulletin of Civil Engineers*. 2014; 6(47):127-132. (rus.).

9. Mashchenko A.V., Ponomarev A.B., Moiseva Iu.Iu. Analysis of change in deformation properties of clay soil geosynthetic reinforced materials with different flow index. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2014; 3:106-118. (rus.).

10. Fayziyev Kh., Baymatov Sh.Kh., Rakhimov Sh.A. To the calculation of transient filtration in

anisotropic earth dams without drainage. *Experimental and theoretical research in modern science: a collection of articles based on the materials of the XXXII-XXXIII international scientific and practical conference*. 2019; 32-37. (rus.).

11. Jahromi S.G., Gutierrez M. Estimation of Liquefaction from Case Histories. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 10:134-141. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.10.134-141

12. Smolin J.P., Karaulov A.M., Vostrikov K.V. Consolidation process of saturated anisotropic clay soil during odometric testing. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2017; 6(702):113-121. (rus.).

13. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Sidorov V.V. Experience of transformation of weak water-saturated soils using piles of finite stiffness. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(3):(114):271-281. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3.271-28.1. (rus.).

14. Oshchepkova I., Sychkina E. The analysis of influence water saturation to deformation parameters of semi-rocks. *Proceedings of the Perm National Research Polytechnic University*. 2012; 2(6):8-16. (rus.).

15. Jafarzadeh F., Ahmadinezhad A., Sadeghi H. Effects of initial suction and degree of saturation on dy-

namic properties of sand at large strain. *Scientia Iranica*. 2021; 281:156-174. DOI: 10.24200/sci.2019.51796.2452

16. Vernay M., Morvan M., Breul P. Evaluation of the degree of saturation using Skempton coefficient B. *Geomechanics and Geoengineering*. 2020; 15(2):79-89. DOI: 10.1080/17486025.2019.1620349

17. Kererat C. Effect of oil-contamination and water saturation on the bearing capacity and shear strength parameters of silty sandy soil. *Engineering Geology*. 2019; 257:105138. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.05.015

18. Minaeian V., Dewhurst D. N., Rasouli V. Deformational behaviour of a clay-rich shale with variable water saturation under true triaxial stress conditions. *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2017; 11:1-13. DOI: 10.1016/j.gete.2017.04.001

19. Ter-Martirosyan A.Z., Ter-Martirosyan Z.G., Trinh Tuan Viet, Luzin I.N. Settlement and Bearing Capacity of Long Pile. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 5:52-60. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.5.52-61 (rus.).

20. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Kurilin N.O. Settlement and bearing capacity of foundations of finite width. Bases, foundations and soil mechanics. 2021; 1:8-13. URL: <https://ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/6839>. (In Russian).

21. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z. *Soil mechanics*. Moscow, ASV, 2020; 912. (rus.).

Received March 9, 2021.

Adopted in revised form on April 5, 2021.

Approved for publication on April 12, 2021.

BIONOTES: **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: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; ter-martirosyanzg@mgau.ru;

Armen Z. Ter-Martirosyan — Doctor of Technical Sciences, Professor, Acting Director of the Institute of Construction and Architecture, Head of Research and Educational Center “Geotechnics”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9467-5034, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X; gic-mgsu@mail.ru;

Ahmad Othman — postgraduate 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: 5017-7512, Scopus: 57209307846, ResearcherID: AAK-5389-2021, ORCID: 0000-0002-1089-199X; othman.ahmd@yandex.ru.

Верификация численной гидродинамической модели Кольского залива

А.С. Аншаков, И.Г. Кантаржи

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена верификация ветровых полей из данных реанализа NCEP/CFSR и модели расчета полей прибрежных течений COASTOX, входящей в состав гидродинамической модели течений и ветровых волн Кольского залива.

Материалы и методы. Сопоставление результатов расчетов с показателями измерений проводилось с помощью как графического сравнения кривых временных разверток анализируемых параметров, так и с помощью статистической обработки, с построением регрессионных связей между измеренными и рассчитанными характеристиками ветра и течений.

Результаты. Выполнена оценка корректности результатов, получаемых при расчетах с помощью численных моделей. Для верификации полей ветра из реанализа NCEP/CFSR было проведено их сопоставление с данными измерения ветра от ГМС «Мурманск», «Полярное» и «Териберка». Были получены высокие значения коэффициента корреляции, которые подтверждают обоснованность использования данных реанализа NCEP/CFSR в качестве входных данных гидродинамической модели. Для сравнения с наблюдениями в модели COASTOX выполнено моделирование течений в Кольском заливе под действием приливных сил и атмосферного воздействия за период 195 дней, с 1.08.2015 по 11.02.2016. Результаты демонстрируют, что модель течений адекватно воспроизводит реверсивный характер течений в среднем колене Кольского залива и достаточно точно предсказывает изменение уровня моря.

Выводы. Исследование показало, что гидродинамическая модель Кольского залива позволяет решать задачи достоверного прогноза режима волн и течений при проектировании портовых сооружений. Измеренные скорости течения на различных уровнях на измерительной станции проинтегрированы по глубине для сравнения со средней по глубине скоростью течений, рассчитываемой двумерной моделью COASTOX. В ходе сравнения установлено хорошее совпадение по фазе рассчитанных колебаний скорости с измеренными значениями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, верификация модели, реанализ метеополей, поля ветра, поля течений, регрессионный анализ

Благодарности. Работа инициирована в рамках гранта Президента Российской Федерации (МК-3792.2021.4).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Аншаков А.С., Кантаржи И.Г. Верификация численной гидродинамической модели Кольского залива // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 4. С. 473–485. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.473-485

Verification of the numerical hydrodynamic model of the Kola bay

Alexander S. Anshakov, Izmail G. Kantarzhi

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

ABSTRACT

Introduction. This manuscript discusses the verification of wind fields from the NCEP-CFSR reanalysis data and the COASTOX model for calculating the fields of coastal currents, which is part of the hydrodynamic model of currents and wind waves in the Kola Bay.

Materials and methods. The comparison of the calculation results with the measurement data was carried out based on both a graphical comparison of the time curves of the analyzed parameters, and in the form of statistical processing results, with the construction of regression relationships between the measured and calculated wind and current characteristics.

Results. The correctness of the results obtained in the calculations using numerical models has been evaluated. To verify the wind fields from the NCEP-CFSR reanalysis, they were compared with the wind measurement data obtained from the HMS Murmansk, Polyarnoe, and Teriberka. High values of the correlation coefficient were obtained, which confirm the validity of using the NCEP-CFSR reanalysis data as the input data of the hydrodynamic model. For comparison with observations, the COASTOX model simulated currents in the Kola Bay under the influence of tidal forces and atmospheric forcing for a period of 195 days, from August 1, 2015 to February 11, 2016. The results obtained demonstrate that the current model correctly reproduces the reversal character currents in the middle knee of the Kola Bay and predicts changes in sea level quite accurately.

Conclusions. The study shows that the hydrodynamic model of the Kola Bay solves the problem of a reliable forecast of the wave and current regime in the design of port facilities.

KEYWORDS: numerical modeling, model verification, reanalysis of meteorological fields, wind fields, current fields, regression analysis

Acknowledgements: This study was initiated in the framework of the grant of the President of the Russian Federation (МК-3792.2021.4).

FOR CITATION: Anshakov A.S., Kantarzi I.G. Verification of the numerical hydrodynamic model of the Kola bay. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):473-485. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.473-485 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Гидродинамическая численная модель течений и ветровых волн Кольского залива Баренцева моря, состоящая из цепочки моделей, предназначена для моделирования режимов волн, течений и изменений уровня при различных синоптических ситуациях и конфигурациях проектируемых портовых сооружений. Данная модель была разработана для проектирования сооружений Центра строительства крупнотоннажных морских сооружений (ЦСКМС), расположенного в районе с. Белокаменка (Мурманская область).

Гидродинамическая модель волн, течений и уровней состоит из модели двумерного моделирования морских течений — COASTOX [1], а также моделей с открытым исходным кодом: спектральных моделей генерации и преобразования полей ветровых волн, SWAN¹ [2] и WaveWatch III [3], модели расчета дифрагированных волновых полей в акватории морского порта, ARTEMIS² [4–6]. Такая цепочка моделей использовалась авторами в ряде других проектов: морской порт Геленджик [7], терминал Сабетта-Утрений [8] и сухогрузный район порта Тамань [9].

Модель WaveWatch III применялась для моделирования процессов формирования и трансформации ветровых волн в глубоководной зоне Баренцева моря, а затем эти сведения передавались в модель SWAN, подходящую для моделирования таких процессов в прибрежной зоне моря. В качестве исходных данных для этих моделей задавались поля ветра над морем на основе полей метеозадаваемых из реанализа метеополей NCEP-CFSR³ [10–12]. Выбор параметров численных моделей обусловлен тем, что они могут быть третируются для использования в других моделях, которые также реализованы на нерегулярных расчетных сетках. В разработанной гидродинамической модели волн, течений и уровней выполнялась передача показателей из модели SWAN в модель расчета прибрежных течений COASTOX.

¹ SWAN team. Swan cycle III version 41.10AB. Scientific and Technical documentation. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences. 2017.

² Open TELEMAC-MASCARET. Artemis_documentation_6.2, Validation case studies 1–10. 2017. URL: <http://www.opentelemac.org/index.php/manuals/summary/9-artemis/148-artemisdocumentation-6-2>

³ CFSR ds093.1. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Selected Hourly Time-Series Products. URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/#!description>

В настоящей статье обсуждается верификация ветровых полей из данных реанализа NCEP/CFSR и модели расчета полей прибрежных течений COASTOX. Верификация моделей SWAN и ARTEMIS в исследовании не рассматривалась, однако эти модели успешно применяются в ряде инженерных проектов. В международной практике подобные модели используются для оценок потенциала волновой энергии [13–15], штормовых нагонов [16–19], волновых условий при входе в порт [20, 21] или дельту реки [22]. В работах [23–27] приведены результаты оценки их эффективности для различных систем реанализа климатических прогнозов. Некоторые итоги использования моделей SWAN и ARTEMIS для проектирования ЦСКМС изложены в труде [28].

Сопоставление результатов расчетов с данными измерений проводилось с помощью как графического сравнения кривых временных разверток анализируемых параметров, так и статистической обработки, с построением регрессионных связей между измеренными и рассчитанными характеристиками ветра и течений. Цель работы — оценка корректности результатов, получаемых при гидротехнических расчетах с использованием численных моделей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район строительства ЦСКМС находится в средней части Кольского залива (рис. 1). Натурные наблюдения силы ветра в районе не проводились. Ближайшие гидрометеостанции (ГМС) расположены на побережье залива на значительном удалении от площадки проектирования (рис. 1). ГМС «Полярное» на Екатерининском острове, северное колено залива, устроено на расстоянии 18,2 км. ГМС «Мурманск» в г. Мурманск, южное колено залива, — на расстоянии 14,8 км.

В данном исследовании была использована информация реанализа Национального центра прогноза окружающей среды США NCEP/CFSR (CFSR ds093.1) по скорости ветра на высоте 10 м над земной поверхностью с часовым разрешением, на прямоугольной пространственной сетке с шагом приблизительно 0,312 градуса по широте и 0,312 градуса по долготе.

Реанализ CFSR ассимилирует показатели измерений наземных станций, метеозондов, измерительных приборов, установленных на самолетах, и спутниковые наблюдения. Сведения CFSR в целом хорошо согласуются с наблюдаемыми атмосферными величинами для различных регионов земного шара, поэтому они широко применяются для моделирования ветровых волн и океанической циркуляции. В на-

шем исследовании выбран временной интервал 1980–2010 гг.

Использовался именно этот интервал, а не более близкий к настоящему периоду, для которого есть, например, данные прогноза NCEP CFSv2 (CFSv2 ds094.1)⁴, являющегося продолжением CFSR по двум

⁴ CFSv2 ds094.1. NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) Selected Hourly Time-Series Products. <https://rda.ucar.edu/datasets/ds094.1/#!description>

причинам. Первая — это то, что предпочтительно использовать одни сведения для всего 30-летнего ряда. Вторая — ветры на побережье Кольского п-ова и над Кольским заливом с 2010 г. не усиливаются и даже несколько уменьшаются, что видно по трендам среднегодовой силы ветра на ГМС «Териберка», «Полярное» и «Мурманск» (рис. 2). Так что использование данных за 1980–2010 гг., а не за 1987–2017 гг., не приведет к занижению экстремальных ветров. Для расчета течений в Кольском заливе на акватории



Рис. 1. Спутниковый снимок Кольского залива, демонстрирующий положение ЦСКМС. Границы ЦСКМС показаны красным цветом. Желтыми кружками отмечены позиции ГМС. Проекция UTM36, EPSG: 32636

Fig. 1. Satellite image of the Kola Bay showing the position of the CCLMS. The boundaries of the CCLMS are shown in red. Yellow circles mark the positions of the hydrometeorological stations. UTM36 projection, EPSG: 32636

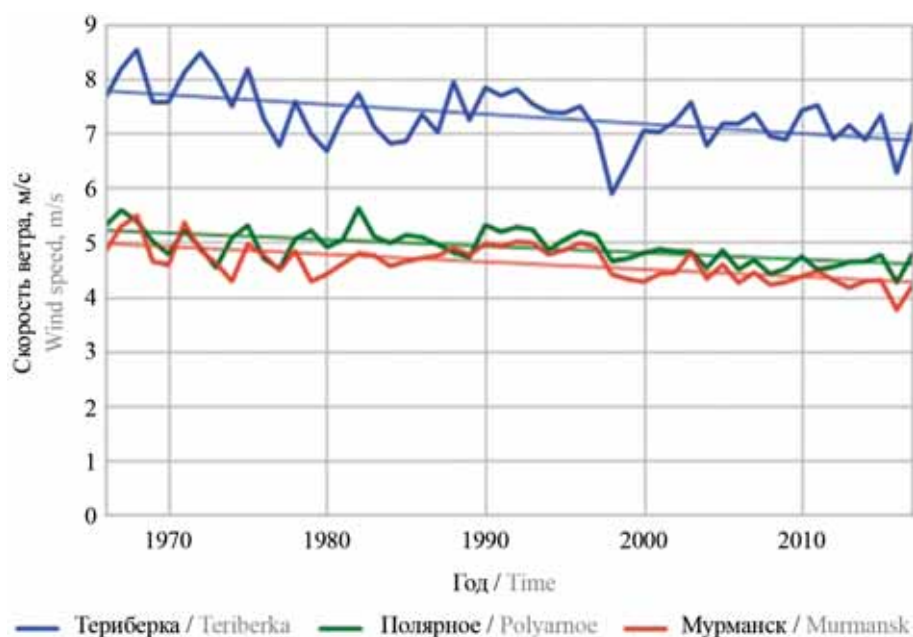


Рис. 2. Среднегодовая сила ветра на ГМС «Териберка», «Полярное», «Мурманск» и ее линейные тренды за период 1966–2017 гг.

Fig. 2. The average annual wind strength at the HMS “Teriberka”, “Polyarnoye”, “Murmansk”, and its linear trends, for the period 1966–2017

ЦСКМС применялась двумерная гидродинамическая модель COASTOX, которая позволяет учитывать в качестве внешних воздействий на движение воды приливные силы, ветровой нагон, градиенты атмосферного давления и речной сток. Модель решает уравнения мелкой воды методом конечных объемов на неструктурированных сетках с треугольными ячейками в декартовых и сферических координатах.

Расчетная область модели течений покрывает Кольский залив и прилежащую к нему часть Баренцева моря, включая Мотовский залив. Морская граница области идет от восточного края Рыбачьего п-ова дугой на юго-восток и подходит к Кольскому п-ову немного восточнее о. Кильдин (рис. 3).

Основой для построения расчетной сетки модели течений служили данные базы GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans)⁵ — батиметрические сведения мирового океана, распространяемые свободно. В районе с. Белокаменка между мысами Белокаменный и Великий они дополнялись показателями промеров морского дна эхолотом.

Расчетная сетка модели течений, построенная в декартовых координатах проекции UTM36, имеет ячейки переменного размера. Сторона ячейки меняется от нескольких километров на прилегающей к заливу области Баренцева моря (3000 м на морской границе, 6000 м в самой глубокой части расчетной области) до нескольких сот метров в самом заливе (200–600 м). К побережью залива сетка сгущается, так что сторона ячейки на побережье — 130–150 м. Общий вид расчетной сетки приведен на рис. 3.

⁵ GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) _2014 Grid. <https://www.gebco.net/>

В расчетной сетке минимальный размер ячеек на акватории порта вблизи причалов составляет 20 м. Соответствующий участок сетки с повышенной детализацией от мыса Кондраткина до мыса Великий показан на рис. 4.

Для верификации модели течений использовались данные наблюдений за уровнем моря и скоростью течения, выполненные в августе 2015 – феврале 2016 гг. Измерения уровня моря проводились с 9 августа 2015 г. по 11 февраля 2016 г. на измерительном посту (MS), установленном на акватории Кольского залива в районе с. Белокаменка (рис. 4). В качестве измерительного прибора применен накопитель данных DL.WMS/GPRS/R с преобразователем давления PTM/N/SDI-12. Измерения скорости течения осуществлялись в конце августа – начале сентября 2015 г. на буйковой станции A10 (рис. 4) с помощью измерительного прибора ADCP WHS 600.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для верификации полей ветра из реанализа NCEP/CFSR было проведено их сопоставление с данными измерения ветра, полученными с ГМС «Мурманск», «Полярное» и «Териберка». В качестве примера на рис. 5 приводятся компоненты скорости ветра в 2010 г., измеренные на ГМС «Мурманск» и интерполированные из данных CFSR в местоположения станций.

Полученные компоненты скорости ветра CFSR в целом неплохо совпадают по временному изменению для станций «Териберка» и «Полярное» и несколько хуже для ГМС «Мурманск». Но скорость ветра CFSR занижена для всех станций по сравнению с измерениями. Это подтверждается сравнением ком-

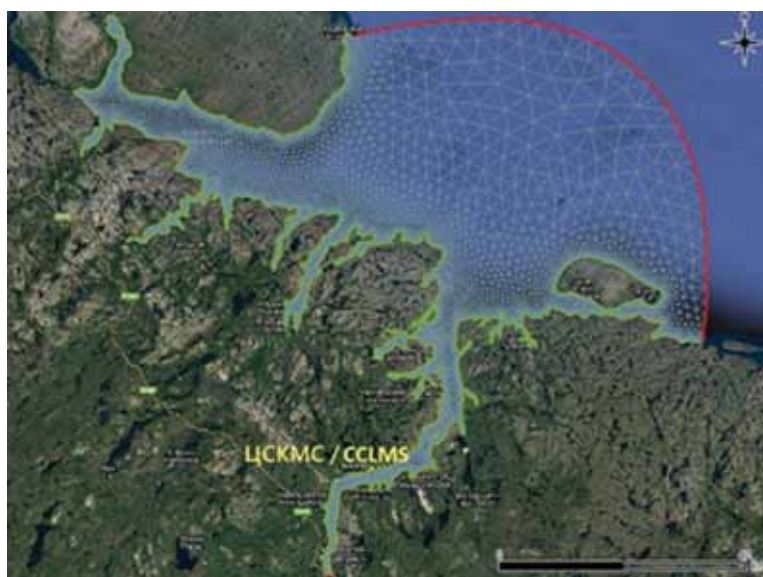


Рис. 3. Расчетная сетка модели течений COASTOX. Проекция UTM36, EPSG: 32636

Fig. 3. Calculation grid of the COASTOX flow model. UTM36 projection, EPSG: 32636

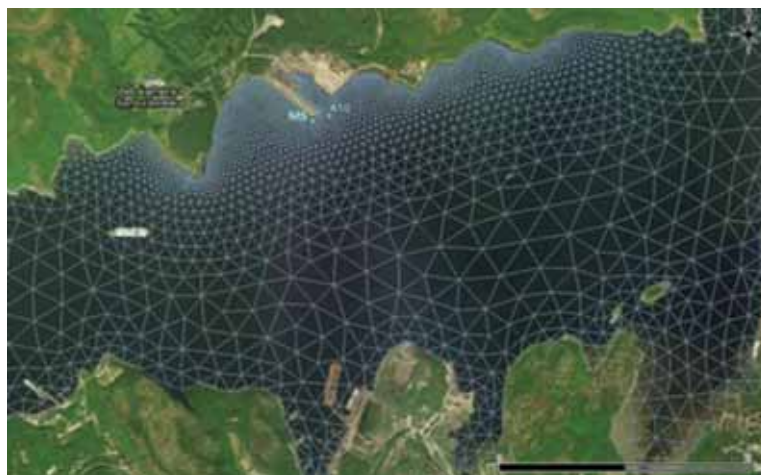


Рис. 4. Участок расчетной сетки с повышенной детализацией. Проекция UTM36, EPSG: 32636. Показано положение измерительных станций

Fig. 4. A section of the calculated grid with increased detail. UTM36 projection, EPSG: 32636. The positions of the measuring stations are shown

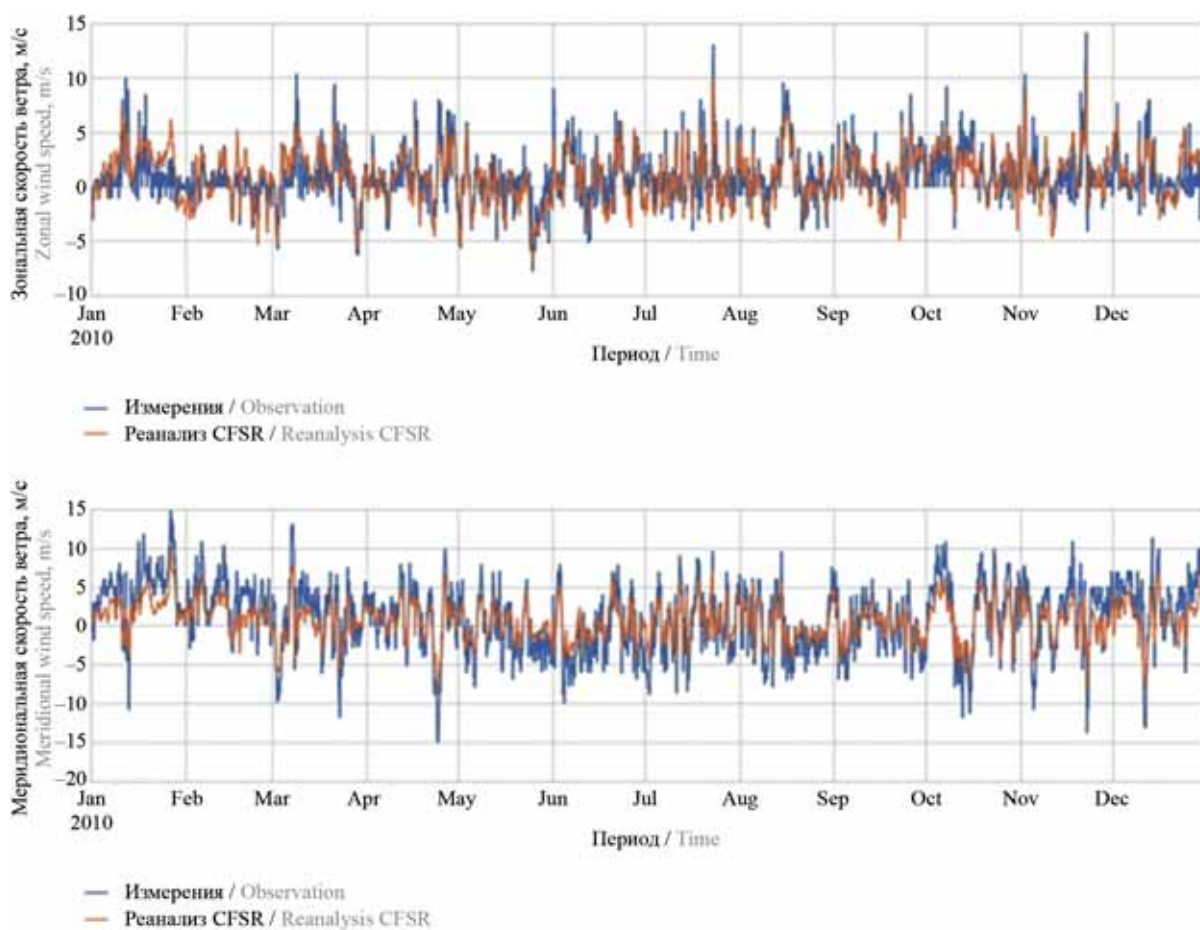


Рис. 5. Зональная и меридиональная составляющие скорости ветра в 2010 г., измеренные на ГМС «Мурманск» и интерполированные по данным реанализа CFSR в местоположение станции

Fig. 5. Zonal and meridional components of the wind speed in 2010, measured at the HMS “Murmansk”, and interpolated from the CFSR reanalysis data to the station location

понент скорости ветра за 1980–2010 гг., измеренных на ГМС, и интерполированных из данных CFSR в местоположения станций. В таблице собраны соответствующие параметры линейной регрессии. На рис. 6 показан график зависимости данных CFSR от измеренных величин для ГМС «Полярное».

Представленные выше результаты показывают, что данные реанализа давления и компонент скорости ветра хорошо описывают компоненты скорости ветра по данным ГМС «Мурманск», «Полярное» и «Териберка». Такая оценка графического сопоставления результатов реанализа и данных измерений подтверждается итогами статистического анализа. Были получены высокие значения коэффициента корреля-

ции, которые подтверждают обоснованность использования показателей реанализа NCEP/CFSR в качестве входных данных гидродинамической модели.

Для сравнения с наблюдениями в модели COASTOX было выполнено моделирование течений в Кольском заливе под действием приливных сил и атмосферного воздействия за период 195 дней, с 1 августа 2015 г. по 11 февраля 2016 г.

С целью моделирования приливов на морской границе вычислительной сетки в Баренцевом море задавались условия изменения уровня. Параметры приливной волны брались из глобальной модели приливов TPXO7.2 [29–33]. Динамика уровня на границах рассчитывалась на основе 13 приливных гармоник.

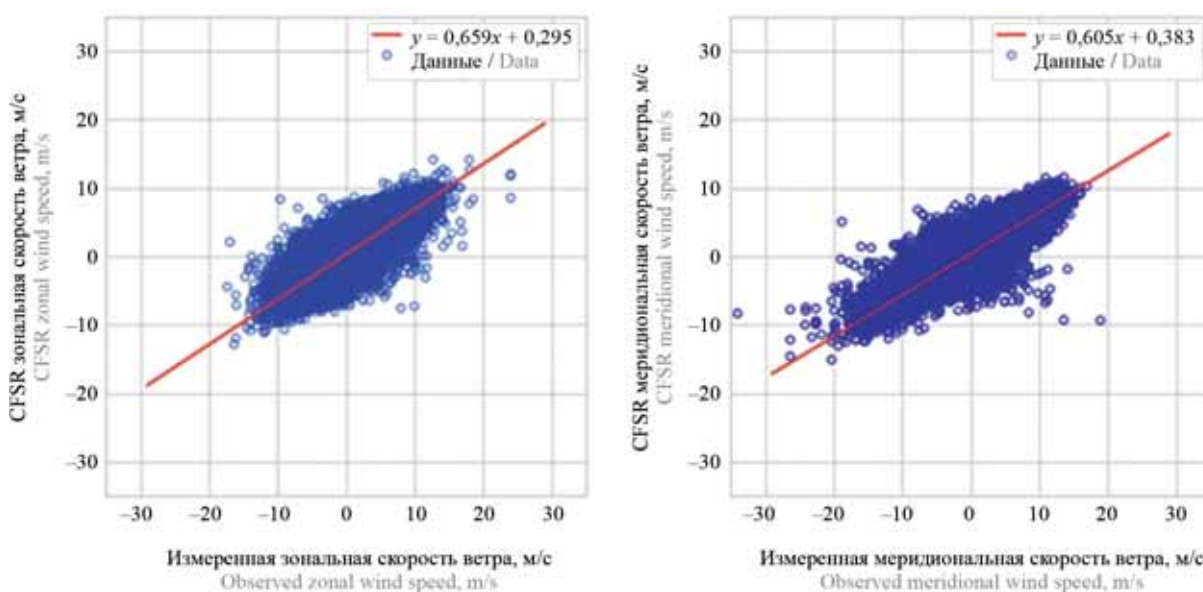


Рис. 6. Сравнение компонент скорости ветра за 1980–2010 гг., измеренных на ГМС «Полярное» и интерполированных по данным реанализа CFSR в местоположение станции

Fig. 6. Comparison of wind speed components for 1980–2010, measured at the “Polyaroye” HMS, and interpolated from the CFSR reanalysis data to the station location

Параметры линейной регрессии для сравнения компонент скорости ветра за 1980–2010 гг., измеренные на ГМС и интерполированные из данных реанализа CFSR в места расположения станций

Linear regression parameters for comparisons of wind velocity components for 1980–2010, measured on the HMS, and interpolated from CFSR reanalysis data to station locations

ГМС / HMS	Зональная компонента ветра The zonal component of the wind			Меридиональная компонента ветра The meridional component of the wind		
	Коэффициент корреляции Correlation coefficient	Наклон Slant	Смещение Offset	Коэффициент корреляции Correlation coefficient	Наклон Slant	Смещение Offset
Териберка Teriberka	0,831	0,698	0,377	0,881	0,656	0,124
Полярное Polyaroye	0,788	0,659	0,295	0,883	0,605	0,383
Мурманск Murmansk	0,718	0,650	0,176	0,883	0,508	0,092

Для учета атмосферного воздействия в модели использовались метеоданные глобальной системы прогноза погоды NCEP CFSv2, а именно наборы данных атмосферного давления, приведенного к уровню моря, и скорости ветра на высоте 10 м над земной поверхностью с часовым разрешением.

CFSv2 ассимилирует параметры измерений наземных станций, метеозондов, измерительных приборов, установленных на самолетах, и спутниковые наблюдения. Сведения CFSv2 хорошо согласуются с наблюдаемыми атмосферными величинами для различных регионов земного шара, потому они широко используются для моделирования ветровых волн и океанической циркуляции в результате атмосферного воздействия.

На границах сетки, прилегающих к суше, нормальная компонента скорости течения задавалась

равной нулю, а тангенциальная не фиксировалась. В качестве начального условия задавались постоянные по всей расчетной области уровень моря, равный нулю, и равные нулю компоненты скорости течения. Переменная, зависящая от широты и долготы, сила Кориолиса учитывалась при моделировании. Вязкость в уравнениях мелкой воды не учитывалась в связи с тем, что численная схема модели обладает численной диссипацией. Донное трение было включено в модель в формулировке Маннинга. Коэффициент Маннинга по всей расчетной области задавался постоянным и равным 0,01.

На рис. 7 представлено промоделированное поле течений на акватории ЦСКМС на 17 августа 2015 г. в фазе прилива. Временное изменение уровня моря в модели также согласуется с наблюдениями. На рис. 8 показан временной ход промоделированного и из-

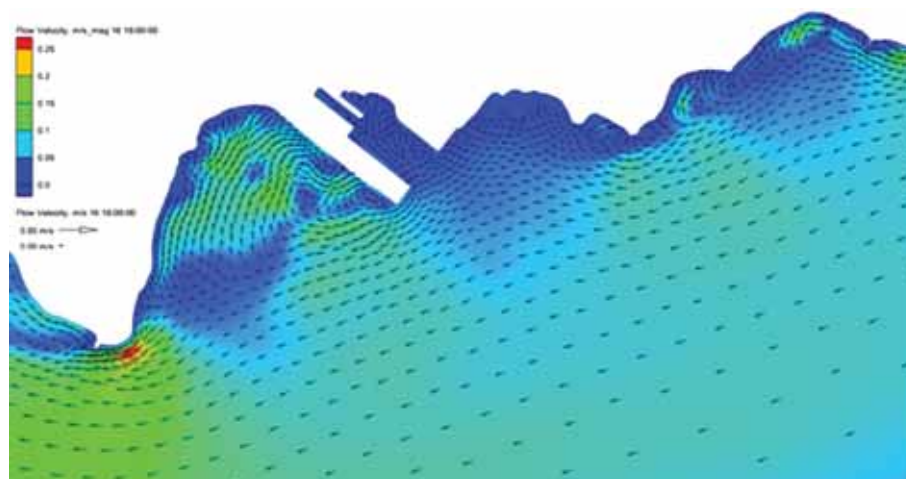


Рис. 7. Поля течений в акватории ЦСКМС во время фазы прилива, 17.08.2015. Проекция UTM36, EPSG: 32636

Fig. 7. Current fields in the CCLMS water area during the high tide phase, August 17, 2015. UTM36 projection, EPSG: 32636

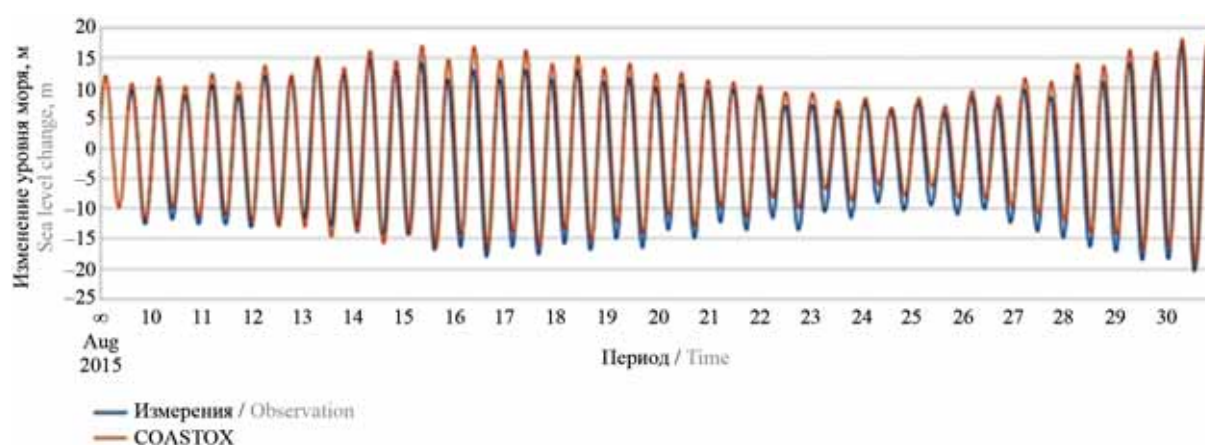


Рис. 8. Временное изменение уровня моря в точке MS по данным наблюдений и модели течений COASTOX. Значения отсчитываются от среднегогодового уровня моря

Fig. 8. The temporal change in sea level at the MS point according to observations and the current model COASTOX. The values are calculated from the average annual sea level

меренного уровня моря в точке MS за август 2015 г. Видно, что модель течений правильно воспроизводит фазы приливной динамики уровня моря, а амплитуда колебаний близка к наблюдаемой.

Количественная оценка эффективности предсказания уровня моря в модели основана на регрессионном анализе и статистическом сравнении наблюдаемых и промоделированных значений. На рис. 9 представлен график значений уровня моря, измеренных и промоделированных в точке MS, для периода с 9 августа 2015 г. по 11 февраля 2016 г.

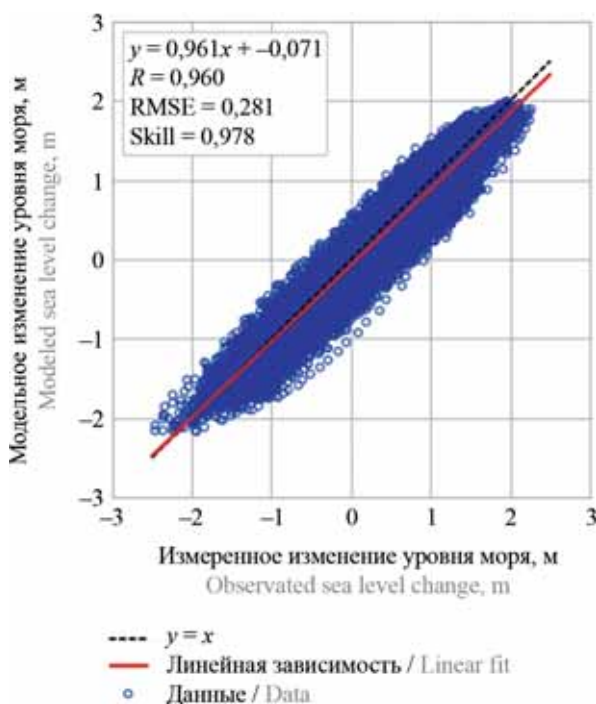


Рис. 9. Промоделированные и измеренные значения уровня моря в точке MS за период с 9.08.2015 по 11.02.2016, а также регрессионная зависимость для построенного набора точек. Значения отсчитываются от среднегодового уровня моря

Fig. 9. The simulated and measured sea level values at the MS point for the period from August 9, 2015 to February 11, 2016, and the regression dependence for the constructed set of points. The values are calculated from the average annual sea level

Кроме среднеквадратичного отклонения и коэффициента корреляции для оценки эффективности модели использовался индекс предсказательной способности согласно методу, предложенному С.Д. Уиллмотт [34], широко используемому сейчас для верификации океанографических моделей [35–39]. Максимальное значение индекса Skill (абсолютная предсказательная способность модели) равна единице.

Полученный коэффициент корреляции 0,96 достаточно высок. Среднеквадратичное отклонение рассчитанного уровня моря от измеренного равно

0,28 м, при том, что колебания уровня имеют амплитуду около 4,7 м. Индекс предсказательной способности 0,98 близок к единице.

Таким образом, результаты количественной оценки эффективности модели для предсказания уровня моря подтверждают вывод, сделанный ранее на основе графического сопоставления результатов моделирования и наблюдений.

Измерения течений проводились с 28.08.2015 по 01.09.2015 на 16 горизонтах: 2,4; 3,4; 4,4; 5,4; 6,4; 7,4; 8,4; 9,4; 10,4; 11,4; 12,4; 13,4; 14,4; 15,4; 16,4 и 17,4 м. Данные об измерениях были предоставлены на временных интервалах по фазам прилива: прилив, полная вода, отлив, малая вода, усредненные за время протекания фазы. Сравнение значений скоростей, рассчитанных в модели, с измеренными затрудняется тем, что последние усреднены по времени, но не известна процедура усреднения.

На рис. 10 показано временное изменение рассчитанных моделью компонент скорости течения и модуля скорости с 28 августа по 1 сентября 2015 г. в точке А10. Для сравнения на график нанесены кривые временного хода значений скорости, измеренных профилографом. Измеренные величины усреднены по глубине и представлены постоянными во время фаз прилива.

Из-за специфики предоставленных данных наблюдений за течениями затруднительно количественно оценивать эффективность предсказания скорости течения в модели.

Из графиков на рис. 10 видно, что промоделированная величина скорости течения попадает в тот же интервал значений, что и показатели наблюдений.

Исходя также из того, что модель течений правильно воспроизводит реверсивный характер течений в среднем колене Кольского залива и достаточно точно предсказывает изменение уровня моря на акватории, был сделан вывод, что модель течений COASTOX подходит для прогноза характеристик уровня моря и скорости течения на акватории ЦСКМС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что гидродинамическая модель Кольского залива решает задачи достоверного прогноза режима волн и течений при проектировании портовых сооружений в Кольском заливе.

Сведения реанализа давления и компонент скорости ветра хорошо воспроизводят компоненты скорости ветра, измеренные на ближайших ГМС. Подтверждена обоснованность использования данных реанализа NCEP/CFSR в качестве входных для гидродинамической модели.

Результат оценки эффективности модели для предсказания уровня моря продемонстрировал, что модель течений правильно воспроизводит фазы приливной динамики уровня моря, а амплитуда колебаний близка к наблюдаемой.

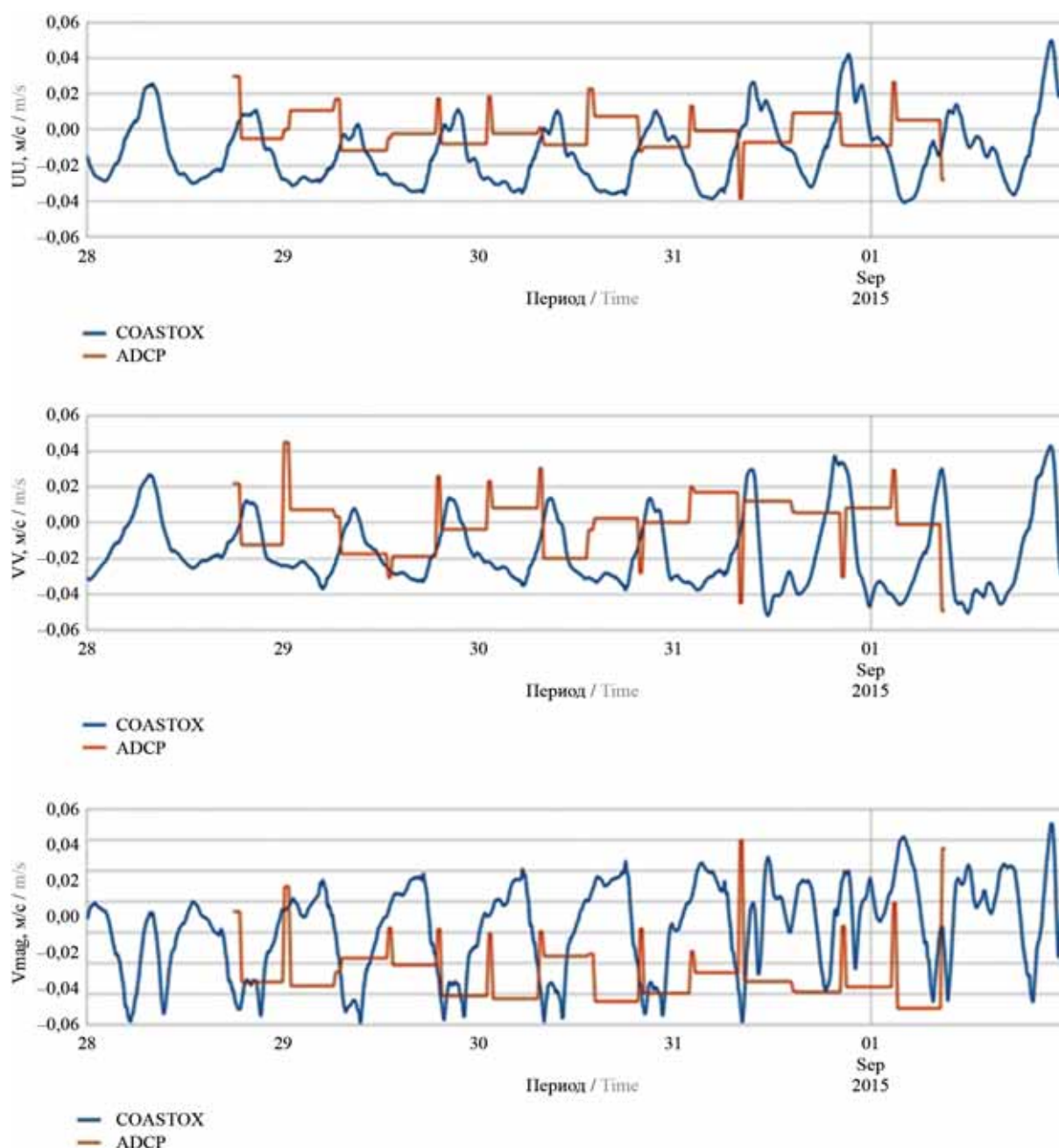


Рис. 10. Временное изменение компонент скорости течения и модуля скорости в точке A10 с 28 августа по 1 сентября 2015 г.

Fig. 10. Temporary change in the components of the flow velocity and the velocity modulus at point A10 from August 28 to September 1, 2015

Измеренные скорости течения на различных уровнях на измерительной станции были проинтегрированы по глубине для сравнения со средней по глубине скоростью течений, рассчитываемой дву-

мерной моделью COASTOX. В ходе сравнения установлено хорошее совпадение по фазе рассчитанных колебаний скорости с измеренными значениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zheleznyak M., Kivva S., Ievdin I., Boyko O., Kolomiets P., Sorokin M. *et al.* Hydrological dispersion module of JRODOS: renewed chain of the emergency

response models of radionuclide dispersion through watersheds and rivers // Radioprotection. 2016. Vol. 51. Pp. S129–S131. DOI: 10.1051/radiopro/2016048

2. *Holthuijsen L. Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge : Cambridge University Press, 2007. DOI: 10.1017/CBO9780511618536
3. *Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III™ version 3.14*. NOAA / NWS / NCEP / MMAB // Technical Note 276. 2009. 194 p.
4. *Aelbrecht D. ARTEMIS 3.0: A finite element model for predicting wave agitation in coastal areas and harbours including dissipation* // Proceedings of International Conference on Computer Modelling of Seas and Coastal Regions. 1997. Vol. 27. Pp. 343–352.
5. *Berkhoff J.C.W. Computation of combined refraction — diffraction* // Coastal Engineering 1972. 1972. DOI: 10.1061/9780872620490.027
6. *Hervouet J.M. TELEMAC, a hydroinformatic system* // La Houille Blanche. 1999. Issue 3–4. Pp. 21–28. DOI: 10.1051/lhb/1999029
7. *Аншаков А.С., Кантаржи И.Г. Влияние компоновки оградительных сооружений на волновой режим акватории порта* // Гидротехническое строительство. 2018. № 9. С. 30–37.
8. *Кантаржи И.Г., Железняк М.И., Аншаков А.С. Численное моделирование нелинейных гидродинамических процессов береговой зоны* // Инженерно-строительный журнал. 2019. № 3 (87). С. 80–92. DOI: 10.18720/MCE.87.7
9. *Hadla G., Anshakov A., Kantarzi I. Composite modelling in port engineering* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. P. 072044. DOI: 10.1088/1757-899X/869/7/072044
10. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandinet L. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project* // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. Vol. 77. No. 3. Pp. 437–471. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2
11. *Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis* // Bulletin of the American Meteorological Society. 2010. Vol. 91. No. 8. Pp. 1015–1058. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1
12. *Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P. et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2* // Journal of Climate. 2014. Vol. 27. No. 6. Pp. 2185–2208. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1
13. *Bento A.R., Martinho P., Soares C.G. Numerical modelling of the wave energy in Galway Bay* // Renewable Energy. 2015. Vol. 78. Pp. 457–466. DOI: 10.1016/j.renene.2015.01.024
14. *Rusu L., Soares C.G. Wave energy assessments in the Azores islands* // Renewable Energy. 2012. Vol. 45. Pp. 183–196. DOI: 10.1016/j.renene.2012.02.027
15. *Van Nieuwkoop J.C.C., Smith H.C.M., Smith G.H., Johanning L. Wave resource assessment along the Cornish coast (UK) from a 23-year hindcast dataset validated against buoy measurements* // Renewable Energy. 2013. Vol. 58. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.renene.2013.02.033
16. *Hope M.E., Westerink J.J., Kennedy A.B., Kerr P.C., Dietrich J.C., Dawson C. et al. Hindcast and validation of Hurricane Ike (2008) waves, forerunner, and storm surge* // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2013. Vol. 118. Pp. 4424–4460. DOI: 10.1002/jgrc.20314
17. *Taflanidis A.A., Kennedy A.B., Westerink J.J., Smith J., Cheung K.F., Hope M. et al. Rapid assessment of wave and surge risk during landfalling hurricanes: Probabilistic approach* // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 2013; 139(3):171–182. DOI: 10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000178
18. *Xie D., Zou Q., Cannon J.W. Application of SWAN+ADCIRC to tide-surge and wave simulation in Gulf of Maine during Patriot's Day storm* // Water Science and Engineering. 2016. Vol. 9. No. 1. Pp. 33–41. DOI: 10.1016/j.wse.2016.02.003
19. *Suh S.W., Lee H.Y., Kim H.J., Fleming J.G. An efficient early warning system for typhoon storm surge based on time-varying advisories by coupled ADCIRC and SWAN* // Ocean Dynamics. 2015. Vol. 65. No. 5. Pp. 617–646. DOI: 10.1007/s10236-015-0820-3
20. *Rusu E., Soares C.G. Wave modelling at the entrance of ports* // Ocean Engineering. 2011. Vol. 38. Pp. 2089–2109. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.09.002
21. *Guillou N. Modeling Penetration of Tide-Influenced Waves in Le Havre Harbor* // Journal of Coastal Research. 2012. Vol. 28. No. 4. P. 945. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00192.1
22. *Ivan A., Gasparotti C., Rusu E. Influence of the interactions between waves and currents on the navigation at the entrance of the Danube Delta* // Journal of Environmental Protection and Ecology. 2012. Vol. 13. Pp. 1673–1682.
23. *Gunn K., Stock-Williams C. Quantifying the global wave power resource* // Renewable Energy. 2012. Vol. 44. Pp. 296–304. DOI: 10.1016/j.renene.2012.01.101
24. *Chawla A., Spindler D.M., Tolman H.L. Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds* // Ocean Modelling. 2013. Vol. 70. Pp. 189–206. DOI: 10.1016/j.ocemod.2012.07.005
25. *Arinaga R.A., Cheung K.F. Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data* // Renewable Energy. 2012. Vol. 39. No. 1. Pp. 49–64. DOI: 10.1016/j.renene.2011.06.039
26. *Mentaschi L., Besio G., Cassola F., Mazzino A. Problems in RMSE-based wave model validations* // Ocean Modelling. 2013. Vol. 72. Pp. 53–58. DOI: 10.1016/j.ocemod.2013.08.003
27. *Stopa J.E., Cheung K.F., Tolman H.L., Chawla A. Patterns and cycles in the Climate Forecast System Reanalysis wind and wave data* // Ocean Modelling. 2013. Vol. 70. Pp. 207–220. DOI: 10.1016/j.ocemod.2012.10.005

28. Kantarzi I., Anshakov A. Numerical modeling of wind waves affected the marine structures in the Kola Bay // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 04042. DOI: 10.1051/mateconf/201825104042

29. Egbert G.D., Erofeeva S.Y. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2002. Vol. 19. No. 2. Pp. 183–204. DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<0183:eimobo>2.0.co;2

30. King M.A., Padman L., Nicholls K., Clarke P.J., Gudmundsson G.H., Kullessa B. et al. Ocean tides in the Weddell Sea: New observations on the Filchner-Ronne and Larsen C ice shelves and model validation // Journal of Geophysical Research. 2011. Vol. 116. P. C6. DOI: 10.1029/2011JC006949

31. Kim T.-H., Shibuya K., Doi K., Aoyama Y., Hayakawa H. Validation of global ocean tide models using the superconducting gravimeter data at Syowa Station, Antarctica, and in situ tide gauge and bottom-pressure observations // Polar Science. 2011. Vol. 5. No. 1. Pp. 21–39. DOI: 10.1016/j.polar.2010.11.001

32. Timko P.G., Arbic B.K., Richman J.G., Scott R.B., Metzger E.J., Wallcraft A.J. Skill testing a three-dimensional global tide model to historical current meter records // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2013. Vol. 118. No. 12. Pp. 6914–6933. DOI: 10.1002/2013JC009071

33. Daher V.B., Paes R.C.D.O.V., França G.B., Alvarenga J.B.R., Teixeira G.L.G. Extraction of tide constituents by harmonic analysis using altimetry satellite

data in the Brazilian coast // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2015. Vol. 32. No. 3. Pp. 614–626. DOI: 10.1175/JTECH-D-14-00091.1

34. Willmott C.J. On the validation of models // Physical Geography. 1981. Vol. 2. No. 2. Pp. 184–194. DOI: 10.1080/02723646.1981.10642213

35. Warner J.C. Numerical modeling of an estuary: a comprehensive skill assessment // Journal of Geophysical Research. 2005. Vol. 110. Issue C5. DOI: 10.1029/2004JC002691

36. Warner J.C., Geyer W.R., Arango H.G. Using a composite grid approach in a complex coastal domain to estimate estuarine residence time // Computers & Geosciences. 2010. Vol. 36. No. 7. Pp. 921–935. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.11.008

37. Ma G., Shi F., Liu S., Qi D. Hydrodynamic modeling of Changjiang Estuary: model skill assessment and large-scale structure impacts // Applied Ocean Research. 2011. Vol. 33. No. 1. Pp. 69–78. DOI: 10.1016/j.apor.2010.10.004

38. Hetland R.D., DiMarco S.F. Skill assessment of a hydrodynamic model of circulation over the Texas–Louisiana continental shelf // Ocean Modelling. 2012. Vol. 43–44. Pp. 64–76. DOI: 10.1016/j.ocemod.2011.11.009

39. Hasan G.M.J., van Maren D.S., Ooi S.K. Hydrodynamic modeling of Singapore's coastal waters: Nesting and model accuracy // Ocean Modelling. 2016. Vol. 97. Pp. 141–151. DOI: 10.1016/j.ocemod.2015.09.002

Поступила в редакцию 14 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 26 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 26 апреля 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Александр Сергеевич Аншаков** — кандидат технических наук, преподаватель кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 864818; anshakov.aleks.xx@yandex.ru;

Измаил Григорьевич Кантаржи — доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1086368; kantardgi@yandex.ru.

REFERENCES

1. Zheleznyak M., Kivva S., Ievdin I., Boyko O., Kolomiets P., Sorokin M. et al. Hydrological dispersion module of JRODOS: renewed chain of the emergency response models of radionuclide dispersion through watersheds and rivers. *Radioprotection*. 2016; 51:S129–S131. DOI: 10.1051/radiopro/2016048

2. Holthuijsen L. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge, Cambridge University Press, 2007. DOI: 10.1017/CBO9780511618536

3. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III™ version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB. *Technical Note 276*. 2009; 194.

4. Aelbrecht D. ARTEMIS 3.0: A finite element model for predicting wave agitation in coastal areas and harbours including dissipation. *Proceedings of International Conference on Computer Modelling of Seas and Coastal Regions*. 1997; 27: 343–352.

5. Berkhoff J.C.W. Computation of Combined Refraction — Diffraction. *Coastal Engineering* 1972. 1972. DOI: 10.1061/9780872620490.027

6. Hervouet J.M. TELEMAC, a hydroinformatic system. *La Houille Blanche*. 1999; 3–4:21–28. DOI: 10.1051/lhb/1999029

7. Anshakov A.S., Kantarzhi I.G. Influence of the layout of protective structures on the wave regime of the port water area. *Hydraulic Engineering Construction*. 2018; 9:30-37. (rus.).
8. Kantardgi I.G., Zheleznyak M.I., Anshakov A.S. Numerical modeling of nonlinear hydrodynamics of the coastal areas. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 3(87):80-92. DOI: 10.18720/MCE.87.7 (rus.).
9. Hadla G., Anshakov A., Kantarzhi I. Composite Modelling in Port Engineering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869:072044. DOI: 10.1088/1757-899X/869/7/072044
10. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandinet L. al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996; 77(3):437-471. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2
11. Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2010; 91(8):1015-1058. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1
12. Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P. et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*. 2014; 27(6):2185-2208. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1
13. Bento A.R., Martinho P., Soares C.G. Numerical modelling of the wave energy in Galway Bay. *Renewable Energy*. 2015; 78:457-466. DOI: 10.1016/j.renene.2015.01.024
14. Rusu L., Soares C.G. Wave energy assessments in the Azores islands. *Renewable Energy*. 2012; 45:183-196. DOI: 10.1016/j.renene.2012.02.027
15. Van Nieuwkoop J.C.C., Smith H.C.M., Smith G.H., Johanning L. Wave resource assessment along the Cornish coast (UK) from a 23-year hindcast dataset validated against buoy measurements. *Renewable Energy*. 2013; 58:1-14. DOI: 10.1016/j.renene.2013.02.033
16. Hope M.E., Westerink J.J., Kennedy A.B., Kerr P.C., Dietrich J.C., Dawson C. et al. Hindcast and validation of Hurricane Ike (2008) waves, forerunner, and storm surge. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013; 118:4424-4460. DOI: 10.1002/jgrc.20314
17. Taflanidis A.A., Kennedy A.B., Westerink J.J., Smith J., Cheung K.F., Hope M. et al. Rapid assessment of wave and surge risk during landfalling hurricanes: Probabilistic approach. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2013; 139(3):171-182. DOI: 10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000178
18. Xie D., Zou Q., Cannon J.W. Application of SWAN+ADCIRC to tide-surge and wave simulation in Gulf of Maine during Patriot's Day storm. *Water Science and Engineering*. 2016; 9(1):33-41. DOI: 10.1016/j.wse.2016.02.003
19. Suh S.W., Lee H.Y., Kim H.J., Fleming J.G. An efficient early warning system for typhoon storm surge based on time-varying advisories by coupled AD-CIRC and SWAN. *Ocean Dynamics*. 2015; 65(5):617-646. DOI: 10.1007/s10236-015-0820-3
20. Rusu E., Soares C.G. Wave modelling at the entrance of ports. *Ocean Engineering*. 2011; 38:2089-2109. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.09.002
21. Guillou N. Modeling Penetration of Tide-Influenced Waves in Le Havre Harbor. *Journal of Coastal Research*. 2012; 28(4):945. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00192.1
22. Ivan A., Gasparotti C., Rusu E. Influence of the interactions between waves and currents on the navigation at the entrance of the Danube Delta. *Journal of Environmental Protection and Ecology*. 2012; 13:1673-1682.
23. Gunn K., Stock-Williams C. Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy*. 2012; 44:296-304. DOI: 10.1016/j.renene.2012.01.101
24. Chawla A., Spindler D.M., Tolman H.L. Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. *Ocean Modelling*. 2013; 70:189-206. DOI: 10.1016/j.ocemod.2012.07.005
25. Arinaga R.A., Cheung K.F. Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data. *Renewable Energy*. 2012; 39(1):49-64. DOI: 10.1016/j.renene.2011.06.039
26. Mentaschi L., Besio G., Cassola F., Mazzino A. Problems in RMSE-based wave model validations. *Ocean Modelling*. 2013; 72:53-58. DOI: 10.1016/j.ocemod.2013.08.003
27. Stopa J.E., Cheung K.F., Tolman H.L., Chawla A. Patterns and cycles in the Climate Forecast System Reanalysis wind and wave data. *Ocean Modelling*. 2013; 70:207-220. DOI: 10.1016/j.ocemod.2012.10.005
28. Kantarzhi I., Anshakov A. Numerical modeling of wind waves affected the marine structures in the Kola Bay. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:04042. DOI: 10.1051/mateconf/201825104042
29. Egbert G.D., Erofeeva S.Y. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002; 19(2):183-204. DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<0183:eimobo>2.0.co;2
30. King M.A., Padman L., Nicholls K., Clarke P.J., Gudmundsson G.H., Kulesa B. et al. Ocean tides in the Weddell Sea: New observations on the Filchner-Ronne and Larsen C ice shelves and model validation. *Journal of Geophysical Research*. 2011; 116:C6. DOI: 10.1029/2011JC006949
31. Kim T.-H., Shibuya K., Doi K., Aoyama Y., Hayakawa H. Validation of global ocean tide models using the superconducting gravimeter data at Syowa Station, Antarctica, and in situ tide gauge and bottom-pressure observations. *Polar Science*. 2011; 5(1):21-39. DOI: 10.1016/j.polar.2010.11.001
32. Timko P.G., Arbic B.K., Richman J.G., Scott R.B., Metzger E.J., Wallcraft A.J. Skill testing a three-dimensional global tide model to historical

current meter records. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013; 118(12):6914-6933. DOI: 10.1002/2013JC009071

33. Daher V.B., Paes R.C.D.O.V., França G.B., Alvarenga J.B.R., Teixeira G.L.G. Extraction of tide constituents by harmonic analysis using altimetry satellite data in the Brazilian coast. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2015; 32(3):614-626. DOI: 10.1175/JTECH-D-14-00091.1

34. Willmott C.J. On the validation of models. *Physical Geography*. 1981; 2(2):184-194. DOI: 10.1080/02723646.1981.10642213

35. Warner J.C. Numerical modeling of an estuary: a comprehensive skill assessment. *Journal of Geophysical Research*. 2005; 110(C5). DOI: 10.1029/2004JC002691

36. Warner J.C., Geyer W.R., Arango H.G. Using a composite grid approach in a complex coastal domain

to estimate estuarine residence time. *Computers & Geosciences*. 2010; 36(7):921-935. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.11.008

37. Ma G., Shi F., Liu S., Qi D. Hydrodynamic modeling of Changjiang Estuary: model skill assessment and large-scale structure impacts. *Applied Ocean Research*. 2011; 33(1):69-78. DOI: 10.1016/j.apor.2010.10.004

38. Hetland R.D., DiMarco S.F. Skill assessment of a hydrodynamic model of circulation over the Texas–Louisiana continental shelf. *Ocean Modelling*. 2012; 43-44:64-76. DOI: 10.1016/j.ocemod.2011.11.009

39. Hasan G.M.J., van Maren D.S., Ooi S.K. Hydrodynamic modeling of Singapore's coastal waters: Nesting and model accuracy. *Ocean Modelling*. 2016; 97:141-151. DOI: 10.1016/j.ocemod.2015.09.002

Received March 14, 2021.

Adopted in revised form on April 26, 2021.

Approved for publication on April 26, 2021.

B I O N O T E S: **Alexander S. Anshakov** — Candidate of Technical Sciences, lecturer 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; ID RISC: 864818; anshakov.aleks.xx@yandex.ru;

Izmail G. Kantarzi — Doctor of Technical Sciences, Professor 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; ID RISC: 1086368; kantardgi@yandex.ru.

Расчет температуры воздуха в помещении по безразмерным параметрам при интегральном регулировании климатических систем

О.Д. Самарин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Совершенствование технологии расчета теплового режима помещений в условиях автоматизации климатических систем до сих пор актуально. Цель исследования — поиск универсальной зависимости температуры воздуха в помещениях здания от времени в условиях скачка теплопоступлений или теплопотерь для интегрального закона регулирования компенсационного теплового потока от систем обеспечения микроклимата. В виде научной гипотезы рассматривается положение о степенном характере такой зависимости с наличием максимума и асимптотическом стремлении к нулю.

Материалы и методы. Исследование предусматривает использование основных уравнений, связывающих наиболее значимые компоненты тепловых потоков в помещениях, обслуживаемых системами обеспечения микроклимата, оборудованными интегральными регуляторами, в условиях скачкообразного изменения теплового возмущения. Применяется метод анализа размерностей с целью выявления безразмерных комплексов, существенных для получения инженерных зависимостей, а также программное вычисление сумм бесконечных рядов с заданной точностью, численное решение нелинейных уравнений и метод экономизации степенных рядов.

Результаты. Найдено аналитическое выражение для изменения температуры в помещении при интегральном регулировании климатического оборудования в условиях скачка теплопоступлений, имеющее вид бесконечного ряда по степеням безразмерного параметра, характеризующего свойства помещения и системы автоматизации. Получено упрощенное выражение для отклонения температуры воздуха и выведена формула для требуемого времени регулирования, а также дана его оценка на примере одного из жилых зданий в климатических условиях Москвы.

Выводы. Показано, что зависимость температуры воздуха в помещении, обслуживаемом системами обеспечения микроклимата с интегральными регуляторами, от времени представима в универсальном безразмерном виде, пригодном для любых объектов независимо от их конкретных характеристик. Подтверждены и уточнены ранее обнаруженные соотношения для момента максимального отклонения и величины динамической ошибки регулирования в зависимости от воздухообмена помещения, коэффициента передачи регулятора и собственной теплоустойчивости помещения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроклимат, температура, тепловой баланс, температурная волна, теплопоступления, регулирование, коэффициент передачи

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самарин О.Д. Расчет температуры воздуха в помещении по безразмерным параметрам при интегральном регулировании климатических систем // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 4. С. 486–492. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.486-492

Calculation of indoor air temperature using dimensionless parameters for integrated climate control systems

Oleg D. Samarina

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

ABSTRACT

Introduction. It is noted that the improvement of the technology for calculating the thermal regime of premises in the conditions of automation of climate systems is still relevant. The aim of the work is to find a universal dependence of the air temperature in the building premises on time in conditions of a jump in heat access or heat loss for the integral law of regulating the compensatory heat flow from microclimate systems. In the form of a scientific hypothesis, we consider the statement about the power nature of such a dependence with the presence of a maximum and an asymptotic tendency to zero.

Materials and methods. The study involves the use of basic equations that relate the most significant components of heat flows in rooms serviced by microclimate systems equipped with integrated controllers under conditions of abrupt changes in thermal disturbances. The method of dimension analysis is used to identify dimensionless complexes that are essential for obtaining engineering dependencies, as well as software calculation of sums of infinite series with a given accuracy, numerical solution of nonlinear equations, and the method of power series economization.

Results. An analytical expression is found for changes in room temperature under integrated control of climate equipment under conditions of a jump in heat availability, which has the form of an infinite series in degrees of a dimensionless parameter

that characterizes the properties of the room and the automation system. A simplified expression for the deviation of air temperature is obtained and a formula for the required control time is derived, as well as its estimation is given on the example of one residential building in the climatic conditions of Moscow.

Conclusions. It is shown that the dependence of the air temperature in a room serviced by microclimate systems with integrated controllers on time is represented in a universal dimensionless form, suitable for any objects regardless of their specific characteristics. The previously discovered relationships for the moment of maximum deviation and the value of the dynamic control error depending on the air exchange of the room, the transmission coefficient of the controller and the room's own heat stability are confirmed and refined.

KEYWORDS: microclimate, temperature, heat balance, heat gain, regulation, integral law, transmission coefficient

FOR CITATION: Samarin O.D. Calculation of indoor air temperature using dimensionless parameters for integrated climate control systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):486–492. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.486–492 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Автоматическое поддержание совокупности внутренних метеопараметров в помещениях гражданских зданий при переменных внешних и внутренних тепловых воздействиях имеет первостепенное значение для обеспечения безопасности жизнедеятельности человека и поддержания комфортности его среды обитания. Для достижения этой цели служат, в первую очередь, системы поддержания микроклимата зданий, главным образом кондиционирования воздуха, и системы автоматического управления их элементами. Чтобы их работа происходила максимально эффективно и с наименьшими энергозатратами, необходимо четко представлять себе особенности нестационарного теплового режима помещений, обслуживаемых автоматизированным климатическим оборудованием. Наибольший интерес при этом представляют условия, когда применяются интегральные регуляторы, поскольку, несмотря на несколько большую сложность, они обеспечивают нулевую статическую ошибку регулирования.

Следовательно, в качестве предмета исследования в настоящей работе рассматриваются способы расчета поведения температуры в помещениях зданий при возникновении тепловых возмущений для оценки качества функционирования автоматизированных климатических систем с точки зрения выполнения требований комфортности или безопасности технологических процессов. Цель работы — поиск универсальной зависимости температуры воздуха в помещениях здания от времени в условиях скачка теплопоступлений или теплопотерь для интегрального закона регулирования компенсационного теплового потока от систем обеспечения микроклимата.

Некоторые упрощенные аналитические решения, касающиеся расчета изменения температуры в переменных режимах, приводятся в работах [1, 2], однако в них речь идет в основном об изолированных ограждающих конструкциях в условиях остывания здания при отключении теплоснабжения, либо при периодических тепловых возмущениях, а общий тепловой баланс помещения не учитывается. В последнее время появляются и более комплексные исследования [3], но их использование в инженерных

расчетах в ряде случаев оказывается затруднительным из-за сложности получаемых результатов. Одновременно все чаще начинают применяться численные методы для изучения и моделирования нестационарных, в том числе аварийных режимов. Здесь можно отметить, в частности, публикации [4, 5], и особенно такой подход становится характерным для зарубежных работ, среди которых можно остановиться на статьях [6–8]. Простейший вариант, когда можно получить аналитическое решение с учетом как характеристик ограждений помещения, так и системы автоматизации климатического оборудования, а именно при пропорциональном регулировании в случае скачкообразного теплового возмущения, был рассмотрен автором в работе [9]. При этом были получены выражения для параметров, характеризующих собственную теплоустойчивость помещения и обратную связь, вносимую регулятором, которые могут быть использованы для исследования более сложных случаев.

Помимо этого, авторы некоторых исследований в данной области решают обратную задачу — по определению теплофизических характеристик материала с помощью изучения температурных колебаний [10–12] или с применением методов термографии [13]. Труды [14–17] посвящены моделированию процессов в помещении в целом. Так, в публикации [14] представлена подробная многопараметрическая численная модель имитационного типа, но она распространяется лишь на холодный период года при наличии отопления. Работы [15–17] также являются целостными, например, в [15, 16] речь идет об использовании принципов нечеткой логики в организации управления микроклиматом, а [17] в большей степени построены на методах теории автоматического регулирования, однако их результаты сложны для применения в инженерной практике. Есть исследования, касающиеся общих принципов управления инженерными системами здания и осуществления энергосбережения в данных условиях [18, 19], но из-за своего общего характера в них также нет интересующих нас конкретных зависимостей. Таким образом, продолжение исследований в данной области с целью получения зависимостей, которые являются достаточно точными и учитывающими большинство существенных для

задачи факторов, но в то же время имеющих инженерный вид, представляется актуальным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В публикации [20] автором было показано, что основное дифференциальное уравнение баланса конвективной теплоты в помещении, обслуживаемом воздушной системой кондиционирования воздуха, управляемой по интегральному закону, после подстановки $z = \sqrt{\tau}$, где τ — интервал времени, с; c — момента начала процесса, можно преобразовать к следующему простому виду:

$$\frac{d^2\theta_B}{dz^2} + Cz\theta_B = 0, \quad (1)$$

где $\theta_B = (t_B - t_{B,0})$; K — отклонение текущей величины температуры воздуха в помещении t_B от ее контролируемого уровня (уставки) $t_{B,0}$, поскольку нас интересует главным образом оно, а не абсолютное значение t_B .

Параметр $C = 4A/B$, $c^{-3/2}$, причем A здесь вычисляется по соотношению [9, 20]:

$$A = G_{\Pi} c_B K_{\text{рег}} / 3,6, \quad (2)$$

где G_{Π} — массовый расход приточного воздуха, кг/ч; c_B — удельная теплоемкость воздуха, равная 1,005 кДж/(кг·К); $K_{\text{рег}}$ — эквивалентный коэффициент передачи автоматизированной системы, c^{-1} , по каналу $\langle t_B \rightarrow$ производная от $t_{\Pi} \rangle$.

Коэффициент B определяется по формуле [9, 18]:

$$B = \sum [A_m \sqrt{\lambda_{cp}}]_i, \quad (3)$$

где λ , c и ρ — это соответственно теплопроводность, Вт/(м·К), удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), и плотность материала слоя i -го массивного ограждения, обращенного внутрь помещения, в частности, наружной стены, внутренних стен и перегородок, а также междуэтажных перекрытий; A_m — площадь каждого из перечисленных ограждений, m^2 . Значит, рассматриваемое приближение справедливо в условиях, когда можно принимать глубину проникания температурной волны в массив ограждающих конструкций пропорциональной величине $z = \sqrt{\tau}$.

Несмотря на относительную простоту, уравнение (1) является нелинейным, к тому же имеет особенность при $z = 0$, поэтому операционные методы для его решения непосредственно применять нельзя. В упомянутой работе [20] было получено аналитическое решение с помощью разложения искомой функции в ряд по степеням z методом неопределенных коэффициентов. Используя очевидные начальные условия при $\tau = 0$, а именно $\theta_0 = 0$ и $d\theta_B/dz = 2Q_{\text{пост}}/B$, где $Q_{\text{пост}}$ — поступающий в помещение поток конвективной теплоты от источников, Вт, можно записать соответствующее уравнение в такой форме:

$$\theta(z) = \frac{2Q_{\text{пост}}}{B} \left[\frac{z - \frac{C}{3 \cdot 4} z^4 + \frac{C^2}{3 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7} z^7 - \dots}{-\frac{C^3}{3 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 9 \cdot 10} z^{10} + \dots} \right]. \quad (4)$$

Однако целесообразно выполнить его дополнительный анализ, поскольку общность данного соотношения и некоторые возможности его применения для инженерных оценок пока не являются очевидными. Прежде всего нетрудно заметить, что ряд (4) можно представить в следующем виде:

$$\theta(z) = \frac{2Q_{\text{пост}}}{BC^{1/3}} f(y) = \frac{1,26Q_{\text{пост}}}{\sqrt[3]{AB^2}} f(y), \quad (5)$$

где $1,26 = \sqrt[3]{2}$, $y = Cz^3 = C\tau^{3/2}$, а функция $f(y)$ выражается следующим образом:

$$f(y) = y^{1/3} \left[\frac{1 - \frac{y}{3 \cdot 4} + \frac{y^2}{3 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7} - \dots}{-\frac{y^3}{3 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 9 \cdot 10} + \dots} \right]. \quad (6)$$

Очевидно, что y — теперь уже безразмерный параметр, по физическому смыслу представляющий собой безразмерное время и учитывающий теплоинерционные свойства ограждений помещения и параметры системы автоматизации оборудования его климатических систем. Поэтому выражение (6) фактически играет роль уравнения подобия, выполняющегося для любых объектов независимо от их конкретных характеристик, в качестве которых выступают в данном случае коэффициенты A , B и C , разумеется, в пределах справедливости тех допущений, которые были нами приняты при его выводе. Поэтому достаточно один раз исследовать зависимость (6) для получения результатов, которыми можно будет воспользоваться при расчете теплового режима произвольного помещения и синтезе соответствующей системы автоматического управления для климатического оборудования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вычисление суммы ряда (6) с любой необходимой точностью проще всего выполнить численно, с помощью программы для ЭВМ. Для этого удобно записать следующую рекуррентную формулу для i -го члена ряда в скобках:

$$f_i = \frac{-y f_{i-1}}{3i(3i+1)}, \quad (7)$$

где, очевидно, $f_0 = 1$. График получаемой функции представлен на рис. 1 сплошной линией. Для поиска максимума находим производную $d\theta/dz$, выражение для которой после замены $y = Cz^3$ будет выглядеть так:

$$\frac{d\theta_B}{dz} = \frac{2Q_{\text{пост}}}{B} g(y),$$

где

$$g(y) = 1 - \frac{y}{3} + \frac{y^2}{3 \cdot 4 \cdot 6} - \frac{y^3}{3 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 9} + \dots \quad (8)$$

Рекуррентная формула для i -го слагаемого, как нетрудно убедиться, будет иметь вид:

$$g_i = \frac{-y g_{i-1}}{3i(3i-2)}, \quad (9)$$

где, как и для $f(y)$, начальный член $g_0 = 1$. Графически поведение функции $g(y)$ показано также на рис. 1 пунктиром. Аналогично $f(y)$, данная функция также является универсальной и не связана с конкретными параметрами рассматриваемого объекта.

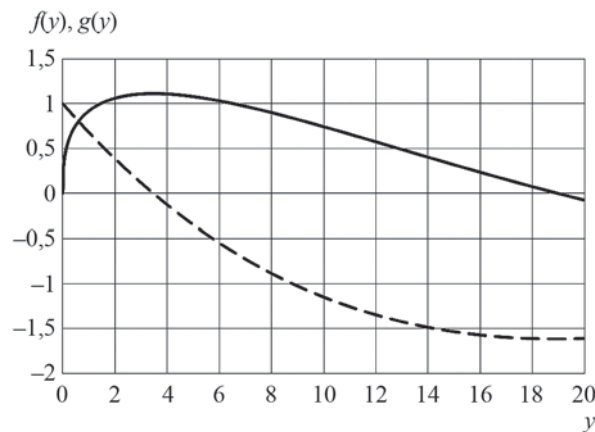


Рис. 1. Графики функций $f(y)$ и $g(y)$, рассчитанные по уравнениям (6) и (8)

Fig. 1. Graphs of functions $f(y)$ and $g(y)$ calculated from equations (6) and (8)

Расчеты показывают, что $d\theta/dz = 0$ при $y = 3,48$, и, соответственно, максимальное значение $f(y)_{\text{max}} = 1\frac{1}{9}$ (точно), откуда с учетом определения параметра C находим:

$$\tau_{\text{max}} = 0,911 \left(\frac{B}{A} \right)^{2/3}; \quad \theta_{\text{max}} = \frac{1,4 Q_{\text{пост}}}{\sqrt[3]{AB^2}}. \quad (10)$$

Здесь множитель $0,911 = (3,48/4)^{2/3}$, а $1,4 = 1,26 \cdot 1\frac{1}{9}$. Полученная формула для θ_{max} совпадает с приведенной в работе [20], что дает дополнительное обоснование ее правильности.

Благодаря тому, что выражения (6) и (8) для $f(y)$ и $g(y)$ не содержат в явном виде каких-либо индивидуальных характеристик помещения и его климатического оборудования, а также систем их автоматизации, приведенные на рис. 1 графики можно использовать для любого объекта с соответствующим пересчетом при переходе к размерным параметрам. На первый взгляд это представляется парадоксаль-

ным, однако данный результат позволяет сделать вывод, что теория подобия в силу ее достаточной общности сохраняет применимость и к таким весьма сложным процессам, к которым относится нестационарный тепловой режим помещения с массивными ограждениями и регулированием систем обеспечения микроклимата по интегральному закону. Для этого достаточно, чтобы процесс описывался своим дифференциальным уравнением или системой таких уравнений, и чтобы они вместе со своими начальными и граничными условиями допускали преобразование к безразмерному виду. В данном случае все эти требования выполняются.

Таким образом, мы получаем, что поведение температуры воздуха в помещении в рассматриваемом режиме описывается единой зависимостью в форме (6). Одновременно можно оценить и время регулирования — момент, при котором восстанавливается первоначальное значение t_B , т.е. $\theta = 0$. Вычисления дают нам здесь значение $y = 19$, откуда получаем:

$$\tau_{\text{рег}} = 2,83 \left(\frac{B}{A} \right)^{2/3}. \quad (11)$$

Здесь коэффициент $2,83 = (19/4)^{2/3}$. В условиях примера, использованного в работе [20], а именно при $B = 12\,000 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{К}$; $A = 0,25 \text{ Вт}/(\text{К} \cdot \text{с})$, находим $\tau_{\text{рег}} = 3740 \text{ с}$, или 1,04 часа, что представляется достаточно удовлетворительным. Заметим при этом, что в выражение (11), так же, как и в формулу (7), для времени τ максимального отклонения температуры от уставки не входит величина $Q_{\text{пост}}$. Это является одним из следствий универсального характера функции $f(y)$.

Можно также отметить, что в основном интересующем нас интервале времени от 0 до $\tau_{\text{рег}}$ можно воспользоваться принципом экономизации степенных рядов и записать упрощенное выражение для $f(y)$, содержащее только три первых члена суммы, вплоть до квадратичного по y . Числовые коэффициенты в нем подбираются, исходя из наилучшего совпадения значений с полной суммой, а контрольных параметров $f(y)_{\text{max}}$, τ_{max} и $\tau_{\text{рег}}$ — с вычисляемыми по формулам (10), (11). Итоговая зависимость тогда будет иметь вид:

$$f(y) = y^{1/3} \left[1 - \frac{y}{12,4} + \frac{y^2}{675} \right]. \quad (12)$$

О качестве получаемой аппроксимации можно судить по рис. 2, где график, рассчитанный по формуле (12), изображен пунктиром. Легко видеть, что расхождения во всех случаях не превышают 1–2 %, что с учетом известной приближенности исходного уравнения в силу сделанных при его выводе допущений представляется совершенно несущественным. В то же время выражение (12) очень просто вычисляется и допускает дальнейший анализ.

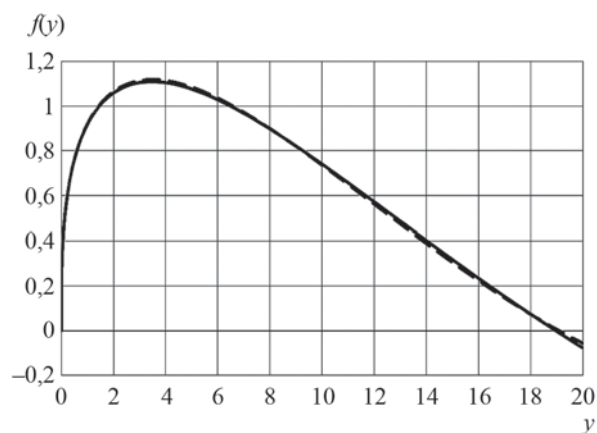


Рис. 2. Графики функции $f(y)$: сплошная линия — по уравнению (6); пунктир — по (12)

Fig. 2. Graphs of the function $f(y)$: solid line — by equation (6); dotted line — by (12)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования в целом подтверждена первоначальная гипотеза о том, что зависимость величины t_b в помещении, обслуживаемом системами обеспечения микроклимата с интегральными регуляторами, для скачкообразного изменения теплопоступлений, по крайней мере, для начального диапазона значений τ , является степенной и имеет максимум для определенного момента времени с последующим асимптотическим стремлением к нулю. Кроме того, можно сделать следующие выводы:

- полученная безразмерная зависимость представима в универсальном безразмерном виде, пригодном для использования в любых объектах независимо от их конкретных характеристик, в пределах справедливости сделанных в работе допущений, как произведение степенной функции с показателем $1/3$ и бесконечного ряда по степеням независимой переменной, который допускает экономизацию с сохранением первых трех членов в интересующем нас диапазоне значений аргумента;

- подтверждено, что наибольшее отклонение t_b от уставки (динамическая ошибка регулирования) пропорционально величине скачка теплопоступлений и обратно пропорционально коэффициенту передачи регулятора и расходу воздуха в системе кондиционирования, взятых в степени $1/3$, а также уменьшается с ростом собственной теплоустойчивости помещения;

- время регулирования, т.е. момент возвращения величины t_b к контролируемому значению, обратно пропорционально коэффициенту передачи регулятора и расходу воздуха в системе кондиционирования, взятых в степени $2/3$, и растет с увеличением собственной теплоустойчивости помещения.

Дальнейшее развитие представленного исследования может быть связано с распространением полученных результатов на другие варианты конструктивных решений климатических систем, например, с использованием местного охлаждения, а также с уточнением условий применимости найденных зависимостей в отношении допустимого диапазона теплотехнических параметров помещения и коэффициентов передачи регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кувишинов Ю.Я. Энергосбережение в системе обеспечения микроклимата зданий. М.: МГСУ – Изд-во АСВ, 2010. 319 с.
2. Tarasova D., Petritchenko M. Buildings quasi-stationary thermal behavior // Magazine of Civil Engineering. 2017. № 4 (72). Pp. 28–35. DOI: 10.18720/MCE.72.4
3. Рафальская Т.А., Березка А.К., Савенков А.А. Теоретическое исследование теплозащиты ограждающих конструкций зданий при аварийном теплоснабжении // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: мат. X Всеросс. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2017. С. 213–218.
4. Малявина Е.Г. Расчет темпа остывания помещения после отключения теплоснабжения // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 2. С. 55–58.
5. Дорошенко А.В. Имитационная термодинамическая модель здания // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 12. С. 42–43.
6. De Rosa M., Bianco V., Scarpa F., Tagliafico L.A. Modelling of energy consumption in buildings: an assessment of static and dynamic models // Russian Journal of Construction Science and Technology. 2016. Vol. 2. Issue 1. Pp. 12–24. DOI: 10.15826/rjcs.2016.1.002
7. Liu C.-S. An integral equation method to recover non-additive and non-separable heat source without initial temperature // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 97. Pp. 943–953. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.003
8. Ryzhov A., Ouerdane H., Gryazina E., Bischi A., Turitsyn K. Model predictive control of indoor microclimate: existing building stock comfort improvement // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 179. Pp. 219–228. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.046
9. Самарин О.Д. Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах для обеспечения надежности их теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 4. С. 496–501. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.496-501

10. Blázquez C.S., Martín A.F., Nieto I.M., González-Aguilera D. Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of a geothermal installation // *Energies*. 2017. Vol. 10. Issue 6. P. 795. DOI: 10.3390/en10060795

11. Ozturk A. Overall heat transfer coefficient of functionally graded hollow cylinder // *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 267. Pp. 177–181. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.267.177

12. Li N., Chen Q. Experimental study on heat transfer characteristics of interior walls under partial-space heating mode in hot summer and cold winter zone in China // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 162. P. 114264. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114264

13. Marino B.M., Muñoz N., Thomas L.P. Estimation of the surface thermal resistances and heat loss by conduction using thermography // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 114. Pp. 1213–1221. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.033

14. Bilous I.Yu., Doshko V.I., Sukhodub I.O. Building inside air temperature parametric study // *Magazine of Civil Engineering*. 2017. Vol. 68. Issue 08. Pp. 65–75. DOI: 10.5862/MCE.68.7

15. Faouzi D., Bibi-Triki N., Draoui B., Abène A. Modeling a fuzzy logic controller to simulate and optimize the greenhouse microclimate management using MATLAB SIMULINK // *International Journal of*

Mathematical Sciences and Computing. 2017. Vol. 3. Issue 3. Pp. 12–27. DOI: 10.5815/ijmsc.2017.03.02

16. Latif M., Nasir A. Decentralized stochastic control for building energy and comfort management // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 24. P. 100739. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100739

17. Serale G., Fiorentini M., Capozzoli A., Bernardini D., Bemporad A. Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: problem formulation, applications and opportunities // *Energies*. 2018. Vol. 11. Issue 3. P. 631. DOI: 10.3390/en11030631

18. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devotofrancesco A., Ghellere M. et al. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 25. P. 100772. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100772

19. Sha H., Xu P., Yang Z., Chen Y., Tang J. Overview of computational intelligence for building energy system design // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 108. Pp. 76–90. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.018

20. Самарин О.Д. Расчет теплового режима помещения при использовании интегральных регуляторов для климатических систем // *Известия вузов. Строительство*. 2020. № 2. С. 28–35. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-734-2-28-35

Поступила в редакцию 23 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 23 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 23 апреля 2021 г.

ОБ АВТОРЕ: Олег Дмитриевич Самарин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1708-9583; samarinod@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Kuvshinov Yu.Ya. *Energy saving in the building microclimate system*. Moscow, MGSU – ASV Publ., 2010; 320. (rus.).
2. Tarasova D., Petritchenko M. Buildings quasi-stationary thermal behavior. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 4(72):28-35. DOI: 10.18720/MCE.72.4
3. Rafalskaya T.A., Beryozka A.K., Savenkov A.A. Theoretical study of thermal protection of building envelopes in case of emergency heat supply. *Topical issues of architecture and construction: papers of 10th All-Russian science and technical conference*. Novosibirsk, 2017; 213-218. (rus.).
4. Malyavina E.G. Calculation of the rate of cooling of a room after turning off the heat supply. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 2:55-58. (rus.).
5. Doroshenko A.V. Simulation thermodynamic model of the building. *Bulletin of Construction Equipment*. 2017; 12:42-43. (rus.).
6. De Rosa M., Bianco V., Scarpa F., Tagliafico L.A. Modelling of energy consumption in buildings: an assessment of static and dynamic models. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2016; 2(1):12-24. DOI: 10.15826/rjctst.2016.1.002
7. Liu C.-S. An integral equation method to recover non-additive and non-separable heat source without initial temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 97:943-953. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.003
8. Ryzhov A., Ouerdane H., Gryazina E., Bischi A., Turitsyn K. Model predictive control of indoor microclimate: existing building stock comfort improvement. *Energy Conversion and Management*. 2019; 179:219-228. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.046
9. Samarina O.D. The calculation of building cooling under emergency conditions to ensure their heating reliability. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State

University of Civil Engineering]. 2019; 14(4):496-501. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.496-501 (rus.).

10. Blázquez C.S., Martín A.F., Nieto I.M., González-Aguilera D. Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of a geothermal installation. *Energies*. 2017; 10(6):795. DOI: 10.3390/en10060795

11. Ozturk A. Overall heat transfer coefficient of functionally graded hollow cylinder. *Solid State Phenomena*. 2017; 267:177-181. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.267.177

12. Li N., Chen Q. Experimental study on heat transfer characteristics of interior walls under partial-space heating mode in hot summer and cold winter zone in China. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 162:114264. DOI: 10.1016/j.applthermaleng. 2019. 114264

13. Marino B.M., Muñoz N., Thomas L.P. Estimation of the surface thermal resistances and heat loss by conduction using thermography. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 114:1213-1221. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.033

14. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building inside air temperature parametric study. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 68(08):65-75. DOI: 10.5862/MCE.68.7

15. Faouzi D., Bibi-Triki N., Draoui B., Abène A. Modeling a Fuzzy Logic Controller to Simulate and Op-

timize the Greenhouse Microclimate Management using MATLAB SIMULINK. *International Journal of Mathematical Sciences and Computing*. 2017; 3(3):12-27. DOI: 10.5815/ijmsc.2017.03.02

16. Latif M., Nasir A. Decentralized stochastic control for building energy and comfort management. *Journal of Building Engineering*. 2019; 24:100739. DOI: 10.1016/j.job.2019.100739

17. Serale G., Fiorentini M., Capozzoli A., Bernardini D., Bemporad A. Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: problem formulation, applications and opportunities. *Energies*. 2018; 11(3):631. DOI: 10.3390/en11030631

18. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Ghellere M. et al. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering*. 2019; 25:100772. DOI: 10.1016/j.job.2019.100772

19. Sha H., Xu P., Yang Z., Chen Y., Tang J. Overview of computational intelligence for building energy system design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 108:76-90. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.018

20. Samarina O.D. The calculation of the thermal mode of a room using the integral controllers for the climate control systems. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 2:28-35. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-734-2-28-35 (rus.).

Received December 23, 2020.

Adopted in revised form on April 23, 2021.

Approved for publication on April 23, 2021.

BIONOTES: Oleg D. Samarina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1708-9583; samarinod@mgsu.ru.

Постобработка осадков станций обезжелезивания для выявления их ресурсного потенциала

Л.И. Максимов, В.В. Миронов, С.В. Максимова, К.В. Кусков

Тюменский индустриальный университет (ТИУ); г. Тюмень, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Осадок промывных вод станции обезжелезивания подземных вод — это крупнотоннажный техногенный отход, представляющий опасность для окружающей среды. Однородный химический состав и мелкодисперсная структура осадка позволяют рассматривать его как ценное сырье для производства разнообразной продукции в условиях поступательного движения к циркулярной экономике. Получение наноразмерных металлопорошков из осадка станций обезжелезивания обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными физическими, химическими и механическими методами. Для оптимизации процесса получения высокодисперсных металлопорошков из осадка станций обезжелезивания необходимо изучение влияния основных технологических параметров на размеры, форму и химический состав конечного материала.

Материалы и методы. Термообработка осадка станции обезжелезивания в среде монооксида углерода проводилась в температурном интервале 400–600 °С. Для получения представления об истинных размерах частиц использовано ультразвуковое диспергирование. Гранулометрический состав осадка исследован методами электронной микроскопии и рассеивания лазерного луча.

Результаты. Приведены результаты экспериментальных исследований гранулометрического состава обработанного осадка станций обезжелезивания. Частицы, полученные при температуре 450 °С, имели наиболее выраженную сферическую форму, низкую открытую пористость и низкую степень адгезии с соседними частицами, что служит ключевыми свойствами для продуктов на основе микро- и нанопорошков. Повышение температуры обработки осадка привело в результате развития процессов кристаллизации к адгезии частиц и сплавлению их в крупные агрегаты с хрупкой структурой.

Выводы. Предложенные методы физико-химической обработки в среде монооксида углерода и ультразвукового воздействия осадка станции обезжелезивания, являющегося в настоящее время техногенным отходом, дают возможность получить высокодисперсный металлопорошок, обладающий необходимыми свойствами для использования в современных высокотехнологичных отраслях промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: станция обезжелезивания, осадок, утилизация, циркулярная экономика, восстановление железа, железо, нанопорошки

Благодарности: Авторы выражают благодарность сотрудникам Физико-технического института ТюмГУ Ф.К. Шабиеву и Р.Ф. Сафаргалиеву за поддержку при проведении ультразвукового диспергирования и сканирующей электронной микроскопии, сотруднику ЦПИИР ТИУ В.С. Орлову за проведение гранулометрического анализа частиц, а также анонимным рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Максимов Л.И., Миронов В.В., Максимова С.В., Кусков К.В. Постобработка осадков станций обезжелезивания для выявления их ресурсного потенциала // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 4. С. 493–505. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.493-505

Iron removal stations' sludges postprocessing for its resource potential identification

Lev I. Maksimov, Viktor V. Mironov, Svetlana V. Maksimova, Konstantin V. Kuskov

Industrial University of Tyumen (IUT); Tyumen, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The sludge of the washing waters of the underground water iron removal station is a large-tonnage technogenic waste that is dangerous for the environment. The homogeneous chemical composition and finely dispersed structure of the sludge make it possible to consider it as a valuable raw material for the production of various products in the conditions of a forward movement towards a circular economy. Obtaining nanosized metal powders from the sludge of iron removal stations has a number of advantages over traditional physical, chemical and mechanical methods. To optimize the process of obtaining highly dispersed metal powders from the sludge of iron removal stations, it is necessary to study the influence of the main technological parameters on the size, shape and chemical composition of the final material.

Materials and methods. Thermal treatment of the sludge of the iron removal station in the carbon monoxide medium was carried out in the temperature range of 400–600 °C. Ultrasonic dispersion was used to get an idea of the true particle size. The granulometric composition of the sludge was studied by electron microscopy and laser beam scattering.

Results. The results of experimental studies of the granulometric composition of the treated sludge of iron removal stations are presented. The particles obtained at a temperature of 450 °C had the most pronounced spherical shape, low open porosity, and a low degree of adhesion to neighboring particles. These properties are key for micro- and nanopowder-based

products. An increase in the temperature of sludge processing led to the adhesion of particles and their fusion into large aggregates with a brittle structure as a result of the development of crystallization processes.

Conclusions. The proposed methods of physicochemical treatment in an environment of carbon monoxide and ultrasonic action of the sludge of an iron removal station, which is currently a technogenic waste, makes it possible to obtain a highly dispersed metal powder. This material has the necessary properties for use in modern high-tech industries.

KEYWORDS: iron removal station, sludge, utilization, circular economy, iron, reduction of iron, nanopowders

Acknowledgements: The authors are grateful to the staff of the Physico-Technical Institute of Tyumen State University F.K. Shabiev and R.F. Safargaliev for support in ultrasonic dispersion and scanning electron microscopy, and V.S. Orlov from CPRI of IUT for carrying out particle size analysis, as well as to anonymous reviewers.

FOR CITATION: Maksimov L.I., Mironov V.V., Maksimova S.V., Kuskov K.V. Iron removal stations' sludges postprocessing for its resource potential identification. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):493-505. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.493-505 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка воды подземных источников, рекомендуемых для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения, сопровождается образованием промывных вод скорых фильтров, количество которых может достигать 28 % от производительности станции водоподготовки. При повышенных концентрациях железа в подземных водах, что характерно для Западно-Сибирского артезианского бассейна, промывные воды содержат соединения железа в количестве до 170–210 мг/дм³ [1].

Создание систем повторного использования промывных вод позволяет сократить расход воды на собственные нужды станции и исключить сброс промывных вод в окружающую среду [2–4].

Осадок промывных вод станции обезжелезивания подземных вод (СОПВ) представлен в основном оксидами железа (до 82 %) [5, 6]. Как показали электронно-микроскопические исследования, размеры большинства неагломерированных частиц осадка не превышают 0,035 мкм [7]. Размер частиц осадка зависит от способа его предварительной обработки. При смачивании в жидкой среде и обработке ультразвуком доля частиц осадка с размером 5,3 мкм возросла на 30 % по сравнению с необработанным осадком [6]. Химический состав осадка СОПВ и его мелкодисперсная структура представляют опасность для почв и атмосферы при депонировании осадка на полигонах [8]. По размерам частицы сухого осадка можно отнести к загрязняющим веществам, соответствующим классификации РМ 2.5, рост концентрации которых в воздухе представляет серьезную проблему для экологии городов [9].

Высокое содержание соединений железа в осадке и однородная мелкодисперсная структура представляют собой ценные качества, позволяющие рассматривать указанный техногенный отход в качестве сырья для производства разнообразной продукции, что согласуется с принципами циркулярной экономики, которая основана на круговом функционировании замкнутых технологических циклов и является инструментом выполнения ключевых целей устойчивого развития [10–12].

Преобладание в осадке СОПВ соединений железа, обладающих интенсивной окраской, и мелко-

дисперсный состав дали возможность исследователям сделать предположение о применимости осадка в качестве сырья для производства пигментов. Использование железосодержащих осадков в производстве цветных бетонов решает две задачи: улучшение прочностных свойств и внешнего вида изделий [13].

Задача увеличения прочностных характеристик решается введением осадка СОПВ в составы керамических масс для производства мелкоштучных строительных изделий. Доля осадка не должна превышать 8 % по массе¹ [14, 15].

Осадок СОПВ является сырьем для производства сорбентов, предназначенных для извлечения поллютантов из различных сред. Обработка гранул, состоящих из осадка, жидкого стекла и извести, в печи при температуре 200 °С позволила получить водостойкий материал, способный извлекать ионы тяжелых металлов из водных сред [7]. Преимущество сорбентов на основе восстановленного железа заключается в том, что их легко можно удалять вместе с извлеченными загрязнениями с помощью магнитов [16].

Наноструктурированный сорбционный материал на основе осадка СОПВ эффективен для извлечения нефтепродуктов из водных сред благодаря развитой удельной поверхности и магнитным свойствам частиц. С ростом температуры активации осадка наблюдается увеличение соединений магнетита Fe₂O₃ до 20–35 % в температурном интервале от 750 до 1000 °С, что сказывается на магнитных свойствах образцов. Максимум удельной намагниченности и магнитной восприимчивости приходится на образцы, подвергшиеся обжигу при температуре 850 °С. В температурном интервале от 850 до 1000 °С отмечается скачкообразный рост средних размеров частиц магнетита до 38–42 нм [17].

Наноразмерные металлсодержащие порошки являются продуктом, востребованным в аддитивных технологиях, неразрушающей магнитной дефектоскопии, в качестве сырьевого компонента для произ-

¹ Патент 2610603 РФ. Керамическая масса на основе глины с добавлением осадка станций обезжелезивания / Л.И. Максимов, С.В. Максимова, А.В. Пешева, М.В. Кудоманов, С.С. Радаев. Бюл. № 5 от 14.02.2017.

водства LFP-аккумуляторов и катализаторов, в том числе в качестве основы для core-shell катализаторов. Существующие методы — это энергоемкие, высокотехнологичные и, как следствие, дорогостоящие процессы. К физическим методам производства наноразмерных металлопорошков относятся такие, как дуговой разряд, лазерное испарение, конденсация в атмосфере инертного газа, лазерный и струйный пиролиз [18]. Химические методы синтеза нанопорошков отличаются большей технологической простотой, но обладают следующими недостатками. Образование при химических реакциях побочных продуктов снижает химическую чистоту получаемых порошков. Полученные частицы характеризуются размерной неоднородностью и склонны к агрегации [19]. Механические методы получения нанопорошков основаны на структурном разложении крупнозернистых материалов в результате деформации, например, в планетарной мельнице [20]. При измельчении металлического железа возможно его окисление. Перспективны методы производства наноразмерных металлопорошков, основанных на применении кавитационных явлений в жидкостях в результате ультразвуковых колебаний [21].

Использование осадка СОПВ для замены части традиционного сырья, например, при производстве строительных материалов, практически не требует дополнительной обработки. Восстановление соединений железа осадка до соединений, проявляющих магнитные свойства, требует более сложного аппаратного оформления и является достаточно энергоемким, что вызывает необходимость оптимизации технологического процесса [6].

Цель исследования — оптимизация процесса получения высокодисперсных металлопорошков, полученных из осадка СОПВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Преследуя цель всесторонней оценки ресурсного потенциала исследуемого типа техногенных отходов и опираясь на ключевые для потенциальных сфер применения параметры, рассмотренные в предыдущих работах, было принято решение сконцентрироваться на изучении гранулометрических и химических свойств осадков станций водоподготовки подземных вод. Детальное изучение таких свойств требует учета условий обработки химическими и физическими параметрами, направленными на повышение химической чистоты по ключевому компоненту и получению оптимальной дисперсности промежуточного сырья и конечного продукта. Дополнительно стоит учесть влияние технологических особенностей конкретной станции водоподготовки, где были произведены отборы проб, и гидрогеологические параметры используемого водоносного горизонта.

Исследуемые пробы были отобраны с Велижанской станции водоподготовки подземных вод, которая

обеспечивает порядка 40–45 % от общей потребности г. Тюмень питьевой водой. Географически станция располагается в 40 км на север от г. Тюмень. Экстраполяция данных о гидрогеологических условиях этой местности будет достаточно достоверна для большинства территорий Западной Сибири, что также дает нам возможность говорить о применимости результатов исследований на большей части этой территории и за ее пределами при схожей информации. Существующие условия характеризуются высоким уровнем загрязнения соединениями железа при одновременном низком содержании других компонентов, где ионы железа будут занимать от 60 до 85 % от общей массы загрязняющих элементов, а второй по распространенности элемент — кальций — лишь от 10 до 20 %. Это объясняет высокую концентрацию железосодержащих соединений в исследуемом техногенном отходе.

Отбор образцов на Велижанской станции водоподготовки был произведен с боковых поверхностей скорых фильтров, находившихся в осушенном состоянии. Сам осадок также находился в сухом твердом состоянии и имел вид агломератов с низкой прочностью и размером 100 мм по наибольшему измерению. Однако для последующих исследований аналогичные пробы могут быть взяты в составе промывных вод скорых фильтров для последующего осушения.

В качестве основных методов постобработки исследуемых техногенных отходов приняты высокотемпературная обработка в присутствии восстановительной среды и диспергирование ультразвуковым воздействием в жидких средах.

Температура реакции задавалась с учетом следующих требований:

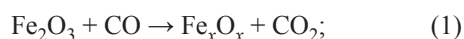
- температура достаточна для активации реакции получения монооксида углерода (CO) из диоксида углерода (CO₂) и углеродсодержащего твердого реагента in situ;
- температура достаточна для активации реакции получения оксидов железа (II) и (II, III) — (FeO и Fe₃O₄) из оксида железа III (α-Fe₂O₃) и монооксида углерода (CO);
- температура не приводит твердые смеси в расплав;
- температура обеспечивает максимальную энергоэффективность процесса;
- обеспечивается наибольшая доступная простота выполнения инженерных мероприятий, обеспечивающих соответствие реальных лабораторных и опытно-промышленных условий проектным.

Опираясь на перечисленные требования, было принято решение о проведении испытаний при диапазоне температур от 400 до 600 °C, с шагом в 50 градусов. Также к этим четырем условиям добавляется один контрольный образец, не получивший температурного воздействия в восстановительной среде.

Для обеспечения полного протекания реакции восстановления и наибольшей простоты дальнейше-

го применения в реальных лабораторно-промышленных и промышленных условиях взят один из самых распространенных и простых в использовании реагентов. Монооксид углерода может быть получен *in situ* с использованием угля (или подобных углеродсодержащих твердотельных реагентов) и двуокиси углерода. Его свойства позволяют использовать довольно низкие температуры — от 400 °С. По сравнению с водородом эта газовая среда имеет меньший уровень взрывоопасности.

Согласно предварительно выбранным реагентам, требующим максимально возможного разграничения создаваемой среды с восстановительным потенциалом от внешней воздушной среды, камера реактора должна обеспечивать непроницаемость для внешней газовой среды и возможность конвекции газа. Конвекция, основанная на разности плотностей компонентов газовой смеси, будет одновременно способствовать протеканию реакций восстановления целевого железосодержащего компонента и регенерации реагирующего газового компонента. Этот процесс можно описать системой из двух уравнений:



где Fe_xO_x — один из оксидов железа, в зависимости от температуры и иных условий протекания реакции.

Этот процесс возможен по двум причинам:

- 1) упомянутая ранее значительная разница плотностей газовых реагентов (1,98 г/см³ для диоксида углерода против 1,25 г/см³ для монооксида углерода);
- 2) очень высокий уровень пористости порошкообразной массы осадка (от 0,18 до 0,3 г/см³) и пористости отдельных частиц (5,25 г/см³ для оксида железа (III) против 2,15 г/см³ для сухого осадка СОПВ). Используя эти данные, можно сделать вывод, что наиболее эффективное протекание химических реакций требует размещения осадка поверх твердых углеродсодержащих компонентов.

Ультразвуковое диспергирование осуществлялось ультразвуковым диспергатором МЕФ93.Т. Эффективная мощность устройства составляла 250 Вт/см², потребляемая мощность равна 600 Вт при рабочей частоте, равной 22 кГц. Все образцы, подвергавшиеся ультразвуковому воздействию, обрабатывались в течение 60 минут.

Для нахождения наиболее эффективной жидкой среды для ультразвуковой обработки осадка СОПВ была использована дистиллированная вода. Такой выбор обусловлен ее повсеместным применением в качестве базовой среды для создания большинства растворов и проведения большинства испытаний. Также такая жидкая среда является наилучшим вариантом с точки зрения технико-экономических характеристик в лабораторно-промышленных и промышленных условиях. Дополнительно к этому стоит помнить, что исходной средой получения исследуемого техногенного сырья также служит вода.

Контроль полученных результатов произведен через проведение анализов химического и гранулометрического состава исследуемых образцов. Исследования химического анализа выполнены методом рентгеноструктурного анализа с использованием программного комплекса TOPAS (TOtal Pattern Analysis Solution).

Гранулометрический состав исходного и пост-обработанного осадка СОПВ был измерен двумя методами:

1. Сканирующим электронным микроскопом (SEM).

2. Лазерным измерителем размера частиц (LPS).

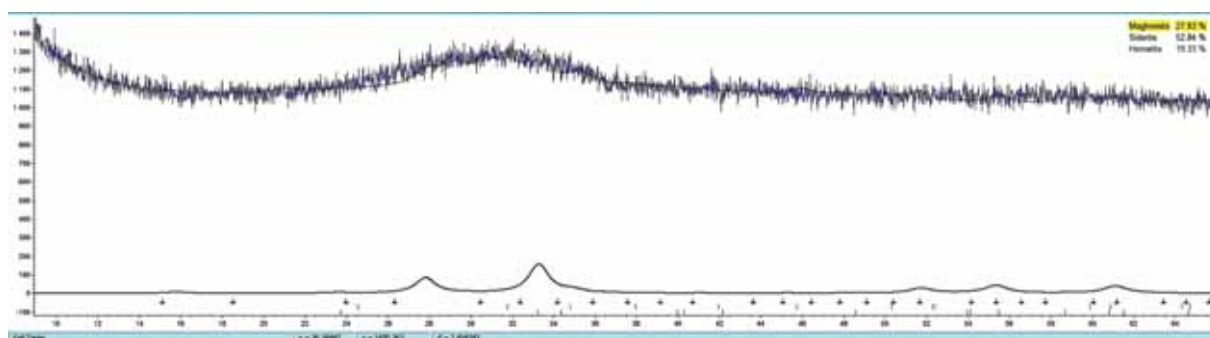
В качестве SEM-микроскопа использован MIRA3 TESCAN. Диапазон энергий падающего на образец электронного пучка — от 200 эВ до 30 кэВ. Его возможное максимальное разрешение составляет 1,2 нм при 30 кэВ и 3,5 нм при 1 кэВ. В качестве LPS-анализатора применен ANALYSETTE 22 NanoTec. Согласно техническому руководству по эксплуатации, его диапазон измерения составляет 0,01–2100 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

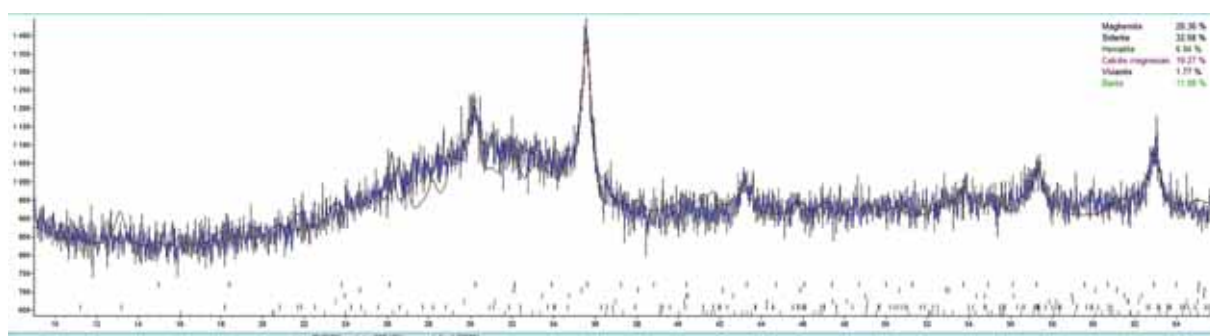
В целях достижения наибольшей репрезентативности результатов, данные о химическом составе были приведены для исходного образца (№ 1) и образцов, подвергшихся термохимической постобработке при минимальной температуре (№ 2), медианной температуре (№ 3) и максимальной температуре (№ 4). Результаты анализа приведены в виде исходных диаграмм (рис. 1) и в виде сводной таблицы (табл. 1).

Сведение всех полученных данных в единую таблицу позволяет наглядно проследить динамику изменений химического состава исследуемого сырья в зависимости от условий постобработки. Так, очевидным является отсутствие информации по целому ряду показателей у исходного образца. Согласно нашим знаниям об условиях генезиса этого техногенного сырья, мы делаем вывод о значительном влиянии большого количества аморфной, не кристаллической фазы на детектирующую способность прибора. Дальнейший анализ табличных сведений выявляет снижение массовой доли карбоната кальция с каждым этапом повышения температуры. Генерируемый в ходе этой реакции углекислый газ будет частично трансформироваться в карбонат железа в виде минерала сидерита. Несмотря на преодоление рубежа в 490 °С, после которого сам сидерит должен разлагаться на оксид железа (II) и углекислый газ, происходит резкий подъем его концентрации в образце № 4. Дополнительно стоит отметить, что во всех термически обработанных образцах оксид железа детектируется в форме минерала маггемита. Опираясь на общеизвестные сведения, мы знаем, что маггемит неустойчив к нагреву и при температуре 400 °С переходит в минерал магнетит. Учитывая это, мы делаем

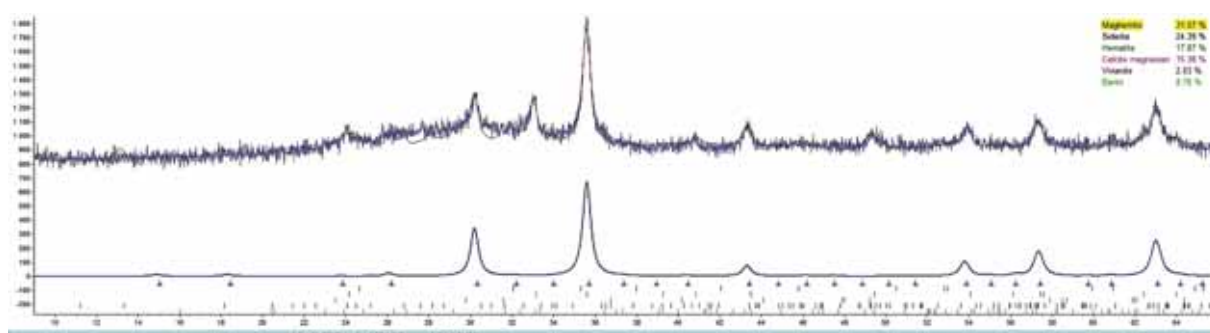
№ 1 Исходный / Initial



№ 2 400 °C



№ 3 500 °C



№ 4 600 °C

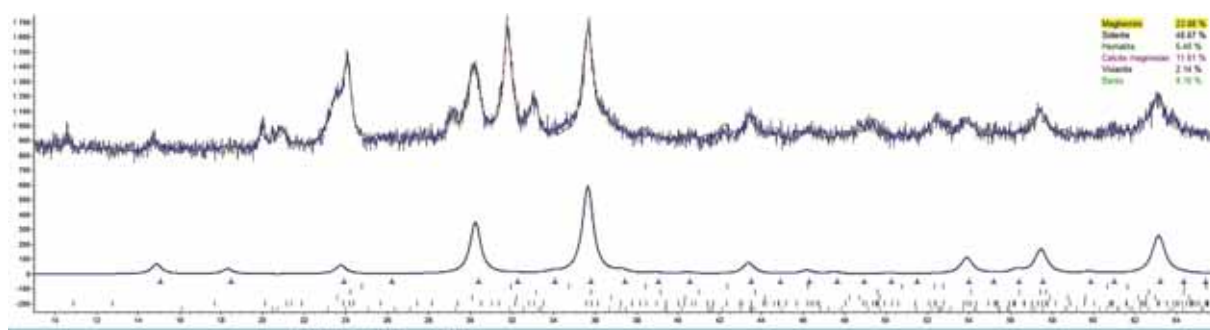


Рис. 1. Исходные диаграммы рентгеноструктурного анализа осадка СОПВ

Fig. 1. Iron removal stations' sludge initial diagrams of X-ray diffraction analysis

Табл. 1. Сводная таблица результатов рентгеноструктурного анализа осадка СОПВ

Table 1. Summary table of iron removal stations' sludge X-ray diffraction analysis results

Вещество/образец, % от общей массы Substance/sample, % of total mass	Формула вещества Formula of the substance	Твердость Hardness	Модуль упругости c_{11} , ГПа Elastic modulus c_{11} , GPa	Номер образца/температура обработки Sample number/processing temperature			
				№ 1 (исходный) (initial)	№ 2 (400 °C)	№ 3 (500 °C)	№ 4 (600 °C)
Маггемит Maghemite	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	5,5–6	273	27,83	28,36	31,57	23,08
Сидерит Siderite	FeCO_3	3,5–4,5	173,7	52,84	32,58	24,39	48,67
Гематит Hematite	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	5,5–6,5	242	19,33	6,94	17,87	6,40
Карбонат кальция Calcite magnesian	CaCO_3	3	137,4	–	19,27	15,38	11,61
Вивианит Vivianite	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	1,5–2	94	–	1,77	2,03	2,14
Барит Barite	BaSO_4	3,5–3,5	188	–	11,08	8,76	8,10

промежуточный вывод о неполной достоверности результатов, определенных автоматическим методом. Однако, базируясь на данных, рассмотренных в ходе предыдущих исследований, о происхождении исследуемого техногенного сырья и его химическом составе, мы выдвигаем гипотезу о том, что реальный состав образцов, восстановленных при 500 и 600 °C, представлен гематитом на 70–85 % от общей массы постобработанного осадка СОПВ¹ [6].

Данные о гранулометрическом составе исходного образца, не подвергавшегося термохимической обработке, приведены на графиках (рис. 2, а, b, c) и микрофотографии (рис. 2, d).

График (рис. 2, а) был получен без использования УЗ. График (рис. 2, b) — при использовании 70 % мощности УЗ-генератора, встроенного непосредственно в лазерный анализатор и имеющего суммарную мощность, равную 30 Вт. График (рис. 2, c) соответствует образцу, подвергавшемуся УЗ-воздействию в среде дистиллированной воды в течение одного часа от диспергатора MEF93.T. Для сравнения приведена микрофотография исследуемого техногенного отхода в исходном состоянии, без УЗ-воздействия. Проанализировав представленную группу графиков и сравнив ее с микрофотографией, сделан вывод об эффективном деагломерирующем УЗ-воздействии низкой мощности. Однако график (рис. 2, b) показывает многократные превышения относительно реальных размеров частиц, видимых на микрофотографии (рис. 2, d), что вынуждает говорить о неполной достоверности метода лазерного анализа размера частиц. Несмотря на достаточную степень совпадения результатов графика (рис. 2, c) и микрофотографии (рис. 2, d), при рассмотрении образца,

имевшего термохимическую обработку при температуре 450 °C в совокупности с диспергирующим УЗ-воздействием и сравнении его графика распределения частиц и микрофотографии, становится очевидным необходимость в дальнейшем опираться только на микрофотографии для анализа гранулометрического состава исследуемой пробы (рис. 3, а, b).

Далее приведены микрофотографии для полного диапазона температур от 400 до 600 °C (рис. 4–8).

На рис. 4 показаны микрофотографии осадка СОПВ, обработанного при 400 °C в среде монооксида углерода. На фотографиях можно увидеть хорошо различимые квазисферические частицы, имеющие развитую внешнюю поверхность, но все еще в значительной степени подверженные слипанию. Вероятнее всего, при этой температуре в образцах остаются соединения легкоплавких соединений, переходящих после 400–440 °C в газообразное состояние или меняющих кристаллическую решетку при переходе из аморфной фазы в кристаллическую.

На рис. 5 представлены микрофотографии осадка СОПВ, обработанного при 450 °C в среде монооксида углерода. Среди всех полученных и изученных образцов именно эти, с точки зрения их морфологии и размера частиц, являются наиболее оптимальными для создания конечных продуктов на их основе. Так, образцы на фотографиях все еще имеют ярко выраженную сферическую форму, крайне низкую открытую пористость и наименьший уровень слипания с соседними частицами относительно всех других образцов, прошедших термообработку. Эти свойства — ключевые для большинства разрабатываемых продуктов на основе микро- и нанопорошков.

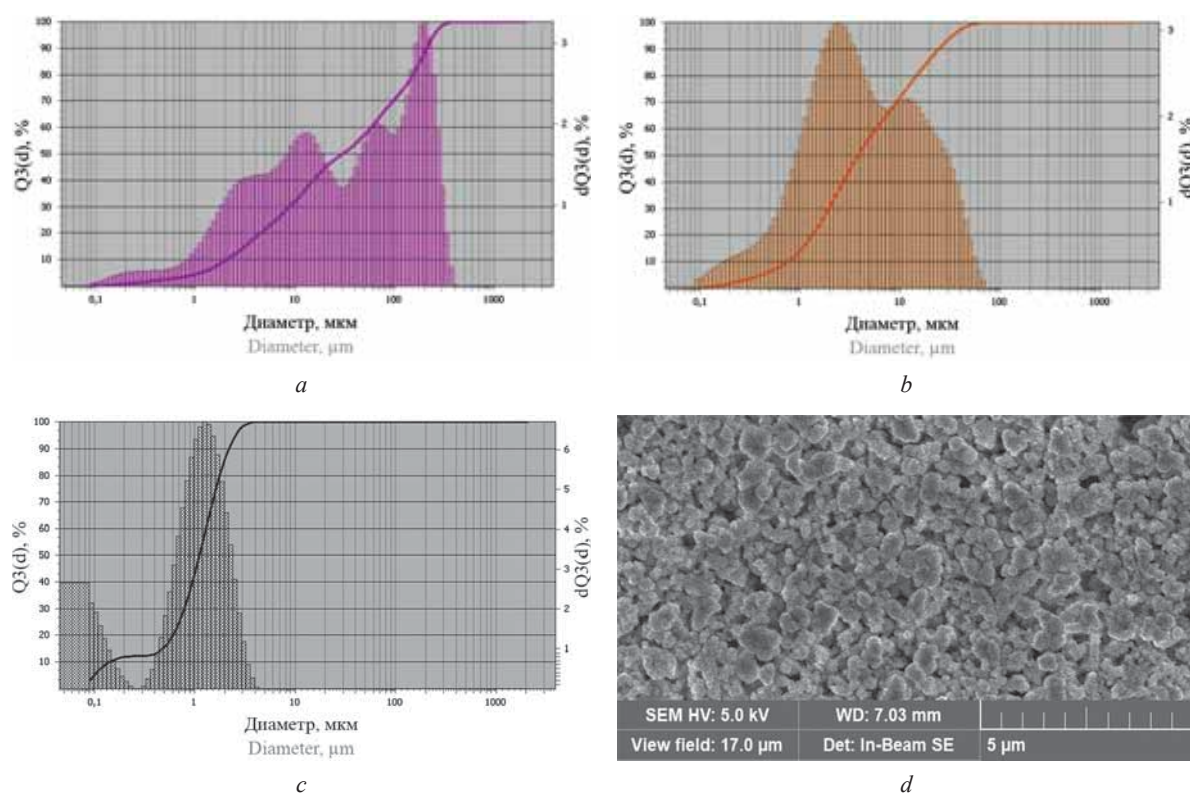


Рис. 2. Данные гранулометрического анализа исходного осадка СОПВ

Fig. 2. Iron removal stations' initial sludge particle size analysis

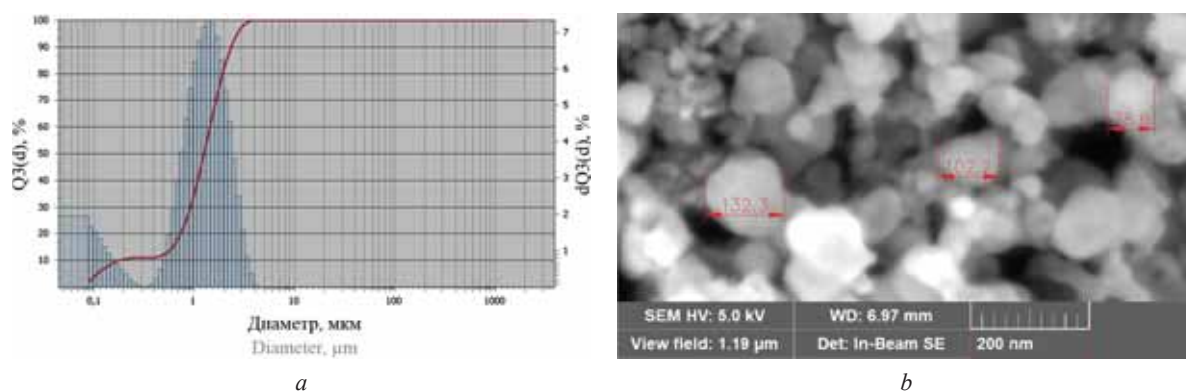


Рис. 3. Данные гранулометрического анализа осадка СОПВ (450 °С, 1 ч УЗ)

Fig. 3. Iron removal stations' sludge particle size analysis (450 °C, 1 hour of ultrasonic treatment)

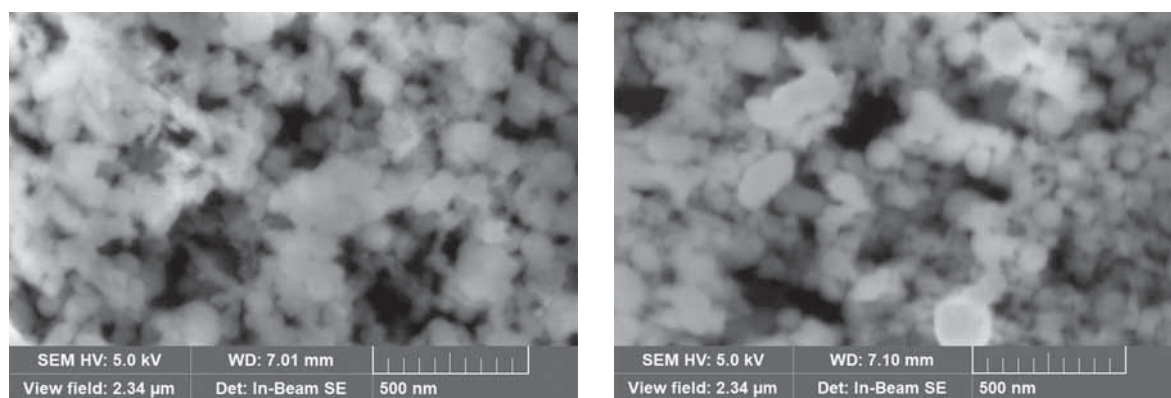


Рис. 4. Микрофотографии осадка СОПВ (400 °С, 1 ч УЗ)

Fig. 4. Iron removal stations' sludge microphotographs (400 °C, 1 hour of ultrasonic treatment)

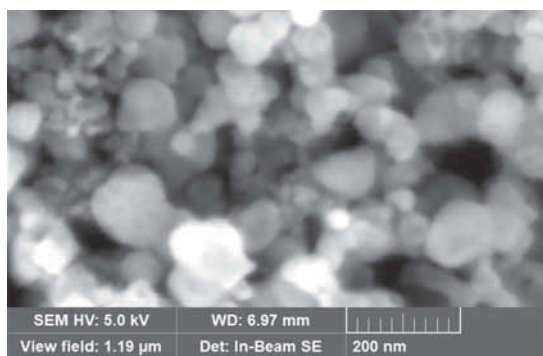


Рис. 5. Микрофотографии осадка СОПВ (450 °С, 1 ч УЗ)

Fig. 5. Iron removal stations' sludge microphotographs (450 °C, 1 hour of ultrasonic treatment)

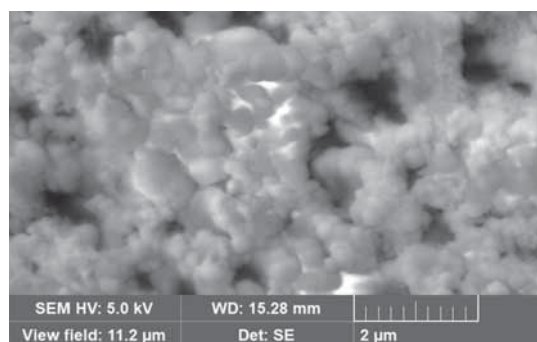
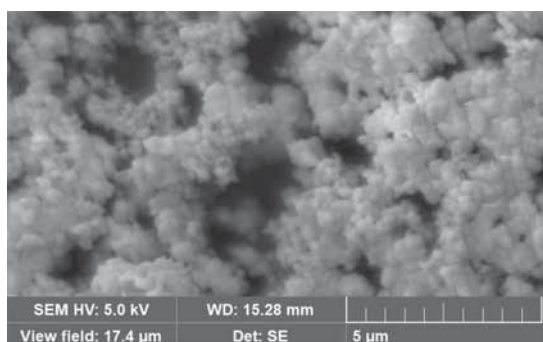


Рис. 6. Микрофотографии осадка СОПВ (500 °С, 1 ч УЗ)

Fig. 6. Iron removal stations' sludge microphotographs (500 °C, 1 hour of ultrasonic treatment)

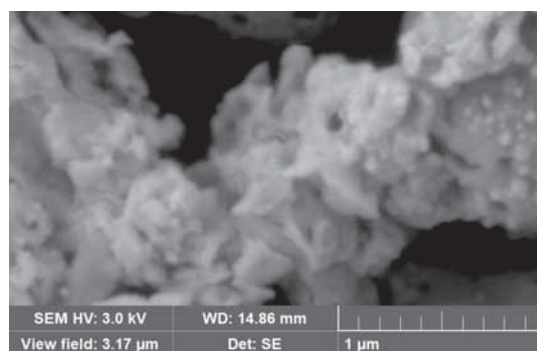
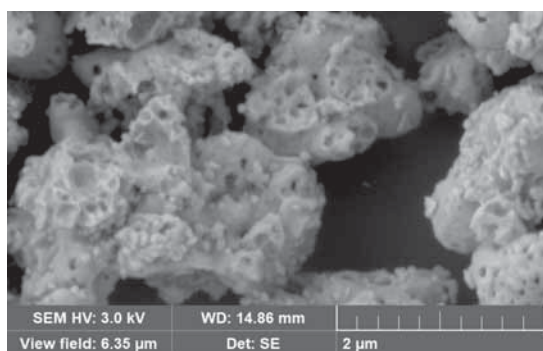


Рис. 7. Микрофотографии осадка СОПВ (550 °С, 1 ч УЗ)

Fig. 7. Iron removal stations' sludge microphotographs (550 °C, 1 hour of ultrasonic treatment)

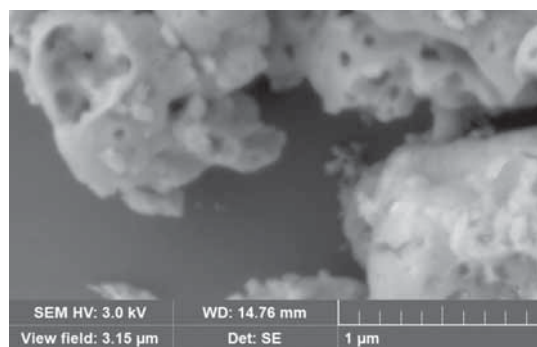
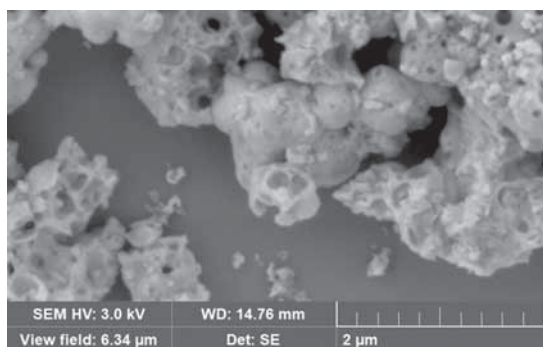


Рис. 8. Микрофотографии осадка СОПВ (600 °С, 1 ч УЗ)

Fig. 8. Iron removal stations' sludge microphotographs (600 °C, 1 hour of ultrasonic treatment)

Микрофотографии осадка СОПВ, обработанного при 500 °С в среде монооксида углерода, продемонстрированы на рис. 6. На фотографиях наблюдается активное развитие процесса слипания частиц в развитые полиморфные системы, у которых все также не наблюдается развитой открытой пористости, но УЗ-воздействия оказанной мощности уже недостаточно для их деагломерации. Это свидетельствует об образовании групп частиц, подвергшихся сплавлению, а значит, их последующий помол может привести к образованию частиц с большей степенью осколочности и меньшей степенью сферичности формы.

На рис. 7 показаны микрофотографии осадка СОПВ, обработанного при 550 °С в среде монооксида углерода. Представленные фотографии отражают общую динамику на повышение сплавления при повышении температуры обработки относительно предыдущих образцов. Помимо множества сколов на поверхности частиц также явно заметна открытая пористость, которая не наблюдалась на предыдущих образцах. Значительная разнородность форм, размеров и степени кривизны поверхности, вызванной развитием открытой пористости и появлением сколов, вынуждают говорить о потенциальном снижении качества продуктов реакции, получаемых при таких температурах в заданных условиях.

Микрофотографии осадка СОПВ, обработанного при 600 °С в среде монооксида углерода, представлены на рис. 8. Образцы во многом имеют схожие свойства с предыдущим образцом, обработанным при 550 °С. Однако еще наблюдается большая степень сплавления и повторная коагуляция открытых пор. В качестве гипотезы стоит предположить, что обработка при больших температурах 700 или 800 °С может дать эффект восстановления сферической формы частиц с одновременной коагуляцией пор, но будет приводить к увеличению размера отдельных частиц. Такой ожидаемый результат не позволит создавать высококачественные наноразмерные порошки. Стоит отметить, что во многих сферах практического использования продуктов на основе микропорошков существует наличие нижних границ гранулометрического состава. Так, нормативный документ для стран Евросоюза, регламентирующий проведение магнитного неразрушающего контроля ISO 9934-1:2016 «Non-destructive testing — Magnetic particle testing», обозначает нижний лимит 1,5 мкм для 90 % и более от общего количества частиц в средах магнитного неразрушающего контроля.

В качестве предварительного вывода по итогу исследования гранулометрического состава, наилучшими показателями с точки зрения формы, размера, пористости и степени деагломерированности обладают образцы, полученные при температуре 450 °С (табл. 2). Учитывая, что создание и поддержание такой температуры требует значительно меньших энергозатрат, нежели 600 °С и более, возможно го-

ворить о повышении энергоэффективности процесса получения относительно большинства существующих наукоемких и энергоемких методов получения сферических частиц, имеющих нано- и субмикронный размер.

Табл. 2. Сводная таблица результатов гранулометрического анализа осадка СОПВ

Table 2. Summary table of iron removal stations' sludge particle size analysis results

Номер образца/ температура обработки Sample number/ processing temperature	Визуально наблюдаемая фракция, мкм Visually observable fraction, μm			
	d10	d50	d80	d90
№ 1 — 400 °С	0,1	0,16	0,22	0,25
№ 2 — 450 °С	0,04	0,12	0,18	0,2
№ 3 — 500 °С	0,4	0,6	1,05	1,2
№ 4 — 550 °С	0,6	1,2	1,7	2,8
№ 5 — 600 °С	0,9	2,1	4,5	5,3

Принципиально важным является условие, что все исследованные образцы были получены в статическом слое, т.е. без создания псевдокипящего слоя или газодинамического вихревого высокотемпературного потока. Теоретически, создание последнего способно будет частично или полностью нивелировать потерю качества порошковых материалов за счет постоянного окатывания о стенки реактора, имея при этом повышенные вязкостные свойства и сниженную хрупкость частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основываясь на совокупности полученных результатов, становится возможным сделать вывод, что оптимальным режимом постобработки осадка СОПВ с указанным химическим составом или близким к нему является восстановление в среде монооксида углерода в течение 1 ч при температуре 450 °С с последующей обработкой УЗ-воздействием в течение 60 минут при эффективной мощности 250 Вт/см² в среде дистиллированной воды. Использование меньших температур, например 400 °С, не рационально ввиду недостаточного устранения аморфной и водорастворимой фазы, способной вызывать повторную агломерацию частиц. Вероятно, это связано с наличием водорастворимых соединений кальция, содержание которых может достигать 40 % от общей массы сухого осадка СОПВ. Эти соединения могут частично растворяться и перекристаллизовываться на поверхности осадка, вызывая реагломерацию.

Однако излишнее повышение температуры — от 550 °С и более — приводит к образованию высококристаллизованных структур, обладающих повышенной хрупкостью и переходящих в обломочные

и квазипластинчатые формы под влиянием УЗ-обработки. Это свидетельствует об образовании групп частиц, подвергшихся сплавлению, и, следовательно, их последующее измельчение может привести к образованию частиц с более высокой степенью фрагментации и меньшей степенью сферичности. Помимо множества сколов на поверхности частиц также хорошо видна открытая пористость, чего не наблюдалось в предыдущих образцах.

Данный факт снижает ценность сырья и продуктов на его основе из-за значительного усложнения методики подсчета реальной удельной поверхности порошкового материала, что крайне необходимо при его применении и расчете последующих физико-химических реакций.

Полученные в ходе исследования данные обеспечивают основу для дальнейших исследований и разработок с целью уточнения оптимальных параметров постобработки в целях улучшения свойств конечного продукта, в том числе при изменении параметров сырья, которые не идентичны на разных водоочистных сооружениях, в зависимости от гидрогеологических условий и технологических условий очистки воды.

Результаты подтверждают потенциал реальной применимости железосодержащих порошков в качестве сырьевой базы для создания заявленных ранее конечных продуктов на их основе. Так, магнитные порошки и суспензии на их основе, применяемые для неразрушающего контроля металлических изделий и конструкций, имеют потребность к соответствию по нескольким основным параметрам: магнитная чувствительность, размер частиц и химический состав. На основании этого было проведено первичное сравнение с товарными образцами ведущих производителей отрасли. В качестве наиболее репрезентативных были выбраны сухие магнитные порошки для создания суспензий торговой марки

Magnaflux (Германия). К примеру, MAGNAVIS® 1 Grey имеет средний размер частиц (d_{50}), равный 80 нм, при наличии железа в оксидной форме в диапазоне от 40 до 60 % от общей массы и серый цвет порошка. Это обеспечивает уровень чувствительности SAE, равный 7. Рыночная стоимость 1 кг такого порошка варьируется от 5 до 9 тыс. рублей. Учитывая, что исследованные нами образцы имеют схожие исходные гранулометрические и химические свойства при значительно сниженной себестоимости, мы ожидаем аналогичного результата при использовании в этой сфере.

Дополнительно, используя те же самые свойства — высокую дисперсность, стабильно высокое содержание соединений железа при почти полном отсутствии других химически активных при нормальных условиях соединений, и ярко выраженные ферромагнитные свойства, актуальным является использование таких частиц в роли магнитных ядер катализаторов, выполненных по технологии Core Shell. В катализаторах такого типа само каталитическое вещество высаживается тонким слоем на поверхность частицы-носителя. Это значительно повышает уровень полезного применения веществ-катализаторов, особенно имеющих высокую себестоимость, таких как платина, палладий и проч.

При создании LFP-аккумуляторов, катод которых имеет состав LiFePO_4 , зачастую используются в качестве одного из сырьевых компонентов соединения железа, в том числе его оксиды — Fe_2O_3 и Fe_3O_4 . Повышение дисперсности сырья от микро- до наномасштаба способно увеличить эффективность и энергоёмкость таких аккумуляторных батарей до 30–40 %. На данный момент отрасль активно развивается, что создает высокую актуальную и перспективную потребность в массовом и дешевом получении исходных сырьевых компонентов для их массового производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Москвичева Е.В., Сахарова А.А., Москвичева А.В., Геращенко А.А., Катеринин К.В., Шишенин Д.С. и др. Повышение экологической безопасности станции обезжелезивания // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 47 (66). С. 270–281.
2. Бутко Д.А., Лысов В.А., Поповьян Г.В. Некоторые аспекты создания схем полного оборотного цикла промывных вод станций водоподготовки // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 1 (26). С. 114–118.
3. Житенев Б.Н., Йорданова Л.Е. Очистка промывных вод станций обезжелезивания подземных вод коагулированием в присутствии фосфатов // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 4. С. 553–568. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.553-568
4. Аверина Ю.М., Павлов Д.В., Вараксин С.О. Обезжелезивание воды с замкнутым циклом водопользования // Вода: химия и экология. 2011. № 2 (32). С. 18–22.
5. Усова Н.Т., Кутугин В.А., Лотов В.А., Лукашевич О.Д. Композиционные материалы на основе высокожелезистого шлама водоподготовки // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 3. С. 36–39.
6. Максимов Л.И., Миронов В.В. Совершенствование технологии получения высокодисперсных порошков металлического железа из осадка станции обезжелезивания // Вестник Томского государствен-

ного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 162–173. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-162-173

7. Лукашевич О.Д., Усова Н.Т. Сорбент из железистого шлама для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 1. С. 148–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-1-148-159

8. Popov V.K., Pasechnik E.Yu., Karmanova A. Recycling of iron-containing deposits — the main way to increase the efficiency of water-protective measures on the territory of the Tom lower course // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 85. P. 01013. DOI: 10.1051/mateconf/20168501013

9. Jingyuan D.I., Chong L.I., Marsiliani L. The relationship between growth and the environment in Beijing, using PM_{2.5} concentrations // Review of Business and Economics Studies. 2018. Vol. 6. No. 2. Pp. 5–18.

10. Гурьева М.А. Теоретические основы концепта циркулярной экономики // Экономические отношения. 2019. Т. 9. № 3. С. 2311–2336. DOI: 10.18334/eo.9.3.40990

11. Gureva M.A. Conservation and rational use of natural resources: methods of circular economy assessment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 828. P. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/828/1/012010

12. Lipińska D. The water-wastewater-sludge sector and the circular economy // Comparative Economic Research. Central and Eastern Europe. 2018. Vol. 21. No. 4. Pp. 121–137. DOI: 10.2478/ceer-2018-0030

13. Усова Н.Т., Лукашевич О.Д. Получение пигментов из железосодержащих шламов водоподготовки для использования в строительной отрасли // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (45). С. 198–207.

14. Усова Н.Т., Лотов В.А., Лукашевич О.Д. Водостойкие безавтоклавные силикатные строитель-

ные материалы на основе песка, жидкостекольных композиций и шламов водоочистки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2. С. 276–284.

15. Zou J.L., Xu G.R., Li G.B. Ceramsite obtained from water and wastewater sludge and its characteristics affected by Fe₂O₃, CaO, and MgO // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 165. No. 1–3. Pp. 995–1001. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.113

16. Kumari D., Goswami R., Kumar M., Mazumder P., Kataki R., Shim J. Removal of Cr(VI) ions from the aqueous solution through nanoscale zero-valent iron (nZVI) Magnetite Corn Cob Silica (MCCS): A bio-waste based water purification perspective // Groundwater for Sustainable Development. 2018. Vol. 7. Pp. 470–476. DOI: 10.1016/j.gsd.2017.12.007

17. Novoselova L.Y., Sirotkina E.E. The structure of sorbents based on thermally activated iron-containing water preparation precipitate // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2010. Vol. 84. No. 6. Pp. 1033–1038. DOI: 10.1134/S0036024410060257

18. Rao C.N.R., Thomas P.J., Kulkarni G.U. Nanocrystals: Synthesis, Properties and Applications. Berlin, 2007. 186 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68752-8

19. Uschakov A.V., Karpov I.V., Lepeshev A.A. Plasma-chemical Synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles for doping of high-temperature superconductors // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2017. Vol. 30. No. 2. Pp. 311–316. DOI: 10.1007/s10948-016-3709-6

20. Yadav T.P., Yadav R.M., Singh D.P. Mechanical milling: a top down approach for the Synthesis of nanomaterials and nanocomposites // Nanoscience and Nanotechnology. 2012. Vol. 2. No. 3. Pp. 22–48. DOI: 10.5923/j.nn.20120203.01

21. Pakharukov Y.V., Shabiev F.K., Mavrinskii V.V., Safargaliev R.F., Voronin V.V. Formation of a Wave Structure on the Surface of a Graphene Film // JETP Letters. 2019. Vol. 109. No. 9. Pp. 609–615. DOI: 10.1134/S002136401909011X

Поступила в редакцию 26 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 26 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 26 апреля 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Лев Игоревич Максимов — аспирант; Тюменский индустриальный университет (ТИУ); 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; SPIN-код: 2169-9700, Scopus: 57190855057, ResearcherID: B-8983-2016, ORCID: 0000-0001-6915-4778; maksimovlev93@gmail.com;

Виктор Владимирович Миронов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения; Тюменский индустриальный университет (ТИУ); 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; SPIN-код: 2433-2178, Scopus: 57196778368, ResearcherID: AAN-6967-2019, ORCID: 0000-0001-8939-850X; vvmironov@list.ru;

Светлана Валентиновна Максимова — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения; Тюменский индустриальный университет (ТИУ); 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; SPIN-код: 7626-9213, Scopus: 57191119478, ResearcherID: U-3288-2017, ORCID: 0000-0002-5141-1120; maksimovav@tyuiu.ru;

Константин Викторович Кусков — кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов; Тюменский индустриальный университет (ТИУ); 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; SPIN-код: 2137-8170, Scopus: 57192048601, ORCID: 0000-0002-0698-8545; kuskovkv@tyuiu.ru.

REFERENCES

1. Moskvicheva E.V., Sakharova A.A., Moskvicheva A.V., Gerashchenko A.A., Katerinin K.V., Shishenin D.S. et al. Increase in ecological safety of iron removal station. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2017; 47(66):270-281. (rus.).
2. Butko D.A., Lysov W.A., Popov'yan G.W. Some aspects of creating schemes of complete working cycle for the wash water treatment plants. *Bulletin of Civil Engineers*. 2011; 1(26):114-118. (rus.).
3. Zhytsianiou B.N., Yordanova L.E. Backwash water treatment by coagulation in the presence of phosphates at underground water iron removal stations. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(4):553-568. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.553-568 (rus.).
4. Averina Yu.M., Pavlov D.V., Varaksin S.O. Iron removal in closed cycle water management. *Water: Chemistry and Ecology*. 2011; 2(32):18-22. (rus.).
5. Usova N.T., Kutugin V.A., Lotov V.A., Lukashevich O.D. Composite materials based on highly iron sludge for water treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2011; 319(3):36-39. (rus.).
6. Maksimov L.I., Mironov V.V. Technology improvement of high-dispersive metallic iron powders based on sediments of iron removal station. *Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22(2):162-173. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-162-173 (rus.).
7. Lukashevich O.D., Usova N.T. Iron sludge sorbing agent for sewage purification from heavy metal ions. *Journal of Construction and Architecture*. 2018; 20(1):148-159. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-1-148-159 (rus.).
8. Popov V.K., Pasechnik E.Yu., Karmanova A. Recycling of iron-containing deposits — the main way to increase the efficiency of water-protective measures on the territory of the Tom lower course. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 85:01013. DOI: 10.1051/mateconf/20168501013
9. Jingyuan D.I., Chong L.I., Marsiliani L. The relationship between growth and the environment in Beijing, using PM2.5 concentrations. *Review of Business and Economics Studies*. 2018; 6(2):5-18.
10. Gureva M.A. The theoretical basis of the concept of circular economy. *Journal of International Economic Affairs*. 2019; 9(3):2311-2336. DOI: 10.18334/eo.9.3.40990 (rus.).
11. Gureva M.A. Conservation and rational use of natural resources: methods of circular economy assessment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 828:012010. DOI: 10.1088/1757-899X/828/1/012010
12. Lipińska D. The Water-wastewater-sludge Sector and the Circular Economy. *Comparative Economic Research. Central and Eastern Europe*. 2018; 21(4):121-137. DOI: 10.2478/ce-2018-0030
13. Usova N.T., Lukashevich O.D. Pigments produced from iron-containing sludge and their use in construction industry. *Journal of Construction and Architecture*. 2014; 4(45):198-207. (rus.).
14. Usova N.T., Lotov V.A., Lukashevich O.D. Waterproof autoclaveless silicate building materials on the basis of sand, soluble glass compositions and mud of water purifications. *Journal of Construction and Architecture*. 2013; 2:276-284. (rus.).
15. Zou J.L., Xu G.R., Li G.B. Ceramsite obtained from water and wastewater sludge and its characteristics affected by Fe₂O₃, CaO, and MgO. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 165(1-3):995-1001. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.113
16. Kumari D., Goswami R., Kumar M., Mazumder P., Kataki R., Shim J. Removal of Cr(VI) ions from the aqueous solution through nanoscale zero-valent iron (nZVI) Magnetite Corn Cob Silica (MCCS): A bio-waste based water purification perspective. *Groundwater for Sustainable Development*. 2018; 7:470-476. DOI: 10.1016/j.gsd.2017.12.007
17. Novoselova L.Y., Sirotkina E.E. The structure of sorbents based on thermally activated iron-containing water preparation precipitate. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2010; 84(6):1033-1038. DOI: 10.1134/S0036024410060257
18. Rao C.N.R., Thomas P.J., Kulkarni G.U. *Nanocrystals: Synthesis, Properties and Applications*. Berlin, 2007; 186. DOI:10.1007/978-3-540-68752-8
19. Uschakov A.V., Karpov I.V., Lepeshev A.A. Plasma-chemical Synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles for doping of high-temperature superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2017; 30(2):311-316. DOI: 10.1007/s10948-016-3709-6
20. Yadav T.P., Yadav R.M., Singh D.P. Mechanical milling: a top down approach for the Synthesis of nanomaterials and nanocomposites. *Nanoscience and Nanotechnology*. 2012; 2(3):22-48. DOI: 10.5923/j.nn.20120203.01
21. Pakharukov Y.V., Shabiev F.K., Mavrin-skii V.V., Safargaliev R.F., Voronin V.V. Formation of a wave structure on the surface of a graphene film. *JETP Letters*. 2019; 109(9):609-615. DOI: 10.1134/S002136401909011X

Received March 26, 2021.

Adopted in revised form on April 26, 2021.

Approved for publication on April 26, 2021.

B I O N O T E S: **Lev I. Maksimov** — postgraduate; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; SPIN-code: 2169-9700, Scopus: 57190855057, ResearcherID: B-8983-2016, ORCID: 0000-0001-6915-4778; maksimovlev93@gmail.com;

Viktor V. Mironov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Water Supply and Sanitation; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; SPIN-code: 2433-2178, Scopus: 57196778368, ResearcherID: AAH-6967-2019, ORCID: 0000-0001-8939-850X; vvmironov@list.ru;

Svetlana V. Maksimova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Water Supply and Sanitation; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; SPIN-code: 7626-9213, Scopus: 57191119478, ResearcherID: U-3288-2017, ORCID: 0000-0002-5141-1120; maksimovasv@tyuiu.ru;

Konstantin V. Kuskov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Material Science and Technology of Structural Materials; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; SPIN-code: 2137-8170, Scopus: 57192048601, ORCID: 0000-0002-0698-8545; kuskovkv@tyuiu.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 621.039.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.506-512

Совершенствование технологии устройства сухой защиты шахты реактора АЭС

В.А. Дорф¹, Б.К. Пергаменщик²

¹ Институт «Оргэнергострой» (ОЭС); г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Сухая защита (СЗ) — это цилиндрическая конструкция из серпентинитового бетона в металлическом кожухе внутренним диаметром 5,6 м, наружным 6,7 м, высотой 5,3 м, которая окружает корпус водо-водяного энергетического реактора в районе расположения активной зоны. Назначение серпентинитового бетона, содержащего повышенное количество химически связанной воды, — смягчать спектр потока нейтронов за пределами реактора, повышая долю тепловых нейтронов в спектре, что необходимо для работы ионизационных камер системы управления и защиты реактора. СЗ выполняет также функции радиационно-тепловой защиты, снижая потоки излучений на обычный бетон биологической защиты. Перед монтажом СЗ в шахту реактора осуществляется термообработка (сушка) бетона при температуре до 250 °С для удаления несвязанной воды во избежание радиоллиза.

Материалы и методы. Рассмотрены конструкция кожуха СЗ с целью выполнения дополнительной перфорации во избежание образования воздушных полостей при бетонировании; возможность применения современных пластифицирующих добавок с целью минимизации расхода воды затворения и, как следствие, свободной воды в теле серпентинитового бетона.

Результаты. Показана возможность отказа от этапов контроля качества бетонирования и термообработки в их традиционной форме. Дополнительное перфорирование металлического кожуха, его внутренних диафрагм в проблемных зонах, использование смеси подвижностью до 20 см и более позволяют полностью исключить образование внутренних пустот. По предварительным оценкам, при интенсивности излучений на СЗ для современного реактора мощностью 1200 МВт интенсивность выхода водорода за пределы кожуха, вследствие радиоллиза, не представляет никакой опасности. Концентрация водорода в воздухе, омывающем СЗ, на много порядков меньше опасных 4 %.

Выводы. Стоимость работ по возведению СЗ энергоблока АЭС мощностью 1000–1200 МВт может быть снижена на 70–100 млн руб., продолжительность работ — на 5 месяцев.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АЭС, сухая защита, высокая стоимость, продолжительность, ликвидация этапов термообработки, контроль качества нейтронным влагомером

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность начальнику отдела физики ядерных реакторов НИЦ «Курчатовский институт», кандидату физико-математических наук Сергею Михайловичу Зарицкому за консультации, помощь в работе.

Инициатором, вдохновителем и консультантом по ряду вопросов, рассмотренных в настоящей статье, был специалист АО ОКБ «Гидропресс» Геннадий Ефимович Носенко, безвременно ушедший в 2020 г.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дорф В.А., Пергаменщик Б.К. Совершенствование технологии устройства сухой защиты шахты реактора АЭС // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 4. С. 506–512. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.506-512

Updating of dry shielding of nuclear power plant reactor vessel

Valery A. Dorf¹, Boris K. Pergamenchik²

¹ Institute "Orgenergostroi"; Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. Dry shielding is a cylindrical structure made of serpentinite concrete in a metal casing with an inner diameter of 5.6 m, an outer diameter of 6.7 m, and a height of 5.3 m, which surrounds the VVER reactor vessel in the vicinity of the core. The purpose of serpentinite concrete, containing an increased amount of chemically bound water, is to soften the spectrum of the neutron flux outside the reactor, increasing the fraction of thermal neutrons in the spectrum, which is necessary for the operation of ionization chambers (IR) of the reactor control and protection system. Dry shielding also performs the functions of radiation and thermal protection, reducing the flux of radiation on ordinary concrete of biological protection. Before the installation of the dry shielding in the reactor shaft, heat treatment (drying) of concrete is carried out at temperatures up

to 250 °C to remove unbound water in order to avoid radiolysis. Quality control of concreting and then heat treatment is carried out using a radioisotope device — a neutron moisture meter. These works are very lengthy and costly.

Materials and methods. The design of the dry shielding casing was considered in order to perform additional perforation in order to avoid the formation of air pockets during concreting. The possibility of using modern plasticizing additives was considered in order to minimize the consumption of mixing water and, as a result, free water in the body of serpentinite concrete.

Results. The possibility of exclusion of the stages of quality control of concreting and heat treatment in their traditional form is shown. Additional perforation of the metal casing, its internal diaphragms in problem areas, the use of a mixture of 20 cm slump or more allows you to completely eliminate the formation of internal voids. According to preliminary estimates, given the intensity of radiation in the NW for a modern reactor with a capacity of 1200 MW, the intensity of the release of hydrogen outside the shell due to radiolysis does not pose any danger. The concentration of hydrogen in the air surrounding the dry shielding is many orders less of magnitude than the dangerous 4 %.

Conclusions. The cost of work on the construction of the SZ power unit of a nuclear power plant with a capacity of 1000–1200 MW can be reduced by 70–100 million rubles, the duration of work by 5 months.

KEYWORDS: NPP, dry protection, high cost, duration, elimination of heat treatment stages, quality control with a neutron moisture meter

Acknowledgments: The authors express their deep gratitude to the head of the nuclear reactor physics department of the National Research Center "Kurchatov Institute", Candidate of Physical and Mathematical Sciences Sergei Mikhailovich Zartsky for consultations and assistance in the work.

The initiator, inspirer and consultant on a number of issues discussed in this article was a specialist of JSC OKB Hidropress Gennady Efimovich Nosenko, who untimely left in 2020.

FOR CITATION: Dorf V.A., Pergamenchik B.K. Updating of dry shielding of nuclear power plant reactor vessel. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):506-512. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.506-512 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Сухая защита (СЗ) — элемент оборудования шахты реактора АЭС, представляющий собой цилиндрический металлический «кожух», заполненный серпентинитовым бетоном. Сухая защита окружает корпус реактора в районе активной зоны [1]. Назначение серпентинитового бетона, приготовленного на заполнителе на основе минерала серпентина $Mg_6(OH)_8[Si_4O_{10}]$, — смягчать спектр потока нейтронов за пределами реактора, повышая долю тепловых нейтронов в спектре, что необходимо для работы ионизационных камер (ИК) системы управления и защиты реактора.

Кроме того, СЗ выполняет функции радиационно-тепловой защиты, снижая потоки излучений на обычный тяжелый бетон биологической защиты.

Выбор серпентинита в качестве заполнителя бетона связан с высоким содержанием в нем водорода, стабильностью химического состава и свойств при повышенной температуре и радиационной стойкостью [2–6].

Охлаждение СЗ осуществляется воздухом системы вентиляции, проходящим снизу вверх по кольцевым зазорам, отделяющим СЗ с одной стороны от теплоизоляции корпуса реактора, а с другой — от бетона биологической защиты. Часть воздуха идет и по каналам ИК. Общий расход воздуха примерно 30 000 м³/ч. Расчетная температура воздуха на входе — 36 °C, на выходе из внутреннего зазора — около 54 °C, из наружного — менее 37 °C.

СЗ заменила защиту в виде воды в стальных баках, применявшуюся в ранних проектах АЭС и имевшую ряд недостатков. Переход на защиту из серпентинитового бетона стал возможен после выполненных

в 1965–1968 гг. специалистам МГСУ исследований его радиационной стойкости^{1, 2}.

Конструкция СЗ была оформлена в виде 10 сегментных блоков из бетона в металлических кожухах (рис. 1), объединяемых на монтаже в толстостенный цилиндр, окружающий корпус реактора. Внутренний диаметр такой СЗ — около 6 м, наружный — свыше 7 м, высота — около 3 м.



Рис. 1. Сегментный блок СЗ

Fig. 1. Segment block dry shielding

¹ Авторское свидетельство № 553908 на изобретение. Шахта ядерного энергетического реактора / Г.И. Жолдак и др.; зарегистрировано 13.12.1976 г.

² Авторское свидетельство № 728429 на изобретение. Шахта корпуса ядерного реактора / Г.И. Жолдак и др.; зарегистрировано 21.12.1979 г.

Достаточно простая геометрия кожуха облицовки позволяла даже при использовании малоподвижных бетонных смесей с невысоким расходом воды затворения добиваться качественной укладки и уплотнения смеси, избегая образования внутренних пустот. Не возникало проблем и с термообработкой (сушкой) бетона СЗ, что предписывалось инструкцией И.325-84³ с целью стабилизации свойств в условиях эксплуатации. Таким образом, полностью исключалось образование водорода при облучении вследствие радиолиза свободной воды с опасностью его скопления в возможных внутренних полостях.

Конструкция успешно внедрена на десятках энергоблоков в нашей стране и за рубежом [7–11].

В конце 80-х годов институтом «Гидропресс» для новых реакторных установок с водо-водяными энергетическими реакторами мощностью 1000 МВт конструкция СЗ была существенно изменена. Новая модификация, которая используется и сегодня, представляет собой металлический кольцевой цилиндрический бак с наружным диаметром 6,7 м и внутренним 5,6 м, состоящий из двух баков-ярусов. Высота нижнего 2 м, верхнего 3,3 м. Каждый из баков поставляется с завода в виде трех сегментов, которые на площадке объединяются в толстостенные цилиндры (рис. 2). Преимущество конструкции — в минимизации числа заводских элементов и в более высокой связности, что важно при строительстве в сейсмических условиях.



Рис. 2. Монтаж СЗ в сборе

Fig. 2. Complete installation of dry shielding

³ Инструкция И.325-84. Приготовление и укладка серпентинитового и железосерпентинитового бетонов в конструкции биологической защиты. М., 1984.

К недостаткам решения можно отнести относительно небольшие размеры вырезов в верхних обечайках каждого бака кожуха (яруса), которые предназначены для подачи бетонной смеси. Большое число внутренних вертикальных и горизонтальных диафрагм существенно усложняет процесс бетонирования конструкции и повышает вероятность образования внутренних пустот, особенно в угловых зонах под верхними обечайками и горизонтальными диафрагмами. Металлический кожух перфорируют для удаления при термообработке свободной воды. Однако и в этом случае, если следовать предписаниям инструкции³, гарантированно добиться полного удаления свободной воды, как правило, не удастся.

Можно выделить следующие основные операции, которые осуществляются при возведении СЗ:

1. Сборка из заводских сегментных блоков нижнего и верхнего цилиндрических баков на болтовых соединениях и сварке.

2. Подбор состава серпентинитового бетона.

3. Приготовление, подача, укладка с уплотнением серпентинитовой бетонной смеси в конструкцию нижнего бака. Выдержка 2–3 суток. Если последующая термообработка бетона осуществляется с внутренними стержневыми электронагревателями (стержни арматуры), то они устанавливаются до бетонирования.

4. Контроль качества бетонирования с использованием нейтронного влагомера. Исправление дефектов — внутренних пустот возможно только путем удаления части стенки бака с последующим заполнением дефекта бетоном и заваркой отверстия.

5. Выдержка в течение 2–3 суток и термообработка (сушка) бака с бетоном при температуре не ниже 150 °С для удаления свободной и капиллярной воды.

6. Контроль качества термообработки с помощью нейтронного влагомера. Исправление дефектов термообработки возможно лишь путем увеличения ее продолжительности и повышения до определенного предела температуры.

7. Установка (монтаж) верхнего бака на нижний бак с креплением к нему с помощью сварки по периметру.

8. Повторение операций 3–6 для верхнего бака.

9. Монтаж СЗ в составе двух баков, объединенных в единый блок, в шахту реактора (рис. 2).

Наиболее важными операциями технологии возведения СЗ, особенно ее последней двухбаковой модификации, считаются бетонирование и термообработка. Сложная конфигурация внутренних металлических перегородок баков создает предпосылки образования воздушных карманов в процессе бетонирования и, как следствие, опасности прострела излучения и затем искажений в показаниях ионизационных камер.

Стандартные методики термообработки до сих пор не разработаны. На практике используются следующие схемы:

1. Пропускание электрического тока по арматуре, расположенной в теле бетона с постепенным повышением силы тока и, соответственно, температуры в бетоне. Баки СЗ утепляются по наружной и внутренней поверхности.

2. Возведение вокруг баков СЗ (внутри и снаружи) кладки из огнеупорного теплоизоляционного кирпича с расположением на внутренних консолях кладки спиральных электронагревателей. Баки располагаются внутри крупного сборно-разборного тепляка со съемным покрытием. Тепляк, использованный, например, на Нововоронежской АЭС, имел размеры в плане 17×17 м. Технология обеспечивает достаточно равномерный прогрев СЗ по всему объему, однако связана с относительно большим расходом электроэнергии и достаточно высокими капиталовложениями.

3. Использование трубчатых электронагревателей (ТЭН), которые размещаются в каналах ионизационных камер, а также по высоте баков СЗ по наружным и внутренним поверхностям. Теплотери минимизируются за счет теплоизоляции.

В зависимости от климатических условий и технологии термообработки вокруг баков предусматриваются ограждающие конструкции той или иной степени капитальности.

К недостаткам всех рассмотренных технологий можно отнести их относительно высокую стоимость, связанную с капиталовложениями и текущими затратами. По фактическим данным и нашим оценкам, общие затраты на энергоблок с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) мощностью 1000–1200 МВт в зависимости от района строительства составляют от 70 до 100 млн руб. Продолжительность работ, включая подготовительный период, — до 5 мес.

Термообработка, контроль качества бетонирования и термообработки требуют привлечения организаций, в которых сегодня остро не хватает специалистов, имеющих достаточный опыт таких работ.

Использование нейтронного влагомера связано с необходимостью получения специальных разрешений, что неизбежно создает проблемы, особенно при возведении АЭС за рубежом.

Существующие технологии термообработки, фиксация поля температур в теле бетона не гарантируют удаление из бетона всей поровой и капиллярной воды. Судить о полном удалении воды из массива СЗ при ее термообработке на основании данных взвешивания относительно небольших образцов-свидетелей, по меньшей мере, не корректно, так как скорость высушивания открытого со всех сторон небольшого образца и массива серпентинитового бетона в стальном кожухе несоизмеримы. Данные нейтронного профилирования также представляют сомнительную ценность, поскольку температурный диапазон работы нейтронного влагомера находится в пределах $5\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в процессе термообработки и сразу после ее завершения температура в зоне из-

мерений достигает $200\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Остывание до окружающей температуры происходит в течение 3–4 суток, после чего можно проводить замеры. Если будут обнаружены дефектные зоны, то возобновить прогрев с целью их удаления крайне сложно.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовали существующие конструкции СЗ, технологию ее возведения, которая включает подбор состава бетона, приготовление и укладку смеси в металлоконструкцию, контроль качества с применением нейтронного влагомера и особенно термообработку, стандартизованное решение по которой отсутствует.

Авторы статьи считают процедуру контроля качества бетонирования и термообработки с использованием влагомера излишней.

Достаточно проконтролировать лабораторными методами подвижность (осадку конуса или растекаемость), вязкость и расслаиваемость бетонной смеси перед бетонированием.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время, по нашему мнению, можно кардинально изменить технологию устройства СЗ.

Целесообразно перейти на использование высокоподвижных бетонных смесей, вплоть до самоуплотняющихся, что позволит отказаться от виброуплотнения и обеспечит полное заполнение стальной опалубки блоков СЗ. Дополнительно необходимо скорректировать конструкцию стального кожуха, главным образом, путем перфорации (отверстия диаметром 10–20 мм) в проблемных зонах диафрагм.

Как вариант, возможно применение метода напорного бетонирования с подачей бетононасосом смеси в нижнюю часть кожуха и его заполнения восходящим потоком бетонной смеси, что гарантирует отсутствие непробетонированных участков.

Следует отказаться от использования в серпентинитовом бетоне устаревшей пластифицирующей добавки С-3 и перейти на современные гиперпластификаторы, снижающие расход воды в бетонной смеси еще на 20 %.

Для первого блока Белорусской АЭС Научно-исследовательским, проектно-конструкторским и технологическим институтом бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева (НИИЖБ) были разработаны ТУ 5745-328-36554501-2015⁴, согласно которым расход цемента и воды при использовании пластификатора С-3 составляют 430 и 220 кг/м³, а бетонная смесь имеет осадку конуса 10–15 см.

При переходе на современные гиперпластификаторы расход воды даже для самоуплотняющихся смесей снизится до 180–190 кг/м³. Примерно за два

⁴ ТУ 5745-328-36554501-2015. Бетон серпентинитовый для конструкций «сухой защиты» реактора АЭС-2006.

года от момента бетонирования до начала эксплуатации АЭС около 25 % воды будет химически связано [12]. Свободной воды останется не более 70–90 кг/м³.

Есть предложение по снижению содержания свободной воды путем введения в состав серпентинитового бетона извести [13, 14]. Однако такой подход требует дополнительных исследований. Он не исключает процессов термообработки и контроля качества. Кроме того, наличие извести приводит к сокращению срока схватывания бетонной смеси, что чревато опасностью образования внутренних пустот в процессе бетонирования. Исправлять такие дефекты крайне сложно.

По предварительным расчетам специалистов НИЦ «Курчатовский институт», интегральный выход водорода из серпентинитового бетона СЗ реактора ВВЭР-1200 объемом 23,7 м³ (от нижней границы активной зоны до фермы опорной) при содержании свободной воды 150 кг на 1 м³ бетона составит не более $1 \cdot 10^{-4}$ дм³/с или $3,6 \cdot 10^{-4}$ м³/ч. При расходе воздуха, омывающего СЗ по боковым сторонам и по каналам ИК (30 000 м³/ч), объемная концентра-

ция водорода в воздухе намного порядков меньше опасной — 4 % [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Существующая технология возведения СЗ современных АЭС с реакторами ВВЭР мощностью 1000–1200 МВт связана со значительными материальными и трудовыми затратами, а также относительно большой продолжительностью. Работы по СЗ лежат на подкритическом пути сетевого графика, однако даже небольшая задержка может привести к появлению этих работ на критическом пути и к увеличению общей продолжительности строительства.

Предварительные оценки, проведенные авторами, позволяют исключить из процесса возведения этапы контроля качества с использованием нейтронного влагомера и этап термообработки. Технология возведения сведется к этапам бетонирования, объединения нижнего и верхнего баков СЗ в единый монтажный элемент и его монтаж в шахту реактора. При этом будет достигнуто заметное снижение сроков производства работ и их стоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аршинов И.А., Васильев Г.А., Егоров Ю.А. и др. Серпентинит в защите ядерных реакторов / под ред. Ю.А. Егорова. М. : Атомиздат, 1972. 240 с.
2. Дубровский В.Б., Ибрагимов Ш.Ш., Кулаковский М.Я., Пергаменщик Б.К. Влияние облучения нейтронами на бетоны и растворы // Доклад на II Всесоюзной конференции по защите реакторов. 1966.
3. Дубровский В.Б., Ибрагимов Ш.Ш., Ладыгин А.Я., Пергаменщик Б.К. Радиационная стойкость серпентинитового бетона // Атомная энергия. 1968. Т. 25. № 6. С. 515.
4. Дубровский В.Б., Ибрагимов Ш.Ш., Пергаменщик Б.К. Радиационная стойкость некоторых защитных материалов // Вопросы физики защиты реакторов. 1969. № 3. С. 37–41.
5. Masoud M.A., Rashad A.M., Sakr K., Shakhien M.G., Zayed A.M. Possibility of using different types of Egyptian serpentine as fine and coarse aggregates for concrete production // Materials and Structures. 2020. Vol. 53. Issue 4. DOI: 10.1617/s11527-020-01525-5
6. Aygün B. Neutron and gamma radiation shielding properties of high-temperature-resistant heavy concretes including chromite and wolframite // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2019. Vol. 12. Issue 1. Pp. 352–359. DOI: 10.1080/16878507.2019.1672312
7. Жолдак Г.И., Пергаменщик Б.К. Опыт внедрения специальных гидратных бетонов при сооружении защиты на АЭС // Экспресс-информация. Серия: Строительство тепловых и атомных электростанций. М. : Информэнерго, 1977. № 7 (383). С. 13–19.
8. Жолдак Г.И. Материалы и конструкции сухой защиты реактора ВВЭР-1000. Обзорная информация. М. : Информэнерго, 1984. 62 с.
9. Жолдак Г.И. Сухая защита энергетических реакторов // Сборник трудов МИСИ. Материалы и конструкции защит ядерных установок. Вып. 146: материалы и конструкции защит ядерных установок. М., 1977. С. 16–22.
10. Жолдак Г.И., Лавданский П.А., Мухин Е.Н., Пятибратов Е.А. Возведение сухой защиты реактора ВВЭР-1000 // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 12. С. 58–60.
11. Жолдак Г.И., Мухин Е.Н., Лавданский П.А., Пергаменщик Б.К. Технологические особенности возведения конструкций сухой защиты реактора ВВЭР-1000 // Вопросы атомной науки и техники. Теплоэнергетическое строительство и экологическая безопасность : сб. тр. М. : МГСУ, 2007. С. 11–14.
12. Невилль А.М. Свойства бетона. М. : Стройиздат, 1972. 344 с.
13. Esenov A., Pustovgar A., Lavdanskij P. Radiation shield for PWR reactor // Documentation «Annual meeting on nuclear technology». CD-ROM. Germany, Berlin. 2013.
14. Пустовгар А.П., Лавданский П.А., Есенов А.В., Медведев В.В., Еремин А.В., Веденин А.Д. Влияние суперпластификаторов и оксида кальция на гидратацию цемента в серпентинитовом бетоне //

Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2014. № 2 (33). С. 10. URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/10PustovgarLavdanskiiEsenovMedvedevEreminVedenin-2014_2\(33\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/10PustovgarLavdanskiiEsenovMedvedevEreminVedenin-2014_2(33).pdf)

15. Егоров А.Л., Зарицкий С.М., Кабакчи С.А. Оценка скорости радиолитиза воды в бетонной защите реактора ВВЭР-1200 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2021.

Поступила в редакцию 12 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 13 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 13 апреля 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Валерий Анатольевич Дорф** — кандидат технических наук, заместитель генерального директора; **Институт «Оргэнергострой»**; 115114, г. Москва, Дербеневская набережная, д. 7, стр. 10; dorfva@ioes.ru;

Борис Климентьевич Пергаменчик — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; PergamenchikBK@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Arshinov I.A., Vasiliev G.A., Egorov Yu.A. et al. *Serpentine in the protection of nuclear reactors* / ed. Egorova Yu.A. Moscow, Atomizdat, 1972; 240. (rus.).
2. Dubrovsky V.B., Ibragimov Sh.Sh., Kulakovskiy M.Ya., Pergamenshchik B.K. Influence of neutron irradiation on concrete and mortars. *Report at the II All-Union Conference on Reactor Protection*. 1966. (rus.).
3. Dubrovsky V.B., Ibragimov Sh.Sh., Ladygin A.Ya., Pergamenshchik B.K. Radiation resistance of serpentine concrete. *Atomic Energy*. 1968; 25(6):515. (rus.).
4. Dubrovsky V.B., Ibragimov Sh.Sh., Pergamenshchik B.K. Radiation resistance of some protective materials. *Questions of physics of reactor protection*. 1969. 3:37-41. (rus.).
5. Masoud M.A., Rashad A.M., Sakr K., Shakhien M.G., Zayed A.M. Possibility of using different types of Egyptian serpentine as fine and coarse aggregates for concrete production. *Materials and Structures*. 2020; 53(4). DOI: 10.1617/s11527-020-01525-5
6. Aygün B. Neutron and gamma radiation shielding properties of high-temperature-resistant heavy concretes including chromite and wolframite. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2019; 12(1):352-359. DOI: 10.1080/16878507.2019.1672312
7. Zholdak G.I., Pergamenshchik B.K. Experience in the introduction of special hydrated concretes in the construction of protection at nuclear power plants. *Express-information. Series: Construction of Thermal and Nuclear Power Plants*. 1977; 7(383):13-19. (rus.).
8. Zholdak G.I. *Materials and structures of the dry shielding of the VVER-1000 reactor. Survey information*. Moscow, Informenergo, 1984; 62. (rus.).
9. Zholdak G.I. Dry shielding of power reactors. *Proceedings of the Moscow Institute of Steel and Alloys Materials and Structures of Shielding of Nuclear Installations*. Issue 146: materials and structures for the protection of nuclear installations. Moscow, 1977; 16-22. (rus.).
10. Zholdak G.I., Lavdanskii P.A., Mukhin E.N., Pyatibratov E.A. Construction of dry shielding for VVER-1000 reactor. *Building Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century*. 2005; 12:58-60. (rus.).
11. Zholdak G.I., Mukhin E.N., Lavdanskii P.A., Pergamenshchik B.K. Technological features of construction of dry shielding structures for VVER-1000 reactor. *Questions of Atomic Science and Technology. Thermal power construction and environmental safety: collection of works*. Moscow, MGSU, 2007; 11-14. (rus.).
12. Neville A.M. *Properties of concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1972; 344. (rus.).
13. Esenov A., Pustovgar A., Lavdanskii P. Radiation shield for PWR reactor. *Documentation «Annual meeting on nuclear technology»*. CD-ROM. Germany, Berlin, 2013. (rus.).
14. Pustovgar A.P., Lavdanskii P.A., Esenov A.V., Medvedev V.V., Eremin A.V., Vedenin A.D. Influence of superplasticizer and calcium oxide on cement hydration in serpentine concrete. *Internet Bulletin VolGASU*. 2014; 2(33):10. URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/10PustovgarLavdanskiiEsenovMedvedevEreminVedenin-2014_2\(33\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/10PustovgarLavdanskiiEsenovMedvedevEreminVedenin-2014_2(33).pdf) (rus.).
15. Egorov A.L., Zaritsky S.M., Kabakchi S.A. Estimation of the rate of water radiolysis in the concrete shield of a VVER-1200 reactor. *Questions of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors*. 2021. (rus.).

Received March 12, 2021.

Adopted in revised form on April 13, 2021.

Approved for publication on April 13, 2021.

B I O N O T E S: **Valery A. Dorf** — Candidate of Technical Sciences, deputy general director; **Institute “Orgenergostroy”**; 10, 7, Derbenevskaya emb., Moscow, 115114, Russian Federation; dorfva@ioes.ru;

Boris K. Pergamenchik — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Construction of Thermal and Nuclear Power Facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; PergamenchikBK@mgsu.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: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список литературы.

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:

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

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 указываются 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 должно 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 ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы 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 литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы 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 литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, 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.

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 литературы 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 ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список литературы 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 литературы редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

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.

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

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.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется

представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это — основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, 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.

ЛИТЕРАТУРА (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:

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL:<http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL:<http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

В footnotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

