

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 16 Выпуск 7/2021
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 16. Выпуск 7
2021**

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

Сквозной номер 152

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 16. Issue 7
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	28.07.2021.
Подписан в свет	30.07.2021.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 20,10. Тираж 100 экз. Заказ № 149	

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., 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*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Корректор: *Любовь Владимировна Светличная*

Дизайн и верстка: *Алина Германовна Алейникова*

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, директор, 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 Пунырев, 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. теплогазоснабжения 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:	28.07.2021.

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:** *Alina G. Aleynikova*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

Ийлаф Хишам Мурад Алашкар, Ю.В. Алексеев, Алиреза Маджорзадехахири

Analysis and evaluation of urban socioeconomic dimensions

(Анализ и оценка городских социально-экономических аспектов) 801

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

А.А. Локтев, Ахмад Баракат, Джаафар Кбейли

Сейсмическое поведение главной балки моста с вязкоупругими демпферами 809

Н.Я. Цимбельман, Т.И. Чернова, М.А. Селиванова, В.С. Редько

Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций из заполненных оболочек 819

В.Н. Черноиван, А.В. Торхова, Н.В. Черноиван, В.Г. Новосельцев

Предложения по нормированию сопротивления теплопередаче утепленных стен

жилых зданий в Республике Беларусь 828

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

О.Н. Дьячкова

Система раздельного сбора твердых коммунальных отходов жителями многоквартирных домов 838

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.А. Мелехин

Разработка технико-экономических алгоритмов расчета

для калькуляторов инженерных систем 859

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Е.В. Ганзен

Планирование капитального ремонта и реконструкции

общественных зданий на основе нечеткого вывода 876

А.В. Гинзбург, Л.А. Адамцевич, А.О. Адамцевич

Строительная отрасль и концепция «Индустрия 4.0»: обзор 885

Е.А. Король, Н.С. Шушунова

Использование инновационных технологий устройства стеновых покрытий

с модульными системами озеленения 912

В.С. Тимченко, В.А. Волкодав, И.А. Волкодав, О.В. Тимченко, Н.А. Осипов

Разработка элементов классификатора строительной информации

для создания и ведения информационных моделей объектов

капитального строительства в части процессов проектирования,

управления строительными процессами и строительной информации 926

Требования к оформлению научной статьи 955

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

<i>Eilaf Mourad Alashkar, Yuri V. Alekseev, Alireza Majorzadehzahiri</i> Analysis and evaluation of urban socioeconomic dimensions	801
--	------------

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

<i>Aleksey A. Loktev, Ahmad Barakat, Jaafar Qbaily</i> Seismic behavior of the main girder of a bridge with viscoelastic dampers	809
<i>Nikita Ya. Tsimbelman, Tatyana I. Chernova, Mariya A. Selivanova, Vitalii S. Redko</i> A research on the stress-strain behaviour of structures made of filled shells.	819
<i>Vyacheslav N. Chernoiyan, Anna V. Torkhova, Nikolay V. Chernoiyan, Vladimir G. Novoseltsev</i> Proposals for standardization the heat transfer resistance of insulated walls of residential buildings in the Republic of Belarus.	828

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

<i>Olga N. D'yachkova</i> Separate collection of solid household waste by residents of multi-family homes	838
---	------------

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

<i>Andrey A. Melekhin</i> Development of technical and economic analysis algorithms for calculators of engineering systems	859
--	------------

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

<i>Evgeny V. Ganzen</i> Using fuzzy inference to plan capital repairs and reconstruction of public buildings	876
<i>Alexander V. Ginzburg, Liubov A. Adamtsevich, Aleksey O. Adamtsevich</i> Construction industry and the Industry 4.0 concept: a review	885
<i>Elena A. Korol, Natalia S. Shushunova</i> Use of innovative technologies of wall covering devices with modular greening systems	912
<i>Vladimir S. Timchenko, Vladimir A. Volkodav, Ivan A. Volkodav, Olga V. Timchenko, Nikita A. Osipov</i> Development of building information classifier elements to create and maintain information models of capital construction objects in terms of design processes, construction process management and construction information	926
Requirements for research paper design	955

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).

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

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

«Предельное состояние стальных структурных конструкций».

Конкурсный отбор состоится на заседании Научно-технического совета

НИУ МГСУ 21.09.2021 г. в 14:00.

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

УДК 330.341+316.422.42

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.801-808

Analysis and evaluation of urban socioeconomic dimensions

Eilaf Mourad Alashkar, Yuri V. Alekseev, Alireza Majorzadehzahiri
*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
(MGSU); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Following any war, the destruction of cities causes severe damage to the lives of citizens, so urban planning and accelerating the process of renovation and development of a city is the priority of every country after the war, in order to reduce the damage caused by war. Since then, citizens can resume their normal living in their hometowns. The process of urban renovation and development takes a long time, and the main urban indicators should be regularly evaluated in different dimensions to find out whether the living environment has improved and the preset urban goals have been achieved.

Materials and methods. In this study, the process of renovation and development of the city of Homs was analyzed by evaluating the pre-selected social and economic indicators. The sign test and the Wilcoxon test were used to evaluate and compare the indicators before and after the war.

Results. The results of the research show that the null hypothesis of this research was rejected with a z -value of -3.137916 and a p -value of 0.002 in respect of the social dimension. Also, the zero hypothesis of this research is rejected in the economic dimension according to the results of the Wilcoxon test. The results show that the z -value is equal to -2.075 and the p -value is equal to 0.038 , which is less than 0.50 and, hence, insignificant. The rejection of the null hypothesis and the large number of negative indicators in the social dimension indicate that the process of renovation and development of the city of Homs is very slow after the war and the city has not been able to approach the desired stable condition.

Conclusions. This research has found that only 11 indicators out of 45 improved in the process of renovation and development of the city of Homs after the war if compared to the pre-war period. In fact, more than 75 % of selected indicators were negative, and this shows the slow pace of urban renovation and development with an emphasis on the sustainable city of Homs.

KEYWORDS: renovation, sustainable development, Homs, socioeconomic dimensions, Wilcoxon test

FOR CITATION: Eilaf Mourad Alashkar, Alekseev Yu.V., Alireza Majorzadehzahiri. Analysis and evaluation of urban socioeconomic dimensions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(7):801-808. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.801-808 (rus.).

Анализ и оценка городских социально-экономических аспектов

Ийлаф Хишам Мурад Алашкар, Ю.В. Алексеев, Алиреза Маджорзадехзахири
*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. После войны разрушение городов наносит серьезный ущерб жизни граждан, поэтому городское планирование и ускорение процесса обновления и развития города является приоритетом каждой страны в послевоенное время. Процесс обновления и развития города требует длительного времени, необходимо регулярно оценивать основные показатели в различных измерениях города, чтобы понять, что условия улучшились и запланированные цели достигнуты.

Материалы и методы. Путем оценки выбранных показателей до и после войны в социально-экономическом измерении города Хомс проанализирован процесс восстановления города. Для оценки и сравнения показателей до и после войны использовались критерий знаков и критерий Вилкоксона.

Результаты. В социальном измерении нулевая гипотеза этого исследования была отклонена с z -значением $-3,137916$ и p -значением $0,002$. Также, согласно результатам теста Вилкоксона, нулевая гипотеза данного исследования отклоняется в экономическом измерении. Значение z равно $-2,075$, а значение p равно $0,038$, что меньше $0,50$ и не является значимым. Отказ от нулевой гипотезы и большое количество отрицательных показателей в социальном измерении указывают на то, что процесс обновления и развития города Хомс после войны идет очень медленно и не может приблизиться к желаемым и стабильным условиям.

Выводы. Только 11 показателей из 45 в процессе обновления и развития города Хомс после войны улучшились по сравнению с довоенными. Фактически, более 75 % выбранных показателей были отрицательными, и это свидетельствует о медленной тенденции восстановления городов с упором на устойчивый город Хомс.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ремонт, устойчивое развитие, Хомс, социально-экономические аспекты, тест Вилкоксона

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ийлаф Хишам Мурад Алашкар, Алексеев Ю.В., Алиреза Маджорзадехзахири. Analysis and evaluation of urban socioeconomic dimensions // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 801–808. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.801-808

INTRODUCTION

Development is the idea and practice that dates back to the early nineteenth century. This concept differs from the idea of progress [1]; sustainable urban development is a form of development that guarantees continuous development of cities and urban communities for future generations [2]. As we know, from the beginning and until today urban development has been focused on expanding the urban space, serving the needs of growing population, more intensive use of resources, growing production capacity and consumption. However, sustainable urban development in the context of environmental anomalies and crises, caused by natural and man-made disasters, promotes urban equality [3, 4]. It fills gaps between urban areas and their environs and between the rich and the poor; it implements a sustainable transportation model, eliminates causes of soil degradation as well as soil and water pollution, it protects and expands green spaces. Today, constituent elements of a city face the worst possible conditions throughout the whole history [5, 6].

The following interpretations are relevant to sustainable development: the process of expanding human choices, promoting participatory democratic processes, and the ability of the people to have a say in the decisions that are made [7]. It is the process of creating and expanding opportunities for people to use their full potential; it is the process of empowering the poor and women [3, 8, 9].

The process of urban renovation and development in various social, economic, and environmental dimensions has affected the lives of citizens. With the development of cities and the introduction of the principle of sustainable development in the process of urban renovation, the focus on sustainability principles was questioned more and more frequently [10, 11]. Sustainable development is a planned process that emphasizes economic growth, social justice, and sustainability of environmental resources. This process applies to all aspects of renovation and development, it improves the quality of life and protects the environment. Finally, it is a model that embodies social, economic and environmental goals [12, 13].

The introduction of sustainable urban development as the main slogan of the third millennium is also due to the effect of cities on the biosphere and various aspects of human life. Accordingly, given the inherent complexity of cities and different dimensions of their impact, it seems necessary to identify the key factors to achieve urban sustainability in the process of urban renovation [12, 14, 15].

Cities, and especially their crowded centres, are highly sensitive and vulnerable for a variety of reasons. These centres, on the one hand, have a vital need for urban infrastructure in the dimensions of transportation, services, energy, etc. [16]. On the other hand, these centres are highly vulnerable (especially in terms of human casualties and disruption of the existing urban infra-

structure in the days of natural and man-made crises) [17]. It is very important to solve these problems and cater for the needs of the urban infrastructure to achieve the sustainability of cities and their centres in the process of urban renovation [18].

The importance of the issue stems from the fact that in the course of sustainable development, the availability of urban infrastructure in the country, especially in its large cities, and the improvement of their environmental quality after the devastation caused by the war is of particular importance [19, 20].

MATERIALS AND METHODS

Evaluation is a method and tool for analyzing the effects of current or possible actions, activities and plans. The purpose of evaluation is to measure urban characteristics and complications; it shows the qualitative difference in specific characteristics; it also helps to obtain information about certain specific complications, and it helps to make descriptive comparisons by demonstrating differences and testing hypotheses.

Homs (Fig.) is a city in western Syria and the capital of the Homs Governorate. It is 501 meters above the sea level, and it is located 162 kilometers north of Damascus on the Orontes River. Homs is also the central hub connecting the cities and the Mediterranean coast.

Before the Syrian Civil War, Homs was a major industrial centre, and with the population of at least 652,609 residents in 2004, it was the third largest city in Syria after Aleppo to the north and the capital Damascus to the south.

The research method used in this project is descriptive-and-analytical, and the data is collected using the documentary (library) and field (survey) methods. Besides, statistical, quantitative, qualitative, SPSS (Statistical package for social sciences) and Excel software methods were used in this research.

Evaluation in this study means a method and tool for interpreting the results and consequences of the war, the process of renovation, development and expansion of the city of Homs, which are reflected in the economic and social characteristics. The first step in assessing the situation in the city of Homs is to compare the social and economic indicators in the process of renovation and development of the city with these before the war. In this study, the comparison of selected indicators of the city of Homs before and after the war was performed.

Given the process of renovation and development which is underway in the city of Homs with emphasis on the sustainable urban development approach, criteria and indicators of the city of Homs are divided into two groups, including social and economic ones. Indicators are positive or negative in nature, positive indicators indicate that renovation and development are focused on sustainability, while negative indicators mean that the process is headed towards instability. One



Location of the city of Homs

of evaluation problems is the comparison of indicators whose measurement units are not the same. To solve this problem, we use the paired sign test and Wilcoxon test. It is assumed that the difference in each pair of indicators is equal to zero or one. In other words, there is neither any difference between the indicators of the city of Homs in the process of renovation and development before and after the war, nor any difference between the number of positive and negative indicators in the process of renovation and development before and after the war in Homs. The null hypothesis, used in this method, means that there is no difference between the indicators of the city of Homs in the process of renovation and development before and after the war. On the other hand, it is assumed that the situation in the city is better or worse according to the indicators registered in the process of renovation and development before and after the war. The sign test is the best in case of the widespread heterogeneity of experimental units; the test can be performed on the basis of the internal homogeneity of numerical pairs and then a non-parametric test can be applied. This test is based on the sign of difference between the two items in each homogeneous pair. The test shows the number of pairs in which one item has a higher response than the other item ($R+$). If the effect of the two items is the same, they have as many positive and negative signs as the differences. Therefore, given the null hypothesis, the binomial distribution is $(0.5, n)$ and $\mu_2 = \mu_1$. In contrast to the null hypothesis, there is an opposite case, that is, an alternative hypothesis. In this study, since the number of samples is more than 25, z test and Wilcoxon test were used and the comparison between the calculated z -value and the table of critical points of the Z null hypothesis was performed to reject or accept the resulting values.

Hypothesis zero of this research, which shows the lack of differences between social and economic indicators of the city of Homs, is shown below. μ refers to the values of social and economic indicators.

$$H_0 \mu_2 = \mu_1,$$

$$H_1 \mu_2 \neq \mu_1.$$

The following equation can also be used to calculate the z -value.

$$z = \frac{T - \frac{n(n+1)}{4}}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}}, \quad (1)$$

where n is the sample size used and T is the sum of the indicator values that have increased or decreased.

It should be noted that in calculations, the value of indicators that have a negative nature is replaced by its inverse.

RESULTS OF THE RESEARCH

Development is a quantitative and qualitative process that affects a society in all its social, economic and cultural dimensions. And it encompasses different levels of life, or in other words, development is a process that brings a society from a particular situation to a better situation. Since the situation in Syria was critical after the war, urban renovation and development is the priority of this country. In this study, we examine the main indicators of the city of Homs in two socioeconomic dimensions in order to have a better understanding of the conditions before and after the war in the process of renovation and development of the city of Homs.

In the social dimension, 26 indicators were examined in this study. Table 1 shows the selected social indicators for the city of Homs. Also, in Table 2, can see the number of positive and negative indicators. Table 1 shows the nature (negative and positive) description, values, and D_i (the sign demonstrating the difference between two indicators in each homogeneous pair of indicators).

As Tables 1 and 2 show, only 6 out of 26 social indicators are better than they were before the war, and other 20 indicators are negative. In other words, as for these 20 indicators, the pre-war situation was better and the process of renovation and development has not improved the situation.

The results of the Wilkinson test for the social and economic dimensions used in this study to reject or accept the null hypothesis are shown in Table 3 and 6.

According to Table 3, as for the social dimension, the null hypothesis of this research is rejected with a z -value of -3.137916 and a p -value of 0.002 . The rejection of the null hypothesis and the large number of negative indicators in the social dimension mean that the process of renovation and development of the city of Homs is very slow after the war, and it has not been able to reach the desired stable conditions.

The results of Tables 4 and 5 were obtained by studying the situation in the city of Homs before and

Table 1. Social indicators

№	Indicators	Before the war	After the war	Nature	Description	D_i
1	Number of students	0.50	0.90	Positive	Indicates the scientific and cultural potential	+
2	Number of families without children (only husband and wife)	2.50	1.53	Negative	Indicates the degree of life difficulties affecting the formation of a family	–
3	Ethnic, social and cultural relations between citizens	0.90	0.35	Positive	Indicates the interdependence of social ties and the cultural and civilizational awareness of society	–
4	Sex ratio	2.50	4.00	Negative	Indicates the ratio of men to women	+
5	Educated population	0.90	0.40	Positive	Indicates the level of general education and literacy	–
6	Number of educated women	0.90	0.50	Positive	Indicates the level of general education and literacy of women	–
7	Divorced population	4.00	2.00	Negative	Indicates the degree of family insecurity	–
8	Number of unmarried men	4.00	1.66	Negative	Indicates the instability of conditions for making a family	–
9	Number of married girls	0.75	0.40	Positive	Indicates the level of mental health of society	–
10	Difference in the percentage of literate men and women	4.00	2.50	Negative	Indicates the education level of society	–
11	Number of divorced women	4.00	2.00	Negative	Indicates the degree of family instability and intellectual independence	–
12	Population between 1 to 14 years old	2.85	2.22	Negative	Indicates an increase in the birth rate and the ratio of young groups	–
13	Population over 65 years old	2.85	1.66	Negative	Indicates the ratio of aging population	–
14	Population between 1 to 4 years old	2.00	2.50	Negative	Indicates high fertility rate and the need for population control	+
15	Number of educated men	0.80	0.65	Positive	Shows the education level and the literacy rate of men	–
16	Average number of family members	0.20	0.25	Negative	Indicates household growth rates	+
17	Number of graduate students	0.05	0.20	Positive	Indicates the scientific progress of the country	+
18	Technological knowledge	0.25	0.50	Positive	Indicates society technology awareness and skills	+
19	Mortality among people 80-95 years old	2.00	1.33	Negative	Indicates the level of health care and the development of the health sector	–
20	Demographic distribution in the city	0.60	0.35	Positive	Indicates ethnic composition of society	–
21	Living comfort and luxury level	0.80	0.20	Positive	Indicates the level of wealth and comfort, the ease of securing material goods and basic necessities	–
22	A gap between rich and poor	4.00	1.25	Negative	Indicates economic justice in society and fair distribution of wealth	–
23	Social protection of low-income and disabled people	0.75	0.25	Positive	Indicates the degree of state care in the implementation of necessary measures and support programs to increase the level of low-income people and support people with disabilities in society	–
24	Social infrastructure efficiency	0.65	0.30	Positive	Indicates mental and physical health of a person in terms of housing, education, health care, retail outlets, cultural, entertainment and sports clubs	–
25	The quality of social life	0.70	0.40	Positive	Indicates the quality and efficiency of social services provided by the country to enhance the quality of life	–
26	The activity of the modern housing sector and its development	0.85	0.40	Positive	Indicates the ease of providing housing for people	–

r^+ = number of couples in which the indicators of the city of Homs are better or positive.

6

Table 2. Social indicators Ranks

		<i>N</i>	Mean Rank	Sum of Ranks
After – before	Negative Ranks	20	14.95	299.00
	Positive Ranks	6	8.67	52.00
	Ties	0		
	Total	26		
	<i>z</i>			–3.137916

Table 3. Hypothesis Test Summary

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The median of differences between “After and Before” equals to 0	Related-Samples Wilcoxon Signed Rank Test	0.002	Reject the null hypothesis

Asymptotic significances are displayed. The significance level is 0.50.

Table 4. Economic indicators

	Indicators	Before the war	After the war	Nature	Description	<i>D_i</i>
1	Economically active population	0.50	0.70	Positive	Indicates the potential ratio of active population in the community	+
2	Development of infrastructure, i.e. shopping centres in the city	0.25	0.10	Positive	Indicates the development pace of the commercial sphere	–
3	Difference in the activity of men and women	1.66	10.00	Negative	Represents differences between men and women depending on cultural status	+
4	Unemployment rate	3.33	1.42	Negative	Shows unemployed population	–
5	Number of active population in the agricultural sector	0.25	0.50	Positive	Indicates self-dependent economy relying on agriculture	+
6	Number of active citizens in the industrial sector	0.30	0.10	Positive	Indicates self-dependent economy relying on agriculture	–
7	Population percentage between 15 to 64 years old	0.40	0.60	Positive	Indicates the potentially active population	+
8	Population employed for more than 10 years	0.50	0.20	Positive	Represents the actually active population	–
9	The ratio between active and inactive population	5.00	1.66	Negative	This figure indicates reliance on active population in a five-person family	–
10	Number of families owning houses and land	0.80	0.50	Positive	Indicates the fulfillment of basic needs	–
11	Number of house renting families	2.85	1.81	Negative	Indicates the population in need of housing	–
12	Number of employees occupying non-government positions	0.45	0.65	Positive	Represents the growth of economy in country	+
13	Number of public services employees	0.20	0.20	Positive	It indicates the number of public services workers in the country	
14	Land prices	1.00	0.33	Negative	Indicates the economic and biosocial value	–
15	Prices for commodities and services	3.33	1.11	Negative	Indicates economic inflation	–
16	Industrial production	0.65	0.45	Positive	Indicates the power of economy	–
17	Use of modern machinery in manufacturing industries	0.50	0.25	Positive	Indicates industrial development	–
18	Use of modern technology in economy	0.60	0.35	Positive	Indicates economic development	–
19	Energy and resources consuming industries and environmentally hazardous industries	3.33	1.42	Negative	Indicates the industrial backwardness of the country	–
<i>r</i> + = number of couples in which the indicators of the city of Homs are better or positive.						5

Table 5. Economic indicators Ranks

		<i>N</i>	Mean Rank	Sum of Ranks
After – before	Negative Ranks	13	10.23	133.00
	Positive Ranks	5	7.60	38.00
	Ties	1		
	Total	19		
	<i>z</i>			–2.075

Table 6. Test Hypothesis Summary

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The median of differences between “After and Before” equals to 0	Related samples Wilcoxon signed rank test	0.038	Reject the null hypothesis

Asymptotic significances are displayed. The significance level is 0.050.

after the war in the economic dimension by measuring 19 indicators.

These results show (Tables 4 and 5) that number of employees in non-government jobs, population percentage between 15 to 64 years old, number of active population in agricultural sector, differences in the activity of men and women and economically active population indicators are in a better position in the process of renovation and development after the war, and 14 other indicators are in unfavorable conditions than before the war.

The zero hypothesis of this research is rejected in the economic dimension according to the results of the Wilcoxon test. The results of Table 6 show that *z*-value is –2.075 and *p*-value is 0.038, which is less than 0.50 and, therefore, it is not significant.

CONCLUSION AND DISCUSSION

In this article, we compare the socioeconomic dimensions of the city of Homs in Syria in the two periods before and after the war. In total, the results show that only 11 out of 45 indicators, studied in this project, demonstrate better conditions than those before the war. Although the process of renovation began four years ago in the city of Homs, the rejection of the null

hypothesis of this research shows that the indicators have neither improved, nor reached the pre-war values in terms of the socioeconomic dimensions of the city. In fact, the slow process and lack of coordination and resources have caused many problems for residents. Finally, given the problems of the city and the results of this research, renovation and development strategies are proposed with an emphasis on sustainability.

- socioeconomic policies should be coordinated with spatial planning of the city and the region;
- spatial organization of urban activities must be focused on sustainable development;
- urban uses must be classified with regard for urban planning factors;
- balanced distribution of services throughout the city is needed;
- appropriate educational, cultural, medical and commercial services are a must;
- rural population levels must be maintained by improving service provision and environmental safety;
- improvement and renovation of urban infrastructure is of vital importance;
- the quality of life in different urban neighborhoods must be levelled by means of providing adequate municipal services in less developed areas.

REFERENCES

1. Silvaab G.F., Oliveirabc C., Reiscde C. Footpaths design on renovation of city centres — A model of assessment. *Procedia Structural Integrity*. 2019; 22:137-143. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.01.019
2. Putilov I.D., Bazilevich M.E. Perspective directions of renovation of industrial enterprises on the example of Khabarovsk City. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1079(6):062007. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/6/062007
3. Sviridov I.A., Sborshikov S.B. Towards renovation of Russian cities. *Journal of Construction and Architecture*. 2019; 21(2):158-164. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-158-164 (rus.).
4. Tsenkova S. Renovation and retrofits of social housing in Alberta. *Energy Efficient Affordable Housing*. 2021; 67-81. DOI: 10.1007/978-3-030-69563-7_5
5. Kolobova S. Renovation of Moscow as a sub-program of creation of a creative city. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753:062003. DOI: 10.1088/1757-899X/753/6/062003
6. Powell D. Reconstructing the city. *Out West*. 2020; 52-67. DOI: 10.4324/9781003116653-4
7. Skachkova M.E., Shelegova N.I. Renovation of urban areas for the purpose of their urban development on the example of St. Petersburg. *Supplement to the journal Izvestiya vuzov. Geodesy and aerial photog-*

raphy : Collection of articles on the results of the scientific and technical conference. 2014; 7-2:36-38. (rus.).

8. Lazanja I. The reconstruction of the croatian coastal city of Zadar. *Living with History, 1914-1964*. 2021; 278-287. DOI: 10.2307/j.ctv1gt943b.22

9. Yang S. A study on the way of implementation of reconstruction in the City. *The Korean Association of Space and Environment Research*. 2020; 30(4):250-278. DOI: 10.19097/kaser.2020.30.4.250

10. Ferwati M.S., Menshaw S.E. Virtual reconstruction of the historic city of Al-Zubarah in Qatar. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2021; 21:e00177. DOI: 10.1016/j.daach.2021.e00177

11. Krasavin G.V., Matiushenko A.I. Reconstruction of the water supply to the City of Igarka of Krasnoyarsk Region. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2021; 187-197. DOI: 10.17516/1999-494X-0299

12. Tsitman M.O., Bogatyreva A.V. Renovation of industrial territory in the structure of the urban environment. *Engineering and construction bulletin of the Caspian Sea region*. 2015; 4(14):29-35. (rus.).

13. Majeed M.L. "Sustainability" as a strategy for the reconstruction of distressed cities in Iraq. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1660:012087. DOI: 10.1088/1742-6596/1660/1/012087

14. Musialski P., Wonka P., Aliaga D.G. A survey of urban reconstruction. *Computer Graphics Forum*. 2013; 32(6):146-177. DOI: 10.1111/cgf.12077

15. Marmaras E.V. The urban reconstruction machinery issue. *Planning London for the Post-War Era 1945-1960*. 2015; 41-51. DOI: 10.1007/978-3-319-07647-8_5

16. Nan L., Sharf A., Zhang N. SmartBoxes for interactive urban reconstruction. *ACM SIGGRAPH 2010 papers on — SIGGRAPH '10*. 2010. DOI: 10.1145/1833349.1778830

17. Wang Y., Huang J., Wu T. Comprehensive utilization study of waste red brick in urban reconstruction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 514:032066. DOI: 10.1088/1755-1315/514/3/032066

18. Murashko A.O. Sustainable development of the city during the renovation of buildings. Analysis of the compliance of renovation projects in Moscow with the criteria of a comfortable urban environment. *Supplement to the journal Izvestiya vuzov. Geodesy and aerial photography: Collection of articles on the results of the scientific and technical conference*. 2020; 11:89-92. (rus.).

19. Allbeson T. Photography, reconstruction and the cultural history of the postwar European City. *Routledge*. 2020. DOI: 10.4324/9781003086338

20. Kharlamova N.A. Reconstruction of power systems of small cities and rural settlements. *The Agrarian Scientific Journal*. 2020; 9:91-93. DOI: 10.28983/asj.y2020i9pp91-93

Received May 27, 2021.

Adopted in revised form on July 21, 2021.

Approved for publication on July 21, 2021.

B I O N O T E S: **Eilaf Mourad Alashkar** — postgraduate of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1104169; eilaf.alashkar1992@gmail.com;

Yuri V. Alekseev — Doctor of Architecture, Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 690296; Alekseev-grado@yandex.ru;

Alireza Majorzadehzahiri — postgraduate of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1103511, Scopus: 57209311034, ORCID: 0000-0002-9800-8830; alireza_majorzadehzahiri@yahoo.com.

ЛИТЕРАТУРА

1. Silvaab G.F., Oliveirabc C., Reiscde C. Footpaths design on renovation of city centres — a model of assessment // *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 22. Pp. 137–143. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.01.019

2. Putilov I.D., Bazilevich M.E. Perspective directions of renovation of industrial enterprises on the example of Khabarovsk City // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021.

Vol. 1079. Issue 6. P. 062007. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/6/062007

3. Свиридов И.А., Сборщиков С.Б. О некоторых особенностях современной организации реновации российских городов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2019. Т. 21. № 2. С. 158–164. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-158-164

4. Tsenkova S. Renovation and retrofits of social housing in Alberta // *Energy Efficient Affordable Housing*. 2021. Pp. 67–81. DOI: 10.1007/978-3-030-69563-7_5

5. Kolobova S. Renovation of Moscow as a subprogram of creation of a creative city // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. P. 062003. DOI: 10.1088/1757-899X/753/6/062003

6. Powell D. Reconstructing the city // *Out West*. 2020. Pp. 52–67. DOI: 10.4324/9781003116653-4

7. Скачкова М.Е., Шелегова Н.И. Реновация городских территорий в целях их градостроительного развития на примере Санкт-Петербурга // Приложение к журналу «Известия вузов». Геодезия и аэрофотосъемка : сб. ст. по итогам науч.-техн. конф. 2014. № 7–2. С. 36–38.

8. Lazanja I. The reconstruction of the Croatian coastal city of Zadar // *Living with History, 1914-1964*. 2021. Pp. 278–287. DOI: 10.2307/j.ctv1gt943b.22

9. Yang S. A Study on the Way of Implementation of reconstruction in the city // *The Korean Association of Space and Environment Research*. 2020. Vol. 30. Issue 4. Pp. 250–278. DOI: 10.19097/kaser.2020.30.4.250

10. Ferwati M.S., Menshaw S.E. Virtual reconstruction of the historic city of Al-Zubarah in Qatar // *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2021. Vol. 21. P. e00177. DOI: 10.1016/j.daach.2021.e00177

11. Krasavin G.V., Matiushenko A.I. Reconstruction of the water supply to the city of Igarka of Krasnoyarsk Region // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2021. Pp. 187–197. DOI: 10.17516/1999-494X-0299

12. Цитман М.О., Богатырева А.В. Реновация промышленной территории в структуре городской

среды // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2015. № 4 (14). С. 29–35.

13. Majeed M.L. “Sustainability” as a strategy for the reconstruction of distressed cities in Iraq // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1660. P. 012087. DOI: 10.1088/1742-6596/1660/1/012087

14. Musialski P., Wonka P., Aliaga D.G. A Survey of urban reconstruction // *Computer Graphics Forum*. 2013. Vol. 32. Issue 6. Pp. 146–177. DOI: 10.1111/cgf.12077

15. Marmaras E.V. The urban reconstruction machinery issue // *Planning London for the Post-War Era 1945-1960*. 2015. Pp. 41–51. DOI: 10.1007/978-3-319-07647-8_5

16. Nan L., Sharf A., Zhang N. SmartBoxes for interactive urban reconstruction // *ACM SIGGRAPH 2010 papers on — SIGGRAPH '10*. 2010. DOI: 10.1145/1833349.1778830

17. Wang Y., Huang J., Wu T. Comprehensive utilization study of waste red brick in urban reconstruction // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 514. P. 032066. DOI: 10.1088/1755-1315/514/3/032066

18. Мурашко А.О. Устойчивое развитие города при реновации застройки. Анализ соответствия проектов реновации в Москве критериям комфортной городской среды // Приложение к журналу «Известия вузов». Геодезия и аэрофотосъемка: сб. ст. по итогам науч.-техн. конф. 2020. № 11. С. 89–92.

19. Allbeson T. Photography, reconstruction and the cultural history of the postwar European City // *Routledge*. 2020. DOI: 10.4324/9781003086338

20. Kharlamova N.A. Reconstruction of power systems of small cities and rural settlements // *The Agrarian Scientific Journal*. 2020. Issue 9. Pp. 91–93. DOI: 10.28983/asj.y2020i9pp91-93

Поступила в редакцию May 27, 2021.

Принята в доработанном виде on July 21, 2021.

Одобрена для публикации on July 21, 2021.

ОБ АВТОРАХ: Ийлаф Хишам Мурад Алашкар — аспирант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1104169; eilaf.alashkar1992@gmail.com;

Юрий Владимирович Алексеев — доктор архитектуры, профессор кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 690296; Alekseev-grado@yandex.ru;

Алиреза Маджорзадехзахири — аспирант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1103511, Scopus: 57209311034, ORCID: 0000-0002-9800-8830; alireza_majorzadehzahiri@yahoo.com.

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

УДК 625.14:624.042.7

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.809-818

Сейсмическое поведение главной балки моста с вязкоупругими демпферами

А.А. Локтев^{1,2}, Ахмад Баракат¹, Джаафар Кбейли¹

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

²Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Обеспечение сейсмостойкости несущих конструкций — одна из основных задач при проектировании и возведении сооружений в сейсмоопасных районах. Рассмотрено влияние свойства некоторого демпфера, находящегося в месте опирания элементов конструкций, на сейсмический ответ главной балки сталебетонного моста при сейсмическом воздействии. Цель исследования — выбрать оптимальные значения параметров вязких и упругих элементов для обеспечения сейсмостойкости моста.

Материалы и методы. Геометрические характеристики моста моделируются посредством метода конечных элементов с применением стержневых элементов при моделировании балок моста и вязкоупругих демпферов при моделировании буфера. Используются различные значения упругих и вязких характеристик демпфера в виде пар. Расчет моста проведен прямым динамическим методом в нелинейной постановке.

Результаты. Получены кривые зависимости горизонтальных перемещений и вертикальных прогибов от времени для каждой пары значений упругих и вязких характеристик демпфера для моделей Максвелла и Кельвина – Фойгта. Изучено влияние изменений в значениях параметров жесткости и демпфирования на значения периода и частот собственных колебаний этой пролетной конструкции.

Выводы. Подбираются параметры демпфера, которые позволяют минимизировать сейсмические перемещения балки моста и дают оптимальное гашение динамического взаимодействия элементов этого моста. Вязкоупругие элементы типа Кельвина – Фойгта предоставляют более регулярные значения горизонтальных перемещений балки моста при изменении направления сейсмического воздействия, также рекомендуется пара значений параметров вязкоупругих элементов 20 000 кН/м, 800 кН · с/м с использованием модели Кельвина – Фойгта для проектирования вязкоупругого демпфера.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пролетное строение, сейсмические воздействия, вязкоупругий демпфер, параметры вязкости, параметры упругости, горизонтальное перемещение, вертикальный прогиб

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Локтев А.А., Баракат Ахмад, Кбейли Джаафар. Сейсмическое поведение главной балки моста с вязкоупругими демпферами // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 809–818. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.809-818

Seismic behavior of the main girder of a bridge with viscoelastic dampers

Aleksey A. Loktev^{1,2}, Ahmad Barakat¹, Jaafar Qbaily¹

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

²Russian University of Transport (RUT); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The seismic stability of bearing structures is one of the main objectives of design and construction of structures in earthquake areas. The co-authors have analyzed the effect of a damper, located at the intersection of structural elements, on the seismic response of the main girder of a steel-concrete bridge exposed to the seismic impact. The purpose of this study is to select optimal values of viscous and elastic elements to ensure the seismic resistance of the bridge.

Materials and methods. The finite element method was used to simulate the geometric characteristics of the bridge. The model of the bridge has rod elements to simulate girders and viscous elastic elements to simulate dampers. In the study, different values of elastic and viscous characteristics of the damper were used in pairs. The nonlinear problem statement helped to analyze the bridge structure using the direct dynamic method.

Results. As a result, we obtained a graphic chart describing the relationship between horizontal displacements and the time for each pair of values of elastic and viscous characteristics of the damper for Maxwell and Kelvin – Voigt models. The effect of changes in the values of stiffness and damping parameters on the values of the period and eigenfrequencies of this superstructure was also investigated.

Conclusions. The co-authors chose the damper parameters to minimize seismic displacements of the bridge girder and optimally suppress the dynamic interaction between the bridge elements. Viscoelastic elements of the Kelvin – Voigt type provide more regular values of horizontal displacements of the girder when the direction of the seismic effect changes. We also recommend to select the pair of values equal to 20 000 kN/m, 800 kN s/m, and to use the Kelvin – Voigt model in the design of a viscoelastic damper.

KEYWORDS: superstructure, seismic effects, viscoelastic damper, parameters of viscosity, parameters of elasticity, horizontal displacement, vertical deflection

FOR CITATION: Loktev A.A., Barakat Ahmad, Qbaily Jaafar. Seismic behavior of the main girder of a bridge with viscoelastic dampers. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(7):809-818. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.809-818 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение сейсмостойкости несущих конструкций — одна из основных задач при проектировании и возведении сооружений в сейсмоопасных районах. Вследствие этого появилось множество техник для защиты пролетных конструкций при сейсмическом воздействии, таких как сейсмоизоляция, сейсмические демпфирующие устройства и т.д.

Сейсмические изоляторы снижают сейсмическую нагрузку на конструктивные элементы мостов во время землетрясения, обычно устанавливаются между крайней опорой и пролетным строением или промежуточной опорой и пролетным строением, как показано на рис. 1 [1–4].

Проектирование узла опирания пролетного строения на береговую и русловую опоры является важным вопросом. В данной работе узлы крепле-

ния пролетного строения и ригельной балки опоры предлагается моделировать с помощью вязкоупругих элементов, для которых можно подобрать значения вязкого сопротивления и коэффициента жесткости демпфера, позволяющие выполнить условия совместности деформирования простейших элементов изолирующего демпфера.

Теоретическая концепция сейсмической изоляции проиллюстрирована для бокового отклика изолированного автомобильного моста с использованием идеализированной модели с двумя степенями свободы (рис. 2). Предполагается, что изоляционная система ведет себя линейно, а колонны также остаются упругими при возбуждении движения грунта [5–7]. Уравнение движения, основанное на относительном смещении пролетного строения и основания, можно записать в виде:

$$\begin{bmatrix} m_d & m_d \\ m_d & m_d + m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_d \\ \ddot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_d & m_d \\ m_d & m_d + m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g, \quad (1)$$

где m_d — масса пролетного строения; m_s — масса субструктуры; x_d — относительное смещение пролетного строения относительно верхней части опоры; x_s — относительное смещение верхней части опоры относительно земли; k_b и c_b — эффективные коэффициенты жесткости и демпфирования изолирующей системы; k_s и c_s — коэффициенты жесткости и демпфирования субструктуры; $\ddot{x}_g$ — ускорение земли.

Для гашения колебаний в работе рассматриваются два типа узла опирания пролетного стро-

ения на опору: вязкоупругий узел типа Максвелла (рис. 3, а) и типа Кельвина – Фойгта (рис. 3, б). Приведенные вязкоупругие модели — простейшие в своем классе, но позволяют подобрать параметры опирания в зависимости от начального воздействия и рассчитать время нахождения опорной части в деформированном состоянии. Варьирование вязких и упругих параметров узла опирания дает возможность определить набор параметров и тип используемых материалов для гашения колеба-

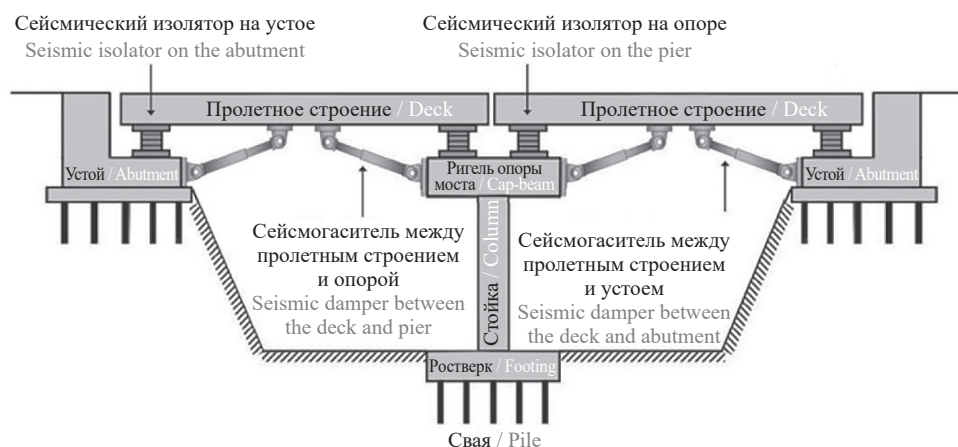


Рис. 1. Размещение сейсмозащитных систем в типовом двухпролетном автомобильном мосту
Fig. 1. Seismic protection of a standard double-span motor bridge

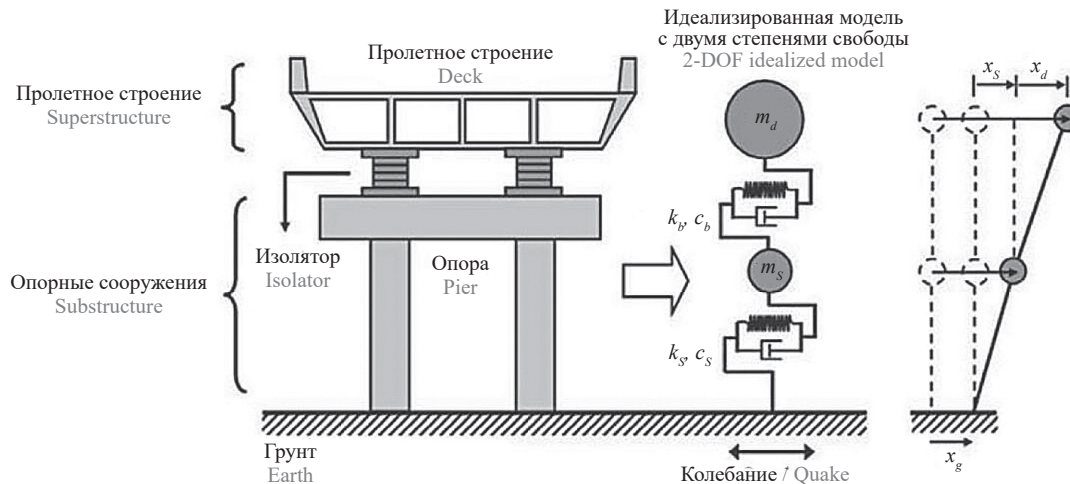


Рис. 2. Моделирование бокового движения изолированного автомобильного моста

Fig. 2. Simulation of lateral motion of an isolated motor bridge

тельных процессов от динамической нагрузки как со стороны подвижного состава, так и со стороны грунта основания от сейсмических воздействий.

Пролетные конструкции поглощают огромное количество энергии от землетрясений. Данная энергия может вызвать значительные деформации, вплоть до разрушения этих сооружений. Конструкция должна обладать способностью рассеивать эту энергию либо путем постоянной деформации, либо с помощью демпферов, размещенных в конструкции. Наиболее часто применяемый демпфер основан на вязких жидкостях или гидравлических демпферах [8–11]. Вязкость или внутреннее трение — это сила трения, возникающая при трении одного слоя жидкости о другой во время их движения. Наличие вязкоупругих элементов в местах опирания мостовых конструкций позволяет уменьшить динамические эффекты, в том числе сейсмические эффекты, на элементы балочного пролетного строения [12, 13].

Типами демпфирования являются вязкое и истерическое демпфирование. Вязкое демпфиро-

вание зависит от частоты. Гистерезисное демпфирование предполагает нелинейные соотношения между напряжениями и деформациями [14–16]. Для вязкого демпфирования мы имеем соотношение силы и скорости, как в уравнении (2):

$$F = cv^n, \quad (2)$$

где F — сила; c — постоянная величина демпфирования; v — скорость. Соотношение между демпфированием и критическим демпфированием для вязких демпферов составляет 0,61. При вязком демпфировании кривая, представляющая соотношение между силой и перемещением, имеет эллиптическую форму. Поверхность эллипса представляет собой энергию, рассеянную в цикле. Рассеянная энергия пропорциональна квадрату амплитуды движения. Для истерического демпфирования энергия, рассеиваемая в цикле, не зависит от частоты для этого типа демпфирования:

$$F = kx, \quad (3)$$

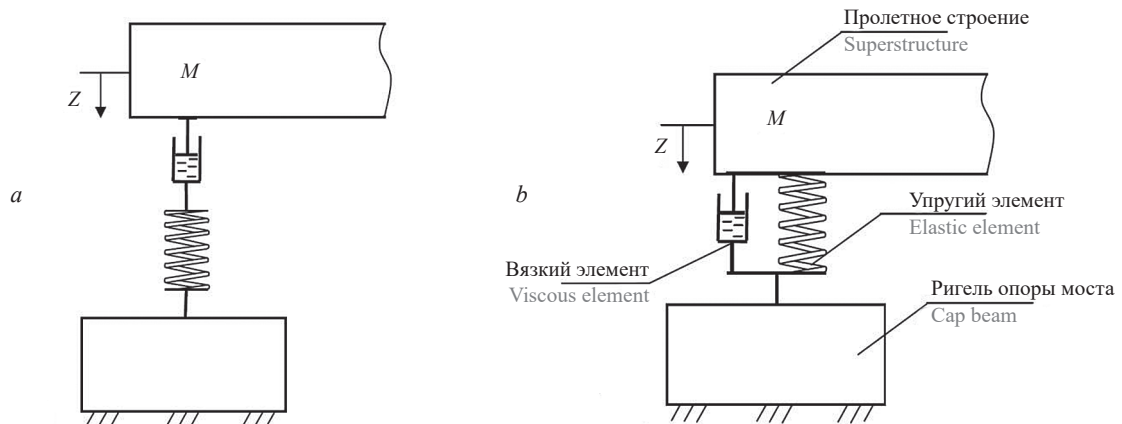


Рис. 3. Вязкоупругая модель опирания пролетного строения на ригельную балку опоры с одной степенью свободы, с вязкоупругими демпферами, описывающими динамическое взаимодействие на опору моста: а — элемент Максвелла; б — элемент Кельвина – Фойгта

Fig. 3. Viscoelastic model of a superstructure resting on the support beam with one degree of freedom, with viscoelastic dampers: а — the Maxwell element; б — the Kelvin – Voigt element

где F — сила; k — константа гистерезисного демпфирования; x — смещение. Константа гистерезисного демпфирования — это мера петли гистерезиса и характеристика материала или конструкции. Энергия, рассеиваемая за каждый цикл, не пропорциональна квадрату амплитуды движения. В инженерной практике вязкоупругие элементы обычно устанавливаются в местах крепления элементов, динамическое воздействие на которые различно по своему характеру и способу приложения. Например, пролетное строение необходимо демпфировать для уменьшения последствий от сейсмического воздействия со стороны грунта основания [17–19]. Для обеспечения совместной работы вязкого демпфера и упругого элемента при сейсмических воздействиях требуется определить значения вязкого сопротивления и коэффициента жесткости простейших элементов, входящих в модель демпфирующего узла.

В работе использованы два типа вязкоупругих демпферов — Максвелла (рис. 3, а) и Кельвина – Фойгта (рис. 3, б). Ответная реакция конструкции на сейсмическое воздействие позволяет установить преимущества применения того или иного демпфирующего узла по изменению характеристик вязкого сопротивления и коэффициента жесткости элементов, входящих в модель демпфирующего узла, для минимизирования сейсмических перемещений и выбора оптимального гашения динамического взаимодействия элементов конструкций [12, 17–19].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поперечная вибрация балок определяется известным уравнением Бернулли – Эйлера. Для разработки управляющего уравнения рассмотрим диаграмму свободного тела балочного элемента при изгибе, показанную на рис. 4. На рис. 4 $M(x, t)$ — изгибающий момент; $Q(x, t)$ — сила сдвига; $f(x, t)$ — внешняя сила на единицу длины, действующая на балку.

Равновесное состояние моментов приводит к следующему уравнению:

$$M + Q\delta x - \left(M + \frac{\partial M}{\partial x} \delta x \right) = 0 \quad (4)$$

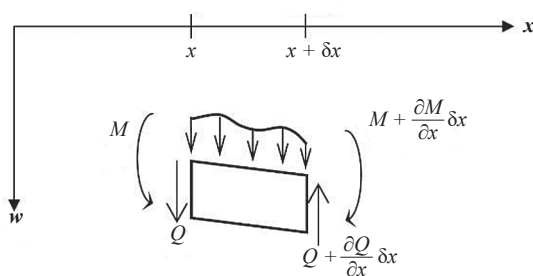


Рис. 4. Схема свободного тела балочного элемента при изгибе

Fig. 4. The free body diagram of a beam element under bending

или

$$Q = \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(EI + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right). \quad (5)$$

Уравнение движения в поперечном направлении для балочного элемента имеет вид:

$$(\rho A \delta x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = f(x, t) \delta x + Q - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \delta x \right), \quad (6)$$

где ρ — массовая плотность материала балки. После упрощений уравнение (5) можно переписать следующим образом:

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial Q}{\partial x} = f(x, t). \quad (7)$$

С учетом уравнения (5) получается управляющее уравнение для вынужденных поперечных колебаний, как показано ниже, которое является хорошо известным уравнением Эйлера – Бернулли:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = f(x, t). \quad (8)$$

Предлагается рассмотреть изначально прямую неоднородную балку Эйлера–Бернулли (ЕВ) длиной L , с переменным поперечным сечением $A = A(x)$, с переменной жесткостью $E = E(x)$ и переменным моментом инерции $I = I(x)$. Пусть $x \in [0, L]$ и $t \in [0, \infty)$ — пространственные и временные переменные соответственно. Управляющим уравнением для поперечных колебаний балки с переменной массой на единицу длины $m(x)$ и коэффициентом демпфирования $c(x)$, подвергающимся вертикальной изменяющейся во времени распределенной нагрузке $P(x, t)$, является дифференциальное уравнение в частных производных четвертого порядка, выраженное в виде [20]:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E(x) I(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + c(x) \frac{\partial w}{\partial t} + m(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = P(x, t), \quad (9)$$

при этом $w(x, t)$ — функция поперечного смещения.

Соотношение силы и деформации вязкоупругого демпфера:

1. Модель Максвелла: соотношение силы и деформации элемента выглядит следующим образом:

$$f = C_d \operatorname{sign}(\dot{d}_d) \left| \frac{\dot{d}_d}{v_0} \right|^s = K_b d_b, \quad d = d_d + d_b. \quad (10)$$

2. Модель Кельвина: соотношение силы и деформации элемента выглядит так:

$$f = k_d d_d + C_d \operatorname{sign}(\dot{d}_d) \left| \frac{\dot{d}_d}{v_0} \right|^s, \quad d = d_d. \quad (11)$$

где k_d — жесткость вязкоупругого демпфера; c_d — коэффициент демпфирования вязкоупругого демпфера; k_b — жесткость соединительного элемента; s — экспонента, определяющая свойство нелинейности вязкого демпфирования вязкоупругого демпфера; d — деформация элемента между двумя узлами; d_d — деформация вязкоупругого демпфера; d_b — деформация соединительного элемента; v_0 — эталонная скорость деформации.

Для численных исследований предполагаем мост, состоящий из двух сталебетонных балок с длинами пролетов 38,1; 50,8; 38,1 м. Ширина моста равна 12,34 м, высота колонн — 6,35 м. Свойства материалов: сталь ASTM09(S), A53 и бетон $f_c' = 4.0 \text{ ksi}$, ASTM(RC), Grade C4000. Геометрические характеристики сечения балки моста показаны на рис. 5.

Главные балки моста опираются на ригельные балки четырьмя вязкоупругими элементами, у которых параметры жесткости и демпфирования одинаковы по всем направлениям ($K_x = K_y = K_z$, $C_x = C_y = C_z$).

Мост моделируется программным комплексом Midas Civil методом конечных элементов с использованием стержневых элементов при моделировании балок моста и вязкоупругих демпферов при моделировании буфера (рис. 6).

Расчет проведен для пяти пар значений параметров вязкости и упругости опорного буфера (60 000 кН/м, 400 кН · с/м), (20 000 кН/м, 800 кН · с/м), (4000 кН/м, 4000 кН · с/м), (2000 кН/м, 8000 кН · с/м), (1000 кН/м, 20 000 кН · с/м) для моделей Максвелла и Кельвина – Фойгта. Расчет проведен на КЗ прямым динамическим методом в нелинейной постановке акселерограммой «1940, El Centro Site, 180 Deg» по направлению X и «1940, El Centro Site, 270 Deg» по направлению Y .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получены кривые зависимости горизонтальных перемещений и вертикальных прогибов от времени для каждой пары значений упругих и вязких

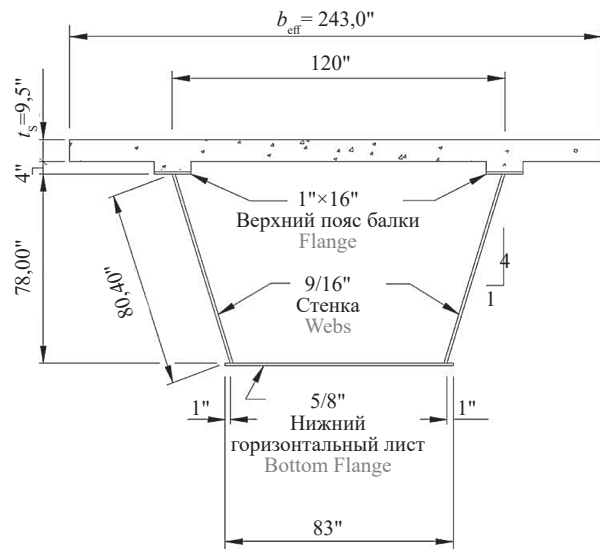


Рис. 5. Геометрические характеристики сечения балки моста

Fig. 5. Geometric characteristics of the cross section of a bridge beam

характеристик демпфера для моделей Максвелла и Кельвина – Фойгта (рис. 7).

Также получены кривые влияния изменений в значениях параметров жесткости и демпфирования на значения частот собственных колебаний для первых двадцати форм собственных колебаний (рис. 8).

В дополнение к вышесказанному было исследовано влияние изменений в значениях параметров жесткости и демпфирования на значения периода этой пролетной конструкции, как представлено в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Можно отметить влияние увеличения параметров демпфирования и уменьшения параметров жесткости на значения горизонтальных перемещений главной балки моста для модели Максвелла так, что видны большие значения перемещений при больших значениях упругих и маленьких значениях вязких характеристик демпфера, также значения перемещений снижаются регулярно в соответствии с увеличением параметров демпфирования. Значение максимального горизонтального перемещения по одному направлению сейсмического воздействия

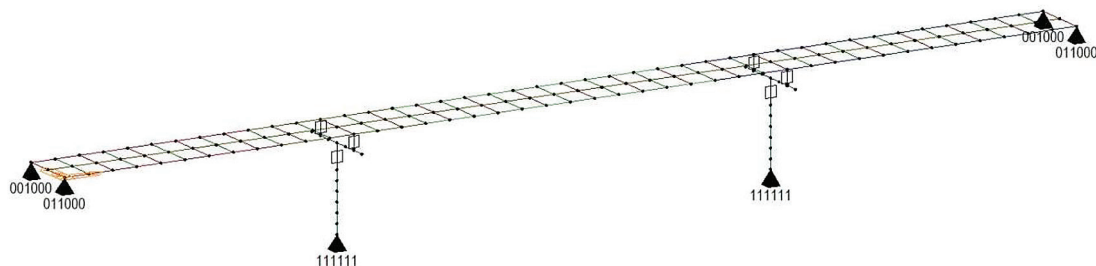


Рис. 6. Модель конечных элементов моста

Fig. 6. The finite element model of a bridge

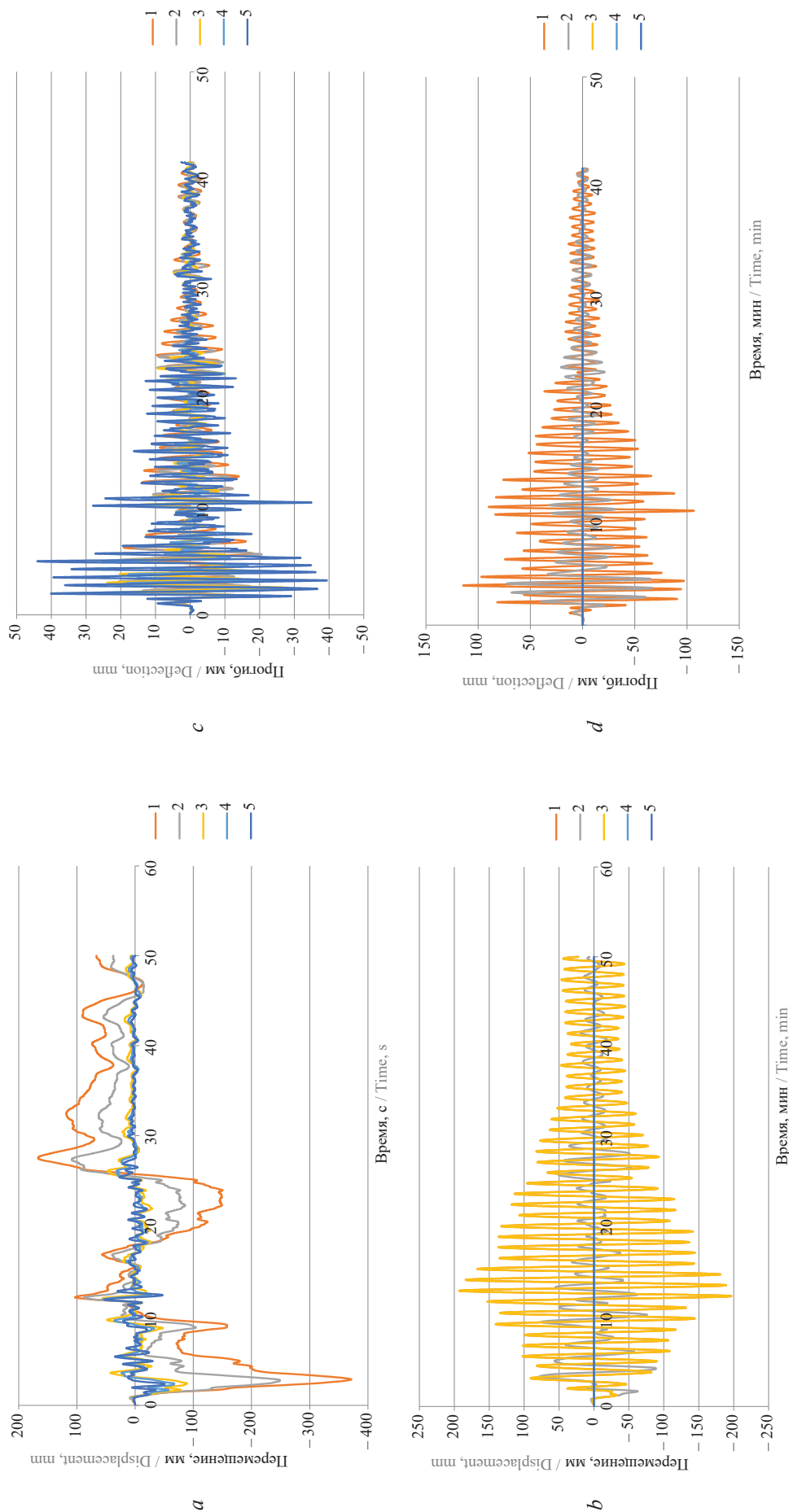


Рис. 7. Зависимость горизонтального и вертикального сейсмического перемещения от времени: *a* — зависимость горизонтального перемещения для модели Максвелла от времени; *b* — зависимость вертикального перемещения (прогиба) для модели Максвелла от времени; *c* — зависимость горизонтального перемещения для Кельвина-Фойгта от времени; *d* — зависимость вертикального перемещения (прогиба) для модели Максвелла от времени; кривые 1 получены при $C = 60\,000$ кН/м, $K = 400$ кН/м; кривые 2 соответствуют $C = 20\,000$ кН/м, $K = 800$ кН/м; кривые 3 — $C = 4000$ кН/м, $K = 4000$ кН/м; кривые 4 — $C = 2000$ кН/м, $K = 8000$ кН/м; кривые 5 — $C = 1000$ кН/м, $K = 20\,000$ кН/м

Fig. 7. Dependence of horizontal and vertical seismic displacements on time: *a* — dependence of the horizontal displacement of the Maxwell model on time; *b* — dependence of the vertical displacement (deflection) of the Maxwell model on time; *c* — dependence of the horizontal displacement of the Kelvin-Voigt model on time; *d* — dependence of the vertical displacement (deflection) of the Maxwell model on time; curves 1 are obtained at $C = 60,000$ kN/m, $K = 400$ kN/m; curves 2 correspond to $C = 20,000$ kN/m, $K = 800$ kN/m; curves 3 — $C = 4,000$ kN/m, $K = 4,000$ kN/m; curves 4 — $C = 2,000$ kN/m, $K = 8,000$ kN/m; curves 5 — $C = 1,000$ kN/m, $K = 20,000$ kN/m



Рис. 8. Частоты форм собственных колебаний: кривые 1 получены при $C = 60\,000$ кН/м, $K = 400$ кН · с/м; кривые 2 соответствуют $C = 20\,000$ кН/м, $K = 800$ кН · с/м; кривые 3 — $C = 4000$ кН/м, $K = 4000$ кН · с/м; кривые 4 — $C = 2000$ кН/м, $K = 8000$ кН · с/м; кривые 5 — $C = 1000$ кН/м, $K = 20\,000$ кН · с/м

Fig. 8. Eigenfrequencies: curves 1 are obtained at $C = 60\,000$ кН/м, $K = 400$ кН · с/м; curves 2 correspond to $C = 20\,000$ кН/м, $K = 800$ кН · с/м; curves 3 — $C = 4\,000$ кН/м, $K = 4\,000$ кН · с/м; curves 4 — $C = 2\,000$ кН/м, $K = 8\,000$ кН · с/м; curves 5 — $C = 1\,000$ кН/м, $K = 20\,000$ кН · с/м

Периоды собственных колебаний

Periods of eigenfrequencies

Номер No.	Кривые Curves	Период для первой формы собственных колебаний, с Period for the first form of eigenfrequencies, s
1	$C = 60\,000$ кН/м, $K = 400$ кН · с/м $C = 60\,000$ кН/м, $K = 400$ кН · с/м	1,2
2	$C = 20\,000$ кН/м, $K = 800$ кН · с/м $C = 20\,000$ кН/м, $K = 800$ кН · с/м	1,65
3	$C = 4000$ кН/м, $K = 4000$ кН · с/м $C = 4\,000$ кН/м, $K = 4\,000$ кН · с/м	3,27
4	$C = 2000$ кН/м, $K = 8000$ кН · с/м $C = 2\,000$ кН/м, $K = 8\,000$ кН · с/м	4,54
5	$C = 1000$ кН/м, $K = 20\,000$ кН · с/м $C = 1\,000$ кН/м, $K = 20\,000$ кН · с/м	6,36

почти в два раза больше максимального перемещения по обратному направлению.

Для вертикального сейсмического прогиба модели Максвелла получили результаты, противоположные предыдущим при горизонтальном перемещении, так что при увеличении параметров демпфирования и уменьшении параметров жесткости увеличиваются значения вертикального сейсмического прогиба.

Для модели Кельвина – Фойгта можно отметить большое влияние увеличения параметров демпфирования на горизонтальное и вертикальное перемещение, так что для последних трех кривых перемещения практически равны нулю.

При анализе влияния изменений параметров демпфирования и жесткости на значения частоты и периода определили, что:

- тип вязкоупругих элементов не влияет на значения частоты и периода, поскольку результаты были одинаковыми для моделей Максвелла и Кельвина – Фойгта;
- при маленьких значениях упругих параметров значения частот собственных колебаний одинаковы ($3 = 4 = 5$);
- увеличение значений демпфирования и уменьшение значений жесткости вязкоупругого демпфера приводит к увеличению значений периода.

Проведенное исследование позволило понять влияние изменения значений параметров вязкоупругих

элементов на перемещения главных балок пролетного строения при сейсмических воздействиях. Также выявлена возможность сильного уменьшения значений горизонтальных перемещений балки моста при использовании вязкоупругих демпферов с большими значениями коэффициентов демпфирования для обоих типов вязкоупругих элементов (Максвелла или Кельвина – Фойгта). С другой стороны, можно заключить, что вязкоупругие элементы типа Кельвина – Фойгта предоставляют более регулярные значения горизонтальных перемещений балки моста при изменении направления сейсмической вибрации. К тому же значения горизонтальных перемещений балки моста при использовании вязкоупругих элементов типа Кельвина – Фойгта меньше, чем эти значения при применении вязкоупругих элементов типа Максвелла особенно для маленьких значений коэффициентов демпфирования.

По результатам исследования рекомендуется пара значений параметров вязкоупругих элементов 20 000 кН/м, 800 кН · с/м с использованием модели

Кельвина – Фойгта, так как она дает неплохие средние значения горизонтальных перемещений и вертикальных сейсмических прогибов балки, также со средними значениями периода и частот собственных колебаний.

Анализируя полученные графические зависимости, можно отметить различный характер поведения кривых, описывающих зависимость перемещений точек балки пролетного строения от времени для моделей Максвелла и Кельвина – Фойгта, различные зависимости частоты и периода колебаний в зависимости от соотношений параметров упругости и вязкости демпфера. Важно заметить, что, варьируя характеристики вязкого и упругого модуля опорного узла, возможно добиться как увеличения, так и уменьшения максимальной величины перемещения по сравнению с перемещениями традиционных конструкций как мостовых переходов, так и в целом сооружений, имеющих расчетную балочную схему.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gimenez J.L., Himeno T., Yoshihara S., Nuruz-zaman A.S.Md. Seismic isolation of bridges: devices, common practices in Japan, and examples of application // 4th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE). 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publication/330337754>
2. Shrestha B., Hao H., Bi K. Devices for protecting bridge superstructure from pounding and unseating damages: an overview // Structure and Infrastructure Engineering. 2017. Vol. 13. Issue 3. Pp. 313–330. DOI: 10.1080/15732479.2016.1170155
3. Scheaua F. Practical method of obtaining different levels of seismic energy dissipation using viscous fluid protective system on bridges // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 916. P. 012101. DOI: 10.1088/1757-899X/916/1/012101
4. Phillips B.M. et al. Real-time hybrid simulation benchmark study with a large-scale MR damper // Proc. of the 5th WCSCM. 2010. Pp. 12–14.
5. Vatanshenas A., Bajestany D.S., Aghelfard A. The Effect of Seismic Isolation on the Response of Bridges // International Journal of Bridge Engineering (IJBE). 2018. Vol. 6. Issue 3. Pp. 61–74. URL: <https://www.researchgate.net/publication/330364697>
6. Bhowmik K., Saha P. Seismic response control of benchmark highway bridge using passive hybrid control systems // International Journal of Materials and Structural Integrity. 2017. Vol. 11. Issue 4. P. 155. DOI: 10.1504/IJMSI.2017.089655
7. Kalantari A. Seismic vertical component effects on seismic demands of a base isolated bridge with friction-rubber bearings // Civil Engineering Research Journal. 2018. Vol. 3. Issue 4. DOI: 10.19080/CERJ.2018.03.555617
8. Kim S., Kim H.K. Damping identification of bridges under nonstationary ambient vibration // Engineering. 2017. Vol. 3. Issue 6. Pp. 839–844. DOI: 10.1016/j.eng.2017.11.002
9. Durseneva N.V., Indeykin A.V., Kuznetsova I.O., Uzdin A.M., Fedorova M. Peculiarities of calculating bridges with seismic isolation including spherical bearings and hydraulic dampers in Russia // Journal of Civil Engineering and Architecture. 2015. Vol. 9. Issue 4. DOI: 10.17265/1934-7359/2015.04.004
10. Zhang Y., Li J., Wang L., Wu H. Study on the seismic performance of different combinations of rubber bearings for continuous beam bridges // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–22. DOI: 10.1155/2020/8810874
11. Li Y., Zong Z., Yang B. Experimental study on seismic performance of concrete continuous bridge with HDR bearings // Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. 2020. Vol. 101. Issue 2. Pp. 293–314. DOI: 10.1007/s40030-020-00438-4
12. Локтев А.А., Гридасова Е.А., Залетдинов А.В., Локтев Д.А., Степанов К.Д. Вязкоупругое демпфирование элементов мостовых переходов при динамическом воздействии // Нелинейный мир. 2018. Т. 16. № 5. С. 33–43. DOI: 10.18127/j20700970-201805-04
13. An L., Li D., Yu P., Yuan P. Numerical analysis of dynamic response of vehicle–bridge coupled system on long-span continuous girder bridge // Theoretical and Applied Mechanics Letters. 2016. Vol. 6. Issue 4. Pp. 186–194. DOI: 10.1016/j.taml.2016.05.006
14. Heysami A. Types of dampers and their seismic performance during an earthquake // Current World Environment. 2015. Vol. 10. Issue Special-Issue1. Pp. 1002–1015. DOI: 10.12944/CWE.10.Special-Issue1.119

15. Zhang Y. Study on seismic behaviour for high damping rubber bearings of continuous beam bridges // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 153. P. 052049. DOI: 10.1088/1755-1315/153/5/052049

16. Wu F., Zhang Q., Feng B., Qiu J. Research on the aseismic behavior of long-span cable-stayed bridge with damping effect // Stavební obzor — Civil Engineering Journal. 2016. Vol. 25. Issue 2. DOI: 10.14311/CEJ.2016.02.0008

17. Бабкова Н. Мостостроение: современные технологии // САПР и графика. 2012. № 2 (184). С. 50–52.

18. Поляков В.Ю. Синтез оптимальных пролетных строений для высокоскоростной магистрали // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 3 (266). С. 35–42.

19. Железнякова Е.А., Осинцев А.В. Определение собственных частот и визуализация форм колебаний элементов конструкций // Научная визуализация. 2018. Т. 10. № 3. С. 45–57. DOI: 10.26583/sv.10.3.03

20. Fakhreddine H., Adri A., Rifai S., Benamar R. Nonlinear free and forced vibration of Euler-Bernoulli beams resting on intermediate flexible supports // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 211. P. 02003. DOI: 10.1051/mateconf/201821102003

Поступила в редакцию 30 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 20 июля 2021 г.

Одобрена для публикации 20 июля 2021 г.

Об авторах: **Алексей Алексеевич Локтев** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; заведующий кафедрой механики деформируемого твердого тела; **Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ))**; 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; РИНЦ ID: 16528; aaloktev@yandex.ru;

Ахмад Баракат — аспирант кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ahmadbarakat9992@gmail.com;

Джаафар Кбейли — аспирант кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; jaafarqbaily@gmail.com.

REFERENCES

1. Gimenez J.L., Himeno T., Yoshihara S., Nuruz-zaman A.S.Md. Seismic isolation of bridges: devices, common practices in Japan, and examples of application. *4th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE)*. 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publication/330337754>

2. Shrestha B., Hao H., Bi K. Devices for protecting bridge superstructure from pounding and unseating damages: an overview. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2017; 13(3):313-330. DOI: 10.1080/15732479.2016.1170155

3. Scheaua F. Practical method of obtaining different levels of seismic energy dissipation using viscous fluid protective system on bridges. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 916:012101. DOI: 10.1088/1757-899X/916/1/012101

4. Phillips B.M. et al. Real-time hybrid simulation benchmark study with a large-scale MR damper. *Proc. of the 5th WCSCM*. 2010; 12-14.

5. Vatanshenas A., Bajestany D.S., Aghelfard A. The effect of seismic isolation on the response of bridges. *International Journal of Bridge Engineering (IJBE)*. 2018; 6(3):61-74. URL: <https://www.researchgate.net/publication/330364697>

6. Bhowmik K., Saha P. Seismic response control of benchmark highway bridge using passive hybrid control systems. *International Journal of Materials and Structural Integrity*. 2017; 11(4):155. DOI: 10.1504/IJMSI.2017.089655

7. Kalantari A. Seismic Vertical Component Effects on Seismic Demands of a Base Isolated Bridge with Friction-Rubber Bearings. *Civil Engineering Research Journal*. 2018; 3(4). DOI: 10.19080/CERJ.2018.03.555617

8. Kim S., Kim H.K. Damping identification of bridges under nonstationary ambient vibration. *Engineering*. 2017; 3(6):839-844. DOI: 10.1016/j.eng.2017.11.002

9. Durseneva N.V., Indeykin A.V., Kuznetsova I.O., Uzdin A.M., Fedorova M. Peculiarities of calculating bridges with seismic isolation including spherical bearings and hydraulic dampers in Russia. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2015; 9(4). DOI: 10.17265/1934-7359/2015.04.004

10. Zhang Y., Li J., Wang L., Wu H. Study on the seismic performance of different combinations of rubber bearings for continuous beam bridges. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020:1-22. DOI: 10.1155/2020/8810874

11. Li Y., Zong Z., Yang B. Experimental study on seismic performance of concrete continuous bridge with HDR bearings. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*. 2020; 101(2):293-314. DOI: 10.1007/s40030-020-00438-4
12. Loktev A.A., Gridasova A.E., Zavletdinov A.V., Loktev D.A., Stepanov K.D. Viscoelastic damping of bridge transitions elements at dynamic impact. *Nonlinear World*. 2018; 16(5):33-43. DOI: 10.18127/j20700970-201805-04 (rus.).
13. An L., Li D., Yu P., Yuan P. Numerical analysis of dynamic response of vehicle-bridge coupled system on long-span continuous girder bridge. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2016; 6(4):186-194. DOI: 10.1016/j.taml.2016.05.006
14. Heysami A. Types of dampers and their seismic performance during an earthquake. *Current World Environment*. 2015; 10(Special-Issue1):1002-1015. DOI: 10.12944/CWE.10.Special-Issue1.119
15. Zhang Y. Study on seismic behaviour for high damping rubber bearings of continuous beam bridges. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 153:052049. DOI: 10.1088/1755-1315/153/5/052049
16. Wu F., Zhang Q., Feng B., Qiu J. Research on the aseismic behavior of long-span cable-stayed bridge with damping effect. *Stavebni obzor — Civil Engineering Journal*. 2016; 25(2). DOI: 10.14311/CEJ.2016.02.0008
17. Babkova N. Bridge construction: modern technologies. *CAD and Graphics*. 2012; 2(184):50-52. (rus.).
18. Polyakov V.Yu. Synthesis of optimal spans for a high-speed line. Structural mechanics and calculation of structures. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2016; 3(266):35-42. (rus.).
19. Zheleznyakova E.A., Osintsev A.V. Determination natural frequencies and mode shapes imaging element structures. *Scientific Visualization*. 2018; 10(3):45-57. DOI: 10.26583/sv.10.3.03 (rus.).
20. Fakhreddine H., Adri A., Rifai S., Benamar R. Nonlinear free and forced vibration of Euler-Bernoulli beams resting on intermediate flexible supports. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 211:02003. DOI: 10.1051/mateconf/201821

Received March 30, 2021.

Adopted in revised form on July 20, 2021.

Approved for publication on July 20, 2021.

BIONOTES: **Aleksey A. Loktev** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Building and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of the Department of the Mechanics of a deformable Solid; **Russian University of Transport (RUT)**; bldg. 9, 9 Obratsova st., GSP-4, Moscow, 127994, Russian Federation; ID RISC: 16528; aaloktev@yandex.ru;

Ahmad Barakat — postgraduate student of the Department of Building and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ahmadbarakat9992@gmail.com;

Jaafar Qbaily — postgraduate student of the Department of Building and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; jaafarqbaily@gmail.com.

Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций из заполненных оболочек

Н.Я. Цимбельман, Т.И. Чернова, М.А. Селиванова, В.С. Редько

Дальневосточный федеральный университет (ДФУ); г. Владивосток, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Вопросы исследования напряженно-деформированного состояния сооружений из заполненных оболочек остаются актуальными в части изучения взаимодействия основных элементов конструкции (оболочки, наполнителя, основания), установления оптимального сочетания характеристик оболочки и наполнителя, условий их контакта. Рассматриваются результаты исследования расчетной модели тонкой цилиндрической оболочки с внутренним наполнителем.

Материалы и методы. Решается задача определения эффективного соотношения основных размеров конструкции с точки зрения наиболее равномерного распределения усилий в оболочке для принятых ограничений, касающихся условий нагружения, закрепления, описания взаимодействия элементов модели. При этом принято во внимание соотношение показателей механических свойств материала наполнителя и оболочки. Критерий эффективности выявляется в результате оценки напряженного состояния конструкции, при котором внутренние усилия в оболочке распределены наиболее равномерно: радиальные усилия близки по значению усилиям, направленным вдоль образующей оболочки.

Результаты. Установлен диапазон эффективного соотношения основных размеров оболочки с учетом соотношения значений показателя деформационных свойств оболочки и наполнителя, которое определено для укрупненных групп внутреннего наполнителя, выделенных по величине значений показателей деформационных характеристик. Выявлены диапазоны соотношений геометрических, жесткостных и механических параметров системы, при которых конструкция может быть отнесена к категории заполненных оболочек, и для расчета которой могут быть применены соответствующие положения расчетного моделирования.

Выводы. Результаты работы позволяют осуществлять подбор параметров конструкции исходя из заданных условий и критерия равномерности распределения усилий в оболочке. Исследование также дает возможность установить соотношения указанных геометрических, жесткостных и механических параметров, при которых конструкцию при заданных расчетных условиях следует отнести к категории заполненных оболочек или «оболочек с наполнителем».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цилиндрическая оболочка, наполнитель, напряженно-деформированное состояние, заполненная оболочка, конечно-элементная модель, грунтовое основание

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Цимбельман Н.Я., Чернова Т.И., Селиванова М.А., Редько В.С. Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций из заполненных оболочек // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 819–827. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.819-827

A research on the stress-strain behaviour of structures made of filled shells

Nikita Ya. Tsimbelman, Tatyana I. Chernova, Mariya A. Selivanova, Vitalii S. Redko

Far Eastern Federal University (FEFU); Vladivostok, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study of the stress-strain state of structures, made of filled shells, remains relevant in terms of interaction between principal structural elements (the shell, the filler, the bed), identification of the optimal combination of shell/filler characteristics, and conditions of their contact. The article addresses the findings of the research on a structural model of a thin cylindrical shell with a filler.

Materials and methods. The problem of determining an effective ratio of basic dimensions of a structure is solved in the context of the maximally uniform distribution of forces in a shell with regard for the accepted constraints concerning the conditions of loading, fixing, and describing interaction between the model elements. In addition, the ratio of indicators of mechanical properties of the filler material and the shell is taken into account. The efficiency criterion is determined as a result of evaluating the stress state of a structure, at which forces inside the shell are distributed most evenly and the values of the radial forces are close to the forces directed along the generatrix of a shell.

Results. The range of the effective ratio of the main dimensions of a shell is identified with regard for the ratio of the values of the indicator of the stress-strain behaviour of the shell and the filler, which is identified for larger groups of the internal filler, distinguished by the value of indicators of deformation characteristics. The co-authors have identified the ranges of ratios of geometric, rigidity and mechanical parameters of the system, that allow the structure to be attributed to the category of filled shells whose analysis can be performed with the help of applicable provisions of computational modeling.

Conclusions. The results of the study allow for the selection of structural parameters based on the pre-set conditions and

the criterion of uniformity of distribution of forces in a shell. The study also enables to identify the ratios of the above geometric, rigidity and mechanical parameters at which the structure should be attributed to the category of filled shells or "shells that have a filler" under the pre-set design conditions.

KEYWORDS: cylindrical shell, filler, stress-strain state, a filled shell, a finite element model, soil foundation

FOR CITATION: Tsimbelman N.Ya., Chernova T.I., Selivanova M.A., Redko V.S. A research on the stress-strain behaviour of structures made of filled shells. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(7):819-827. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.819-827 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Оболочечные конструкции с наполнителем — перспективный тип конструкций в современном строительстве (гидротехническом, промышленном, гражданском), отличающийся рациональным сочетанием относительно дешевого наполнителя и материала оболочки, удерживающего наполнитель в проектное положение [1–10]. Такие конструкции применяют, например, в качестве несущей основы при возведении причальных и оградительных сооружений^{1, 2}. В дальнейшем при надлежащем обосновании область их использования может быть существенно расширена.

Основы теории оболочек были заложены в 40-х годах XX в. и направлены на построение математического аппарата описания работы оболочки под нагрузкой (В.З. Власов, А.Л. Гольденвейзер, Н.А. Кильчевский, А.И. Лурье, С.П. Тимошенко, Б.Н. Жемочкин и др.). Прикладные научные исследования, призванные адаптировать разработанные математические аппараты для построения методик расчета сооружений, развивались в трудах И.В. Федорова и В.И. Титовой (1952), А.И. Калаева (1956), Г. Шнибелли (1957), В.С. Кюминга (1960), Н. Овесена (1962), В.С. Христофорова (1964), М.А. Ильгамова, В.А. Иванова, Б.В. Гулина (1977), Г.Д. Хасхачих (1979), М. Сираси (1978), Токио Бозки (1981) и других ученых. Значительное число авторов, изучающих взаимодействие оболочки с наполнителем, проводили эксперименты на моделях с целью уточнения расчетной схемы сооружения, в частности определения возможности плоского сдвига внутри наполнителя оболочки и для решения других задач^{3, 4} [11–14].

Вопросы исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) сооружений из заполненных оболочек остаются актуальными в части изучения взаимодействия основных элементов

конструкции (оболочки, наполнителя, основания), определения оптимального сочетания характеристик оболочки и наполнителя, условий их контакта.

В данной работе проводятся исследования расчетной модели конструкции тонкой цилиндрической оболочки с внутренним наполнителем [15, 16]. Поставлена задача установить диапазон эффективного соотношения основных размеров оболочки (диаметра D к высоте H) с учетом соотношения значений показателя деформационных свойств наполнителя и оболочки (соотношение модулей деформации E_{inn}/E_{shell}). Критерий эффективности устанавливается в результате оценки напряженного состояния конструкции, при котором внутренние усилия в оболочке распределены наиболее равномерно: радиальные усилия N_R близки по значению усилиям N_M , направленным вдоль образующей оболочки. Исследование позволит также установить соотношения указанных геометрических (D/H), жесткостных (E_{inn}/E_{shell}) и механических параметров (N_M/N_R), при которых конструкцию при заданных расчетных условиях следует отнести к категории заполненных оболочек или «оболочек с наполнителем».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

К рассмотрению принята конструкция, состоящая из цилиндрической оболочки длиной H , наружным диаметром D с толщиной стенки t , полость которой заполнена однородным материалом меньшей жесткости [17, 18]. Оболочка является тонкой (соотношение $t/D \leq 1/40$ [19]). Оболочка торцом опирается на основание и жестко защемлена (рис. 1). Изучается внецентренное нагружение защемленной оболочки: для этого в плоскости верхнего торца оболочки приложена горизонтальная нагрузка P , кН (рис. 1). Нагрузка принималась неизменной для всего рассматриваемого диапазона размеров оболочки. Помимо указанной действующей силы, в расчет принимался собственный вес конструкции.

Полость оболочки заполнена сплошным однородным материалом (цилиндр диаметром $D = 2t$, высотой h). Конечно-элементная модель оболочки представлена 4-узловыми пластинами, внутренний наполнитель — упругий цилиндр из объемных 6- и 8-узловых элементов. Свойства материала оболочки и материала наполнителя [20] описаны физическими и жесткостными характеристиками — удельным весом γ_{shell} и γ_{inn} , модулем общей деформации E_{shell} и E_{inn} и коэффициентом Пуассона ν_{shell} и ν_{inn} .

¹ Sheet piles and design solutions. 2019. URL: <http://sheetpiling.arcelormittal.com>.

² Temporary cellular cofferdam design, installation, and removal at willow Island hydroelectric project. The Ruhlin Company & Mueser Rutledge Consulting Engineers. First presented at HydroVision, 2014.

³ Беккер А.Т., Селиверстов В.И. Способ испытания полых конструкций с наполнителем: авторское свидетельство № 1323903 (СССР). № 4015560/29-33; опубл. 13.12.85. Бюл. № 26.

⁴ Sheet piles and design solutions. 2019. URL: <http://sheetpiling.arcelormittal.com>.

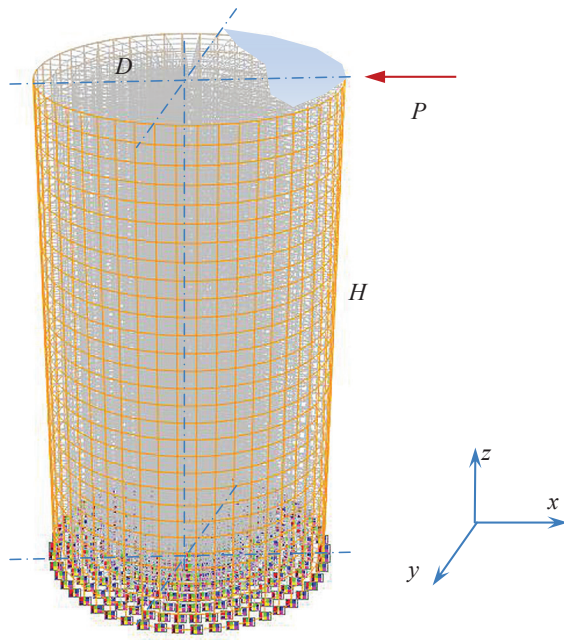


Рис. 1. Модель заполненной оболочки

Fig. 1. The model of a filled shell

Перемещения узлов верхнего торца объединены в горизонтальном направлении для возможности равномерного распределения горизонтальной нагрузки, прикладываемой к верху конструкции. Объединены также горизонтальные перемещения узлов внутренней поверхности оболочки и наружной поверхности цилиндра наполнителя. Модель составлена в программном комплексе SCAD Office.

Основные ограничения модели обоснованы стремлением приблизить ее к практическим условиям применения. Подразумеваются тонкая оболочка из стали; значительно меньшая удельная жесткость ядра (наполнителя), нежели оболочки; жесткое крепление оболочки нижним торцом к основанию (заделка в грунте); объединение перемещений верхней грани оболочки и наполнителя ввиду устройства жесткого оголовка конструкции^{5, 6}. Принятая схема нагрузки призвана обеспечить внецентренное нагружение конструкции с формированием максимальных внутренних усилий в области заделки оболочки в основание, а максимальных перемещений — на верхней грани конструкции по направлению действия силы (рис. 1). Принято 9 значений соотношения размеров конструкции D/H от 0,1 до 1,4 при одинаковой высоте H сооружения. Основные размеры, их соотношения и нагрузка представлены в табл. 1.

⁵ Temporary cellular cofferdam design, installation, and removal at willow Island hydroelectric project. The Ruhlin Company & Mueser Rutledge Consulting Engineers. First presented at HydroVision, 2014.

⁶ Портовые гидротехнические сооружения из оболочек большого диаметра: сб. науч. тр. / под ред. Г.Д. Хасхакиш. М. : ВНИИ трансп. ср-ва, 1979. 169 с.

Табл. 1. Параметры

Table 1. Parameters

Номер No.	D , м D , m	H , м H , m	D/H	t , м t , m	P , кН P , kN
1	20,3	14,5	1,4	0,014	2000
2	17,4		1,2		
3	14,5		1,0		
4	12		0,8		
5	10		0,7		
6	8		0,6		
7	6		0,4		
8	4		0,3		
9	2		0,1		

На рис. 2 приведены исходная и деформированная схема оболочки для различных соотношений D/H при одинаковой высоте ($H = 14,5$ м). Величина действующей силы ($P = 2000$ кН) принята соизмеримой с возникающими в действительности нагрузками из условия достижения предельных перемещений оболочкой с наименьшим из рассматриваемых диаметров.

Модуль деформации оболочки E_{shell} и наполнителя E_{inn} и их соотношения представлены в табл. 2. Заданные значения коэффициента Пуассона приняты равными средним значениям для моделей соответствующего материала: $\nu_{shell} = \nu_{inn} = 0,3$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для каждой из девяти расчетных схем, отличающихся друг от друга только диаметром оболочки (соотношением D/H), в свою очередь, определены шесть расчетных схем, отличающихся деформационными свойствами наполнителя (соотношением E_{inn}/E_{shell}). В результате выполнения расчета для каждой модели установлены (табл. 3): максимальные радиальные напряжения N_R , кН/м², и радиальная сила T_R , кН/м; радиальные напряжения от действия сосредоточенной силы $N_{R-force}$, кН/м²; максимальные напряжения по образующей N_M , кН/м²; максимальные перемещения верха конструкции по направлению действия нагрузки w , мм; соотношение усилий (N_M/N_R , $N_{R-force}/N_R$) и относительные смещения w/H .

Согласно поставленным задачам исследования определено рациональное соотношение основных размеров оболочки D/H в зависимости от соотношения деформационных характеристик наполнителя и оболочки (E_{inn}/E_{shell}) из условия относительно равномерного распределения внутренних усилий в оболочке (равенство максимальных усилий по образующей оболочке и радиальных усилий: $N_M/N_R = 1$) (рис. 3).

Заданные диапазоны значений модуля деформации позволяют ориентировочно сгруппировать по свойствам виды внутреннего наполнителя: слабые грунты, прочные грунты, грунтоцементы,

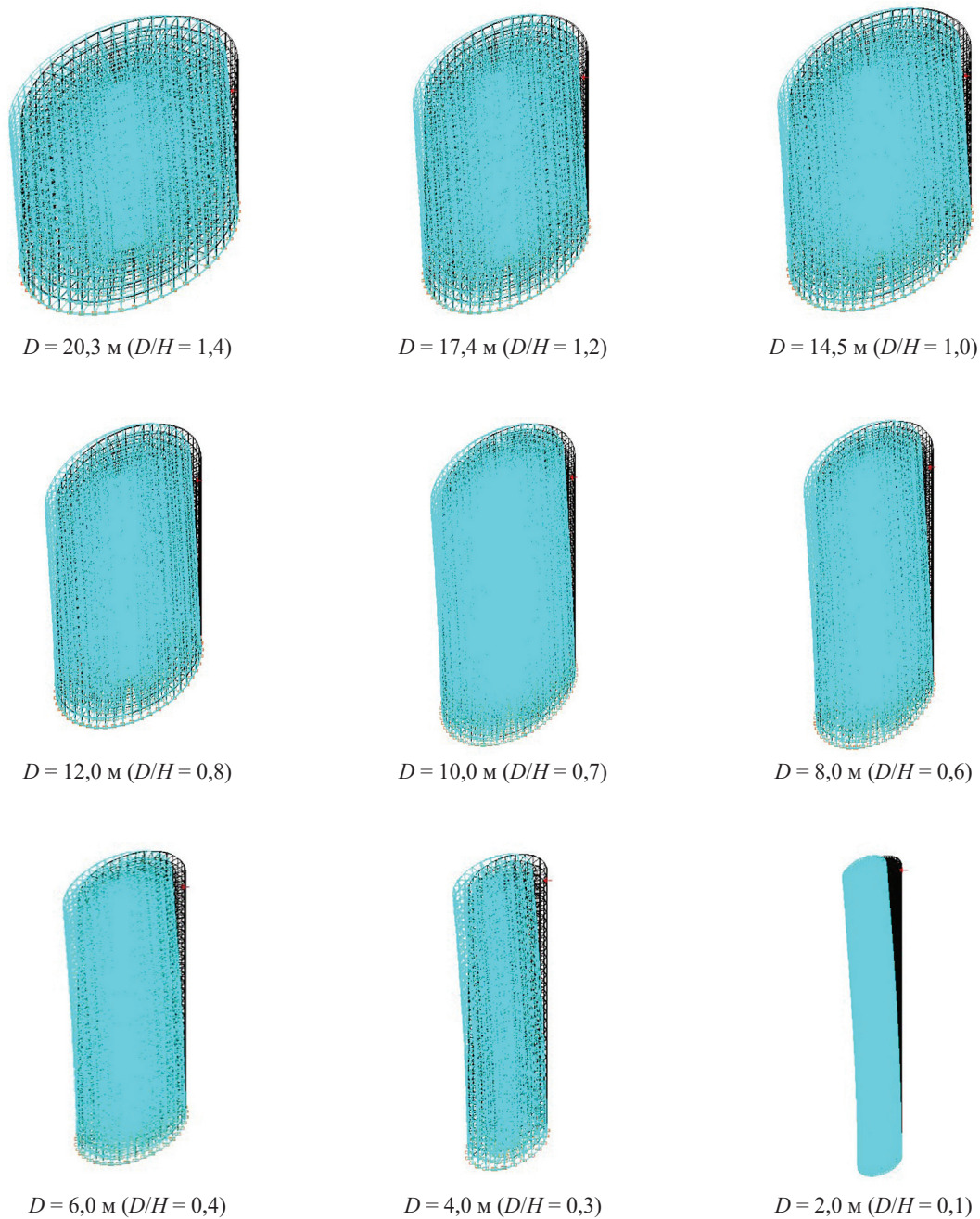


Рис. 2. Исходная и деформированная схема оболочки. Диапазон соотношений D/H для оболочки при одинаковой высоте ($H = 14,5 \text{ м}$)

Fig. 2. Initial and strained shell patterns. The range of D/H ratios for the shell in the case of the same height ($H = 14.5 \text{ м}$)

Табл. 2. Параметры

Table 2. Parameters

E_{inn}^* , кН/м ² E_{inn}^* , кН/м ²	300	3000	30 000	300 000	3 000 000	30 000 000
E_{shell}^* , кН/м ² E_{shell}^* , кН/м ²	206 000 000					
E_{inn}/E_{shell}	1,45631E-06	1,45631E-05	0,000145631	0,001456311	0,014563107	0,145631068

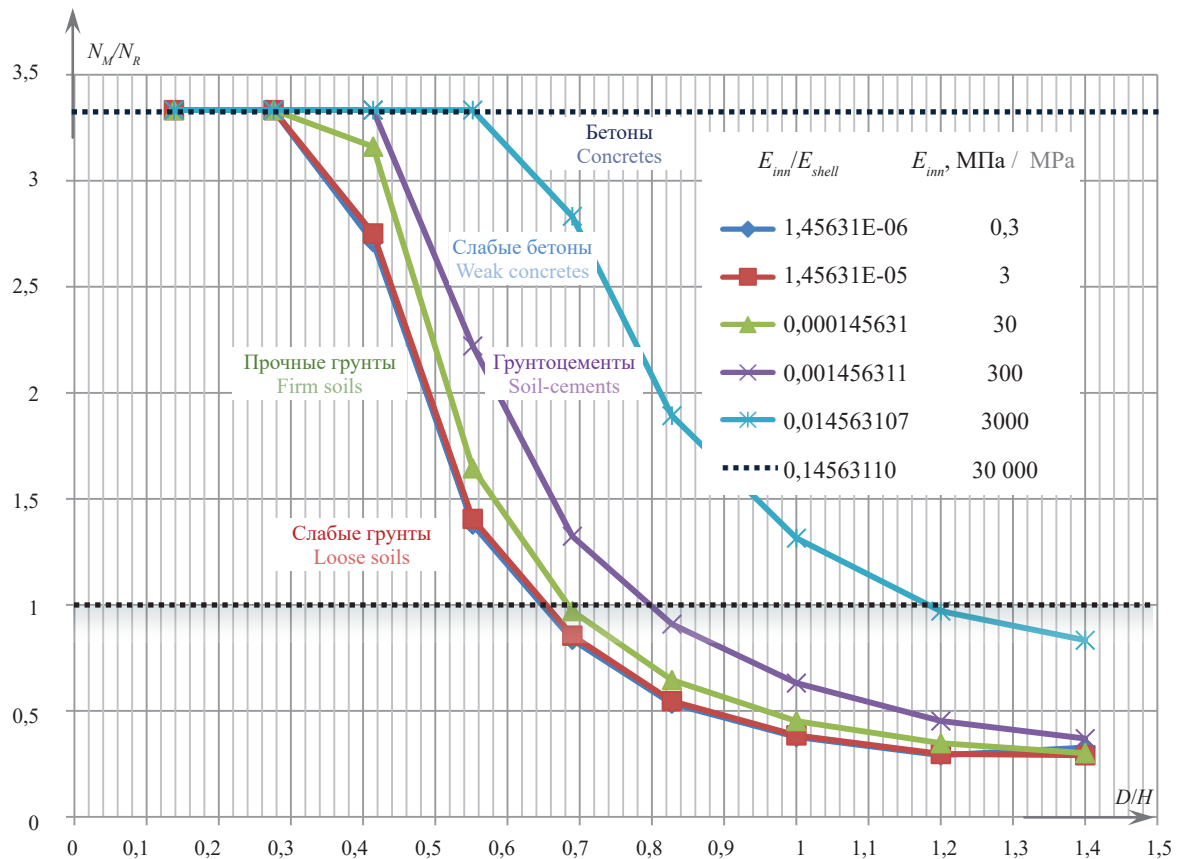


Рис. 3. Соотношение усилий в оболочке (N_M/N_R) в зависимости от соотношения основных размеров конструкции (D/H) и деформационных свойств оболочки и наполнителя (E_{inn}/E_{shell})

Fig. 3. The ratio of forces in the shell (N_M/N_R) depending on the ratio of the main dimensions of the structure (D/H) and the stress-strain properties of the shell and filler (E_{inn}/E_{shell})

слабые бетоны, бетоны (табл. 3, рис. 3). Промежуточные значения рационального соотношения оболочки D/H в зависимости от заданного соотношения E_{inn}/E_{shell} могут быть также определены по графику (рис. 4).

В пространстве трех координат (N_M/N_R ; D/H ; E_{inn}/E_{shell}) результаты расчета представлены в виде трехмерного графика (рис. 5), на котором прослеживается как область рациональных значений D/H в зависимости от изменения деформационных характеристик наполнителя (табл. 3), так и область

рассматриваемых значений D/H и E_{inn}/E_{shell} , при которой конструкция может быть отнесена к категории оболочек с наполнителем.

Указанная область значений определяется из следующих рассуждений. Доля радиальных напряжений N_R в соотношении N_M/N_R снижается (в пределах от $N_R = 3N_M$ до $N_R = 0,3N_M$) по мере уменьшения соотношения D/H , а также по мере роста соотношения E_{inn}/E_{shell} . После достижения верхнего предела этого диапазона ($N_R = 0,3N_M$ или $N_M/N_R = 3,3333...$ (см. рис. 5)) соотношение остается

Табл. 3. Параметры

Table 3. Parameters

Наименование группы Group name	Соотношение E_{inn}/E_{shell} E_{inn}/E_{shell} ratio	D/H (рациональное) (рис. 3) D/H (rational) (Fig. 3)
Слабые грунты Loose soils	1,45631E-05	0,65
Прочные грунты Firm soils	0,000145631	0,70
Грунтоцементы Soil-cements	0,001456311	0,80
Слабые бетоны Weak concretes	0,014563107	1,20
Бетоны Concretes	0,145631068	—

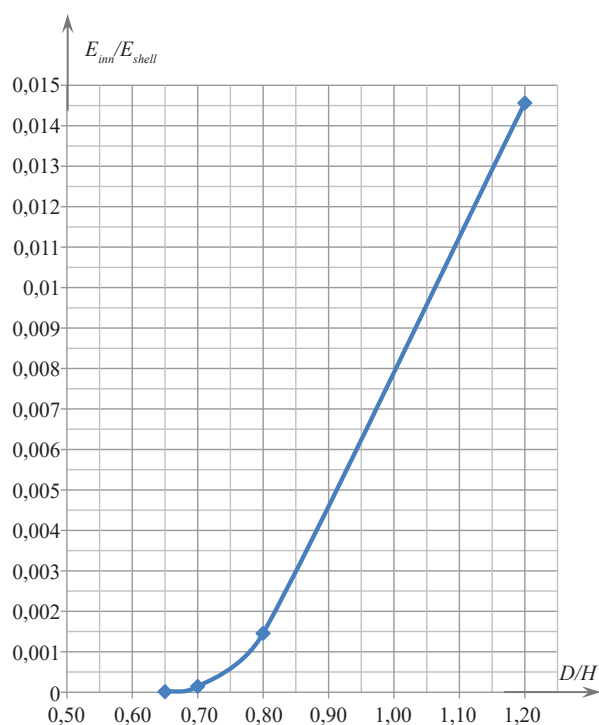


Рис. 4. Рациональное соотношение D/H в зависимости от соотношения E_{inn}/E_{shell} из условия равномерного распределения внутренних усилий в оболочке

Fig. 4. The rational ratio D/H depending on the E_{inn}/E_{shell} ratio based on the condition of the uniform distribution of internal forces in a shell

ся постоянным. Все значения соотношений размеров и характеристик наполнителя и оболочки, входящие в область изменяемых значений соотношения $N_M/N_R \leq 3,33333$, после которого изменения прекращаются, могут быть отнесены к категории конструкции «оболочка с наполнителем» (рис. 5, табл. 4).

При других соотношениях размеров и соотношениях деформационных характеристик конструкция относится либо к стержням сплошного сечения, либо к массивам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены исследования расчетной модели конструкции тонкой оболочки с внутренним наполнителем. В ходе исследования варьировались следующие параметры модели: соотношение основных размеров конструкции (D/H) и соотношение деформационных свойств оболочки и наполнителя (E_{inn}/E_{shell}). Все другие параметры конструкции (условия нагружения, закрепления и прочие ограничения) оставались неизменными.

В результате исследований установлены:

- диапазон эффективного соотношения основных размеров оболочки (D/H) с учетом соотношения значений показателя деформационных свойств оболочки и наполнителя (соотношение модулей деформации E_{inn}/E_{shell}), исходя из условия наиболее равномерного распределения усилий в оболочке ($N_M/N_R \approx 1$). Такое соотношение определено для укрупненных групп внутреннего наполнителя, вы-

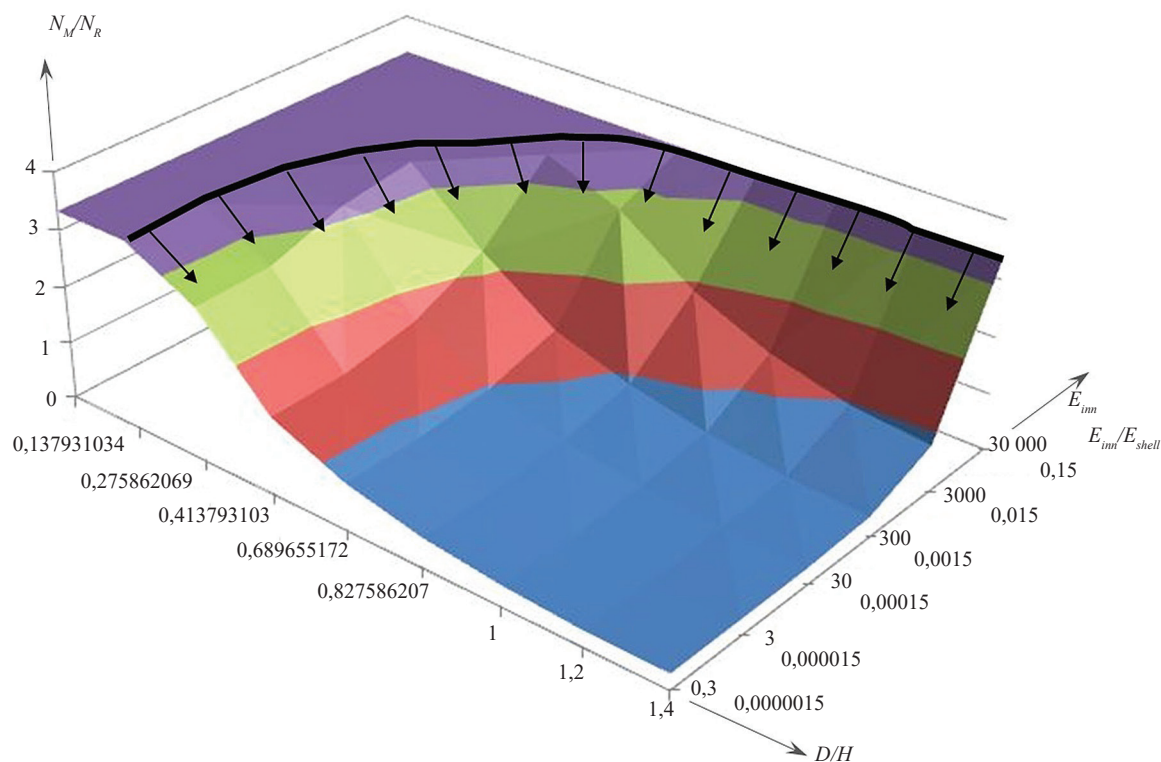


Рис. 5. Пространственное изображение области значений $(N_M/N_R, D/H, E_{inn}/E_{shell})$, соответствующих конструкции «оболочка с наполнителем»

Fig. 5. A 3D image of the range of values $(N_M/N_R, D/H, E_{inn}/E_{shell})$ for the construction of “a shell with a filler”

деленных по величине значений показателей деформационных характеристик (табл. 3, рис. 3);

- диапазоны соотношений геометрических (D/H), жесткостных ($E_{\text{ин}}/E_{\text{shell}}$) и механических параметров (N_M/N_R), при которых конструкция может быть отнесена к категории «заполненных оболочек» или «оболочек с наполнителем», критерием служит диапазон изменяемых значений $N_M/N_R \leq \text{const}$ (табл. 4, рис. 5).

Полученные результаты позволяют определить область варьируемых значений размеров и характеристик оболочки и наполнителя, в пределах которой конструкцию следует относить к категории заполненных оболочек и осуществлять подбор параметров конструкции, исходя из заданных условий и критерия равномерности распределения усилий в оболочке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пикуль В.В. Механика оболочек. Владивосток : Дальнаука, 2009. 535 с.
2. Пикуль В.В. Теория и расчет оболочек вращения. М. : Наука, 1982. 158 с.
3. Пикуль В.В. Современное состояние теории оболочек и перспективы ее развития // Механика твердого тела. 2000. № 2. С. 153–168.
4. Друзь И.Б. Осесимметричные меридионально напряженные мягкие емкости и оболочки. Владивосток : Изд-во Дальневост. ун-та, 1991. 118 с.
5. Друзь И.Б., Друзь Б.И. Осесимметричные задачи статики мягких оболочек и емкостей: монография. Владивосток : ИНТЕРМОР, 1999. 187 с.
6. Елтышев В.А. Напряженно-деформированное состояние оболочечных конструкций с наполнителем. М. : Наука, 1981. 120 с.
7. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек. М. : Наука, 1974. 446 с.
8. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. Ленинград : Судпромгиз, 1962. 431 с.
9. Филин А.П. Элементы теории оболочек. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1975. 256 с.
10. Chernova T., Bilgin Ö., Tsimbelman N. Overview of Shells with Infill used in Geotechnical Engineering Applications // Soil-Structure Interaction. Underground Structures and Retaining Walls: Proceedings of the ISSMGE Technical Committee 207 International Conference on Geotechnical Engineering, Saint Petersburg, 16–18 June 2014. Saint Petersburg, 2014.
11. Токио Боэки, Кэнсэцу Кикай Теса. Основные предложения на островное сооружение стальной конструкции, создаваемое на некотором расстоянии от берега острова Сахалин. Принципиальный проект. Япония, 1981.
12. Ovesen N.K. Cellular cofferdams, calculation methods and model tests. Bulletin 14, Danish Geotechnical Institute. Copenhagen, Denmark, 1962.
13. Хаддад Мазьяд. Исследование общей устойчивости ограждающих сооружений из металлических шпунтов : дис. ... канд. техн. наук. М., 1982. 184 с.
14. Алипов В.В. Исследование давления грунтового заполнителя в железобетонных гидротехнических сооружениях ячеистой конструкции // Труды ВНИИ ВОД-ГЕО, 1965. Вып. 12. С. 89–103.
15. Николау В.И., Брагина Л.Д., Руденко В.И. Об алгоритме и программе уточненного автоматизированного расчета портовых гидротехнических сооружений из оболочек большого диаметра // Труды ЧерноморНИИПроекта. Серия «Морская гидротехника», 1975. Вып. 4.
16. Николау В.И. Исследование работы причальных палов из оболочек большого диаметра : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 1966. 20 с.
17. Шагивалеев К.Ф. Расчет пространственной системы из двух оболочек, соединенных промежуточными связями // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. Т. 2. № 1 (12). С. 24–31.
18. Tsimbelman N.Ya., Mamontov A.I., Chernova T.I., Bilgin Ö. Stability of thin shell with infill gravity structures against lateral loads. from fundamentals to applications in geotechnics // Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15-18 November 2015, Buenos Aires, Argentina. IOS Press, 2015. Pp. 1081–1088.
19. Чернова Т.И., Цимбельман Н.Я. Цилиндрические оболочки с внутренним наполнителем в практике геотехнического строительства // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2016. №1 (41). С. 11–20.
20. Строчкова Л.А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313. № 1. С. 69–74.

Поступила в редакцию 12 апреля 2021 г.

Принята в доработанном виде 20 июля 2021 г.

Одобрена для публикации 20 июля 2021 г.

Об авторах: **Никита Яковлевич Цимбельман** — кандидат технических наук, доцент, директор департамента геоинформационных технологий Политехнического института (школы); **Дальневосточный федеральный уни-**

верситет (ДВФУ); 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, кампус ДВФУ, к. Е918; РИНЦ ID: 469683, Scopus: 36835511500, ResearcherID: Z-6142-2019, ORCID: 0000-0002-6552-3000; tsimbelman.nya@dvfu.ru;

Татьяна Игоревна Чернова — старший преподаватель департамента геоинформационных технологий Политехнического института (школы); **Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)**; 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, кампус ДВФУ, к. Е918; РИНЦ ID: 858744, Scopus: 55837131300; chernova.ti@dvfu.ru;

Мария Александровна Селиванова — ассистент департамента геоинформационных технологий Политехнического института (школы); **Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)**; 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, кампус ДВФУ, к. Е918; SPIN-код: 7451-6410; selivanova.ma@dvfu.ru;

Виталий Сергеевич Редько — аспирант департамента геоинформационных технологий Политехнического института (школы); **Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)**; 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, кампус ДВФУ, к. Е918; redko.vs@dvfu.ru.

REFERENCES

1. Pikul V.V. *Mechanics of Shells*. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2009; 536. (rus.).
2. Pikul V.V. *Theory and calculation of shells of revolution*. Moscow, Science Publ., 1982; 158. (rus.).
3. Pikul V.V. The current state of the theory of shells and the prospects for its development. *Rigid Body Mechanics*. 2000; 2:153-168. (rus.).
4. Druz I.B. *Axisymmetric Soft Tanks and Shells Exposed to Meridian Stress*. Vladivostok, Far Eastern University Publishing House, 1991; 118. (rus.).
5. Druz I.B., Druz B.I. *Axisymmetric Problem of Statics of Soft Shells and Tanks*. Vladivostok, INTERMOR Publ., 1999; 187. (rus.).
6. Eltyshchev V.A. *Stress-strain state of shell structures with a filler*. Moscow, Science Publ., 1981; 120. (rus.).
7. Ambarcumyan S.A. *General theory of anisotropic shells*. Moscow, Science Publ., 1974; 446. (rus.).
8. Novozhilov V.V. *The theory of thin shells*. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1962; 431. (rus.).
9. Filin A.P. *Elements of the theory of shells*. Leningrad, Stroyizdat, Leningrad branch Publ., 1975. 256. (rus.).
10. Chernova T., Bilgin Ö., Tsimbelman N. Overview of Shells with Infill used in Geotechnical Engineering Applications. *Soil-Structure Interaction. Underground Structures and Retaining Walls: Proceedings of the ISSMGE Technical Committee 207 International Conference on Geotechnical Engineering, Saint Petersburg, 16–18 June 2014*. Saint Petersburg, 2014.
11. Tokio Boeki, Kensecu Kikaj Tyosa. *Key proposals for an island steel structure being constructed some distance off the coast of Sakhalin Island. Principal project*. Japan, 1981.
12. Ovesen N.K. *Cellular cofferdams, calculation methods and model tests. Bulletin 14, Danish Geotechnical Institute*. Copenhagen, Denmark, 1962.
13. Haddad Mazyad. *Investigation of the general stability of protective structures made of metal sheet piles : dis. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 1982; 184. (rus.).
14. Alipov V.V. Investigation of the pressure of soil aggregate in reinforced concrete hydraulic structures of a cellular structure. *Proceedings of VNII VOD-GEO*. 1965; 12:89-103. (rus.).
15. Nikolau V.I., Bragina L.D., Rudenko V.I. On the algorithm and program for the improved automated calculation of port hydraulic structures from large diameter shells. *Proceedings of ChernomorNIIProekt. Series "Marine Hydraulic Engineering"*. 1975; 4. (rus.).
16. Nikolau V.I. Investigation of the operation of quay bombs from large diameter shells : abstract dis. ... cand. tech. sciences. Odessa, 1966; 20. (rus.).
17. Shagivaleev K.F. Calculation of a spatial system of two shells connected by intermediate links. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2006; 2:1(12):24-31. (rus.).
18. Tsimbelman N.Ya., Mamontov A.I., Chernova T.I., Bilgin Ö. Stability of Thin Shell with Infill Gravity Structures against Lateral Loads. *Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15–18 November 2015, Buenos Aires, Argentina*. IOS Press, 2015; 1081-1088.
19. Chernova T.I., Cimbel'man N.Ya. Cylindrical shells with infill in geotechnical engineering practice. *Scientific Bulletin of Voronezh State Architectural and Construction University. Construction and Architecture*. 2016; 1(41):11-20. (rus.).
20. Strokova L.A. Definition of parameters for numerical modeling of soil behavior. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2008; 313(1):69-74. (rus.).

Received April 12, 2021.

Adopted in revised form on July 20, 2021.

Approved for publication on July 20, 2021.

BIONOTES: **Nikita Ya. Tsimbel'man** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Department of Geoinformation Technologies of the Polytechnic Institute (School); **Far Eastern Federal University (FEFU)**; room

E918, 10 FEPU Campus, Ajax village, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; ID RISC: 469683, Scopus: 36835511500, ResearcherID: Z-6142-2019, ORCID: 0000-0002-6552-3000; tsimbelman.nya@dvfu.ru;

Tatyana I. Chernova — Senior Lecturer of the Department of Geoinformation Technologies of the Polytechnic Institute (School); **Far Eastern Federal University (FEFU)**; room E918, 10 FEPU Campus, Ajax village, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; ID RISC: 858744, Scopus: 55837131300; chernova.ti@dvfu.ru;

Mariya A. Selivanova — Assistant of the Department of Geoinformation Technologies of the Polytechnic Institute (School); **Far Eastern Federal University (FEFU)**; room E918, 10 FEPU Campus, Ajax village, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; SPIN-code: 7451-6410; selivanova.ma@dvfu.ru;

Vitalii S. Redko — postgraduate student of the Department of Geoinformation Technologies of the Polytechnic Institute (School); **Far Eastern Federal University (FEFU)**; room E918, 10 FEPU Campus, Ajax village, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; redko.vs@dvfu.ru.

Предложения по нормированию сопротивления теплопередаче утепленных стен жилых зданий в Республике Беларусь

В.Н. Черноиван, А.В. Торхова, Н.В. Черноиван, В.Г. Новосельцев

Брестский государственный технический университет (БрГТУ); г. Брест, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Сопротивление теплопередаче считается основным критерием энергетической эксплуатационной эффективности при проектировании ограждающих конструкций зданий и сооружений. Получение расчетом значений нормируемого сопротивления теплопередаче для каждого населенного пункта Республики Беларусь (РБ) с учетом фактических температур наружного воздуха и продолжительности отопительного сезона — актуальная задача.

Материалы и методы. С целью оценки энергетической эффективности ограждающих конструкций принята величина годовых тепловых потерь Q , кВт·ч/м², через 1 м² конструкции. Расчет значений нормируемого сопротивления теплопередаче для каждого населенного пункта РБ с учетом фактических температур наружного воздуха и продолжительности отопительного сезона выполнен по методике, предложенной В.Г. Гагариным. Проведен сравнительный анализ полученных результатов, по методикам, рекомендуемым ТКП 45-2.04-196-2010* и СП 50.13330.2012.

Результаты. Расчетами определены значения нормируемого сопротивления теплопередаче для каждого населенного пункта РБ с учетом фактических температур наружного воздуха в отопительный период и продолжительности отопительного сезона. Для облегчения проектирования утепленных стен построена карта рекомендуемых (расчетных) значений сопротивления теплопередаче наружных стен жилых зданий для территории РБ.

Выводы. Установлено, что экономическая эффективность при проектировании утепленных стен по методике, рекомендуемой ТКП 45-2.04-196-2010*, в зависимости от области РБ, для которой ведется проектирование, составляет в среднем от 6 до 8 BYN на 1 м² утепленной стены. Проектирование утепленных стен жилых зданий с учетом рекомендуемых $R_{тр,расч}$ позволяет существенно уменьшить сопротивление паропрооницанию ограждающих конструкций за счет уменьшения толщины слоя плитного утеплителя и отказаться от устройства механической вентиляции в жилых помещениях, что снижает стоимость 1 м² жилой площади более чем на 10 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нормативное сопротивление теплопередаче, нормируемое сопротивление теплопередаче, годовые тепловые потери через 1 м² ограждающей конструкции, градусо-сутки отопительного периода, коэффициент паропрооницания, сопротивление паропрооницанию, увлажнение материалов кладки, механическая вентиляция

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Черноиван В.Н., Торхова А.В., Черноиван Н.В., Новосельцев В.Г. Предложения по нормированию сопротивления теплопередаче утепленных стен жилых зданий в Республике Беларусь // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 828–837. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.828-837

Proposals for standardization the heat transfer resistance of insulated walls of residential buildings in the Republic of Belarus

Vyacheslav N. Chernoiivan, Anna V. Torkhova, Nikolay V. Chernoiivan, Vladimir G. Novoseltsev

Brest State Technical University (BrSTU); Brest, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. Resistance to heat transfer is considered the main criterion of energy operational efficiency in the design of enclosing structures of buildings and structures. Therefore, the calculation of the values of the normalized resistance to heat transfer, for each locality of the Republic of Belarus, taking into account the actual outdoor temperatures and the duration of the heating season is an urgent task.

Materials and methods. To assess the energy efficiency of enclosing structures, the value of annual heat losses Q , kWh/m², through 1 m² of the structure was adopted. The calculation of the values of the normalized heat transfer resistance for each locality of the Republic of Belarus, taking into account the actual outdoor air temperatures and the duration of the heating season, was carried out according to the method recommended by V.G. Gagarin. A comparative analysis of the results obtained according to the methods recommended by TCP 45-2.04-196-2010* and SP 50.13330.2012 is carried out.

Results. The calculations determine the values of the normalized heat transfer resistance for each locality of the Republic of Belarus, taking into account the actual outdoor air temperatures during the heating period and the duration of the heating season. To facilitate the design of insulated walls, a map of the recommended (calculated) values of the heat transfer resistance of the external walls of residential buildings for the territory of the Republic of Belarus is constructed.

Conclusions. According to the results of the performed studies, it was found that the economic efficiency in the design of insulated walls according to the method recommended by TCP 45-2.04-196-2010*, depending on the region of the Republic of Belarus for which the design is being carried out, is on average from 6 to 8 BYN per 1 m² of insulated wall.

KEYWORDS: standard heat transfer resistance, normalized heat transfer resistance, annual heat losses through 1 m² of the enclosing structure, degree-day of the heating period, vapor permeability coefficient, vapor permeability resistance, moisture content of masonry materials, mechanical ventilation

FOR CITATION: Chernoiivan V.N., Torkhova A.V., Chernoiivan N.V., Novoseltsev V.G. Proposals for standardization the heat transfer resistance of insulated walls of residential buildings in the Republic of Belarus. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(7):828-837. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.828-837 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании ограждающих конструкций зданий и сооружений одним из основных критериев их энергетической эксплуатационной эффективности считается сопротивление теплопередаче.

В 1998 г., согласно СНБ 2.04.01-97¹, при проектировании, реконструкции и ремонте зданий и сооружений для наружных стен из штучных материалов (кирпич, шлакоблоки и т.п.) было рекомендовано для всех населенных пунктов Республики Беларусь (далее — РБ) нормативное сопротивление теплопередаче ($R_{\text{т норм}}$) принимать не менее 2,0 м²·°С/Вт.

С 01.07.2009 г., в соответствии с Изменением № 1 ТКП 45-2.04-43-2006², для наружных стен вновь возводимых, реконструируемых, модернизируемых жилых и общественных зданий назначено для всех населенных пунктов РБ единое нормативное сопротивление теплопередаче $R_{\text{т норм}}$ не менее 3,2 м²·°С/Вт, т.е. оно увеличено в 1,6 раза.

Натурные исследования показали, что после 5–8 лет эксплуатации жилых помещений, не оборудованных механической вентиляцией с заполнением оконных проемов стеклопакетами, наружные утепленные стены которых имеют $R_{\text{факт.}} \geq 2$ м²·°С/Вт, теплотехнические характеристики снизились почти на 30 % от проектных значений [1–5].

Лабораторные испытания образцов материалов, взятых из утепленных кирпичных стен после их эксплуатации 5–8 лет, продемонстрировали, что фактическая влажность в материале, установленная ТКП 45-2.04-43-2006³, увеличилась: для кирпича керамического — более чем в 2–5 раза; плитного утеплителя марки ПСБС — более чем в 2 раза [4, 6]. Очевидно, что столь существенное увеличение влажности материалов и привело к снижению теплотехнических характеристик стен [7, 8].

Установлено, что основной причиной увеличения влажности материалов утепленных стен в процессе их эксплуатации является величина сопротивления паропрооницанию утепленных стен, которая

напрямую зависит от сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций [9–12]. Как показывает практика эксплуатации жилых зданий, увеличение суммарной толщины слоев конструкции утепленных стен — главная причина увлажнения материалов и, как следствие, снижения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций в целом [6, 13].

В результате эксплуатации жилых кирпичных зданий, утепление наружных стен которых выполнено из плитного пенополистирола марки ПСБС с $R_{\text{факт.}} \geq 2$ м²·°С/Вт, существенно ухудшается микроклимат в жилых помещениях: влажность воздуха и содержание углекислого газа значительно превышают санитарные нормы РБ [8, 14, 15]. Это наблюдается в жилых помещениях, не оборудованных системой механической вентиляции, из-за величины сопротивления паропрооницанию утепленных стен [10–12, 16–21].

Следовательно, для обеспечения стабильных (расчетных) теплотехнических характеристик ограждающих конструкций и выполнения требований санитарных норм РБ в жилых помещениях в течение нормируемого срока их эксплуатации без устройства механической вентиляции при проектировании утепленных стен необходимо перейти от нормативного сопротивления теплопередаче, единого для всех населенных пунктов РБ, к нормируемому сопротивлению теплопередаче, которое определяется расчетом исходя из фактических климатических условий эксплуатации объекта [8, 22–26].

Следует отметить, что с 2010 г. в Беларуси действует ТКП 45-2.04-196-2010*⁴, позволяющий при проектировании утепленных ограждающих конструкций сопротивление теплопередаче рассчитывать с учетом нормируемых значений годовых тепловых потерь через 1 м² ограждающей конструкции Q и продолжительности отопительного периода $D_{\text{от}}$, который определяется расчетом с учетом фактических характеристик климатического района эксплуатации проектируемого объекта.

Цель настоящей работы — получение расчетом значений сопротивления теплопередаче утепленных стен зданий с учетом фактических климатических условий для каждого населенного пункта РБ.

¹ СНБ 2.04.01-97. Строительная теплотехника. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 1998.

² Изменение № 1 ТКП 45-2.04-43-2006. Строительная теплотехника. Минск : Министерство архитектуры и строительства РБ, 2008.

³ ТКП 45-2.04-43-2006. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования. Минск : Министерство архитектуры и строительства РБ, 2007.

⁴ ТКП 45-2.04-196-2010*. Тепловая защита зданий. Теплоэнергетические характеристики. Правила определения. Минск : Министерство архитектуры и строительства РБ, 2010.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При выполнении научных исследований основным критерием оценки энергетической эффективности ограждающих конструкций принята величина годовых тепловых потерь Q , кВт·ч/м² через 1 м² конструкции.

Расчет тепловых потерь вычислялся по следующему выражению, рекомендуемому В.Г. Гагариным [20]:

$$Q = 0,024 \cdot D_d / R_{\text{норм}}, \quad (1)$$

где D_d — градусо-сутки отопительного периода (ГСОП), °С·сут; $R_{\text{норм}}$ — нормируемое сопротивление теплопередаче, м²·°С/Вт.

Преобразовав выражение (1), получим математическое выражение для расчета нормируемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций:

$$R_{\text{норм}} = 0,024 \cdot D_d / Q, \quad (2)$$

где Q — значения удельного расхода тепловых потерь за год через 1 м² конструкции (кВт·ч/м²).

Численное значение D_d (ГСОП), °С·сут, определяют по формуле:

$$D_d = \text{ГСОП} = (t_{\text{в}} - t_{\text{н.от}}) Z_{\text{от}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{в}}$ — средневзвешенная по объему здания расчетная температура внутреннего воздуха, °С; $t_{\text{н.от}}$ — средняя за отопительный период температура наружного воздуха, °С; $Z_{\text{от}}$ — продолжительность отопительного периода, сут.

Расчеты сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций по выражению (2) были выполнены для всех населенных пунктов РБ, где расположены метеостанции⁵.

При вычислениях D_d (ГСОП) средневзвешенная по объему здания расчетная температура внутреннего воздуха $t_{\text{в}}$ принималась 18 °С; средняя за отопительный период температура наружного воздуха $t_{\text{н.от}}$ принималась согласно Изменению № 1 СНБ 2.04.02-2000⁶.

Значения удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию в отопительном периоде Q были приняты для зданий по потреблению тепловой энергии класса «В» согласно ТКП 45-2.04-196-2010*.

Учитывая, что значения сопротивления теплопередаче наружных стен зданий для населенных пунктов РБ, расположенных в одной области, отличаются не более чем на 5 %, в публикации приведены $R_{\text{норм}}$ для трех наиболее крупных населенных пунктов каждой области РБ.

⁵ Всего в Республике Беларусь действует 46 метеостанций: в Брестской области — 8, в Витебской области — 10, в Гомельской — 9, в Гродненской — 5, в Минской — 8; в Могилевской — 6.

⁶ Изменение № 1. СНБ 2.04.02-2000. Строительная климатология. Минск : Министерство архитектуры и строительства РБ, 2007.

Рекомендуемые (расчетные) значения сопротивления теплопередаче наружных стен жилых зданий для трех наиболее крупных населенных пунктов каждой из шести областей РБ приведены в табл. 1.

Для оценки степени корректности методики, изложенной в ТКП 45-2.04-196-2010*, выполнены расчеты сопротивления теплопередаче наружных стен по методике, рекомендуемой действующим нормативным документом РФ СП 50.13330.2012⁷. Согласно СП 50.13330.2012, сопротивление теплопередаче наружных стен $R_{\text{норм}}$, м²·°С/Вт, рекомендуется рассчитывать по выражению:

$$R_{\text{норм}} = a D_d + b. \quad (4)$$

D_d (ГСОП), °С·сут, определяется по формуле (3).

Значения уточняющих коэффициентов, согласно табл. 4 СП 50.13330.2012, при выполнении расчетов приняты следующие: $a = 0,00035$; $b = 1,4$.

Полученные по методике СП 50.13330.2012 значения сопротивления теплопередаче наружных стен приведены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью оценки достоверности полученных расчетом по методике ТКП 45-2.04-196-2010* значений сопротивления теплопередаче наружных стен проведен сравнительный анализ расхождения значений $R_{\text{норм}}$, полученных по методике ТКП 45-2.04-196-2010*, с аналогичными значениями, полученными по методике СП 50.13330.2012.

Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 3.

Выполненный сравнительный анализ полученных разными методиками результатов (табл. 3) позволяет сделать вывод — соответствие данных достаточно хорошее:

- для северных областей РБ (Минская, Могилевская, Витебская) расхождения не превышают 8 %;
- для южных областей РБ (Брестская, Гродненская, Гомельская) расхождения не превышают 13,6 %.

Максимальные расхождения значений $R_{\text{норм}}$ (не менее чем 13 %) в границах одной области РБ имеют место только для Брестской области (г. Брест, г. Пинск). Обусловлено это географическим расположением этих населенных пунктов в Полесской низменности, для которой характерны аномальные значения температур наружного воздуха в отопительный период.

Результаты анализа дают возможность сделать заключение — значения сопротивления теплопередаче наружных стен, полученные по методике ТКП 45-2.04-196-2010*, могут быть рекомендованы

⁷ СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 : утв. Министерством регионального развития РФ, 2012.

Табл. 1. Рекомендуемые (расчетные) сопротивления теплопередаче наружных стен жилых зданий

Table 1. Recommended (calculated) heat transfer resistances of external walls of residential buildings

Пункт строительства объекта Location of construction of the object	Значение ГСОП, °С·сут The value of the degree-day of the heating period, °C·day	Нормативный удельный расход тепловой энергии жилых зданий за отопительный период, кВт·ч/м² Standard specific heat consumption of residential buildings for the heating period, kWh/m²	Нормируемое (расчетное) сопротивление теплопередаче наружных стен, м²·°С/Вт Standardized (designed) heat transfer resistance of external walls, m²·°C/W
<i>Брестская область / Brest region</i>			
Брест Brest	3149,4	35	2,2
Пинск Pinsk	3366	35	2,3
Барановичи Baranovichi	3589	35	2,5
<i>Витебская область / Vitebsk region</i>			
Полоцк Polotsk	3877,3	35	2,7
Витебск Vitebsk	3891,6	35	2,7
Орша Orsha	3997,5	35	2,8
<i>Гомельская область / Gomel region</i>			
Мозырь Mozyr	3534,3	35	2,5
Гомель Gomel	3572	35	2,5
Жлобин Zhlobin	3628,8	35	2,5
<i>Гродненская область / Grodno region</i>			
Новогрудок Novogrudok	3740	35	2,6
Гродно Grodno	3472,6	35	2,4
Лида Lida	3568,5	35	2,5
<i>Минская область / Minsk region</i>			
Слуцк Slutsk	3627,8	35	2,5
Минск Minsk	3742,2	35	2,6
Борисов Borisov	3760	35	2,6
<i>Могилевская область / Mogilev region</i>			
Бобруйск Bobruisk	3723,3	35	2,6
Горки Gorki	4059	35	2,8
Могилев Mogilev	3900	35	2,7

Табл. 2. Сопротивление теплопередаче наружных стен жилых зданий (расчет выполнен по методике СП 50.13330.2012)

Table 2. Heat transfer resistance of external walls of residential buildings (calculated according to the method of SP 50.13330.2012)

Пункт строительства объекта Location of construction of the object	Значение ГСОП, °C·сут The value of the degree-day of the heating period, °C·day	Сопротивление теплопередаче наружных стен, м²·°C/Вт Heat transfer resistance of external walls, m²·°C/W
<i>Брестская область / Brest region</i>		
Брест Brest	3149,4	2,5
Пинск Pinsk	3366	2,6
Барановичи Baranovichi	3589	2,7
<i>Витебская область / Vitebsk region</i>		
Полоцк Polotsk	3877,3	2,8
Витебск Vitebsk	3939	2,8
Орша Orsha	3997,5	2,8
<i>Гомельская область / Gomel region</i>		
Мозырь Mozyr	3534,3	2,6
Гомель Gomel	3572	2,7
Жлобин Zhlobin	3628,8	2,7
<i>Гродненская область / Grodno region</i>		
Новогрудок Novogrudok	3740	2,7
Гродно Grodno	3472,6	2,6
Лида Lida	3568,5	2,7
<i>Минская область / Minsk region</i>		
Слуцк Slutsk	3627,8	2,7
Минск Minsk	3742,2	2,7
Борисов Borisov	3781	2,7
<i>Могилевская область / Mogilev region</i>		
Бобруйск Bobruisk	4059	2,8
Горки Gorki	3900	2,8
Могилев Mogilev	3723,3	2,7

Табл. 3. Сравнительный анализ значений сопротивления теплопередаче наружных стен жилых зданий

Table 3. Comparative analysis of the values of heat transfer resistance of external walls of residential buildings

Пункт строительства объекта Location of construction of the object	Рекомендуемое (расчетное) сопротивление теплопередаче наружных стен, м²·°C/Вт Recommended (designed) heat transfer resistance of external walls, m²·°C/W		Расхождение значений, % Divergence of values, %
	методика ТКП 45-2.04-196-2010* method of ТКР 45-2.04-196-2010*	методика СП 50.13330.2012 method of SP 50.13330.2012	
Брестская область / Brest region			
Брест Brest	2,2	2,5	13,6
Пинск Pinsk	2,3	2,6	13,0
Барановичи Baranovichi	2,5	2,7	8,0
Витебская область / Vitebsk region			
Полоцк Polotsk	2,7	2,8	3,7
Витебск Vitebsk	2,7	2,8	3,7
Орша Orsha	2,8	2,8	0
Гомельская область / Gomel region			
Мозырь Mozyr	2,5	2,6	4,0
Гомель Gomel	2,5	2,7	8,0
Жлобин Zhlobin	2,5	2,7	8,0
Гродненская область / Grodno region			
Новогрудок Novogrudok	2,6	2,7	3,8
Гродно Grodno	2,4	2,6	8,3
Лида Lida	2,5	2,7	8,0
Минская область / Minsk region			
Слуцк Slutsk	2,5	2,7	8,0
Минск Minsk	2,6	2,7	3,8
Борисов Borisov	2,6	2,7	3,8
Могилевская область / Mogilev region			
Бобруйск Bobruisk	2,6	2,8	7,7
Горки Gorki	2,8	2,8	0
Могилев Mogilev	2,7	2,7	0



Карта рекомендуемых (расчетных) значений $R_{t,расч}$, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, наружных стен жилых зданий для территории РБ

Map of recommended (designed) values $R_{t,des}$, $m^2 \cdot ^\circ C / W$, exterior walls of residential buildings for the territory of the Republic of Belarus

в качестве базовых при проектировании наружных стен зданий и сооружений с учетом климатических условий РБ.

По аналогии с работой [27] для визуализации информации по районированию РБ по климатическим условиям в отопительный период построена карта рекомендуемых (расчетных) значений $R_{t,расч}$, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, наружных стен жилых зданий для территории РБ (рис.).

Для построения схематической карты районирования РБ был применен программный комплекс AutoCAD Civil 3D. В нем рекомендуемые значения сопротивления теплопередаче использовались в качестве отметок соответствующих точек (метеостанций). Затем автоматически строились горизонталы, которые интерпретировались, как границы районов с соответствующими рекомендуемыми значениями сопротивления теплопередаче (см. рис.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненный анализ позволяет сделать следующий вывод: назначенное ТКП 45-20.04-43-2006 одинаковое для всех населенных пунктов РБ значение нормативного сопротивления теплопередаче $R_{t,норм} = 3,2 m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ для наружных утепленных стен

превышает полученные расчетами значения (см. табл. 1):

- для северных областей РБ (Минская, Могилевская, Витебская) почти на 20 %;
- для южных областей РБ (Брестская, Гомельская, Гродненская) почти на 30 %.

Экономическая оценка показала, что переход при проектировании утепленных стен от нормативного сопротивления теплопередаче $R_{t,норм} = 3,2 m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ к рекомендуемым $R_{t,расч}$, полученным расчетом по выражению (2), для всех населенных пунктов РБ, дает возможность получить следующий экономический эффект:

1. Сметная стоимость утепления минераловатными плитами $1 m^2$ стены снижается для:

Брестской, Гродненской и Гомельской областей в среднем на 8 BYN/ m^2 ;

Витебской, Минской и Могилевской областей в среднем на 6 BYN/ m^2 .

2. Проектирование утепленных стен жилых зданий с учетом рекомендуемых $R_{t,расч}$ позволяет существенно уменьшить сопротивление паропроницанию ограждающих конструкций за счет уменьшения толщины слоя плитного утеплителя и тем самым отказаться от устройства механической вентиляции в жилых помещениях, что снижает стоимость $1 m^2$ жилой площади более чем на 10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пастушков П.П., Павленко Н.В., Жеребцов А.В. Натурные исследования теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов в составе фасадных систем // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 12. С. 56–60. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.12.56-60
2. Крышов С.И., Курилюк И.С. Проблемы экспертной оценки тепловой защиты зданий // Жилищное строительство. 2016. № 7. С. 3–5.
3. Ярцев В.П., Мамонтов А.А., Мамонтов С.А. Влияние внешних воздействий на теплофизические и длительные механические свойства минераловатных плит // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2014. № 1 (50). С. 125–134.
4. Черноиван В.Н., Новосельцев В.Г., Черноиван Н.В. Техническое состояние конструктивных слоев утепленных наружных стен эксплуатируемых зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 4. С. 45–48.
5. Черноиван В.Н., Новосельцев В.Г., Черноиван Н.В., Ковенько Ю.Г., Матвиенко Е.В. К оценке эксплуатационной эффективности многослойной кирпичной кладки несущих стен с плитным утеплителем // Строительная наука и техника. 2013. № 2 (43). С. 27–31.
6. Лобов О.И., Ананьев А.И., Рымаров А.Г. Основные причины несоответствия фактического уровня тепловой защиты наружных стен современных зданий нормативным требованиям // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 11. С. 67–71.
7. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.
8. Грызлов В.С., Каптюшина А.Г. Предложения по нормированию сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 1. С. 41–46.
9. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Зубарев К.П. Анализ расположения зоны наибольшего увлажнения в ограждающих конструкциях с различной толщиной теплоизоляционного слоя // Жилищное строительство. 2016. № 6. С. 8–12.
10. Васильев Б.Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий. М. : Стройиздат, 1957. 210 с.
11. Гагарин В.Г., Зубарев К.П. Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 4. С. 484–495. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495
12. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Сорбция водяного пара материалами минераловатных изделий современного производства // Строительные материалы. 2019. № 6. С. 40–43. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-40-43
13. Баталин Б.С., Евсеев Л.Д. Эксплуатационные свойства пенополистирола вызывают опасения // Строительные материалы. 2009. № 10. С. 55–58.
14. Belkharchouche D., Chaker A. Effects of moisture on thermal conductivity of the lightened construction material // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. Issue 17. Pp. 7119–7125. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.01.160
15. Перехоженцев А.Г. Тепловой комфорт в помещении — основа нормирования теплозащиты зданий. Предложения по совершенствованию норм по теплозащите зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 4 (81). С. 227–237.
16. Dylewski R., Adamczyk J. Economic and ecological indicators for thermal insulating building investments // Energy and Buildings. 2012. No. 54. Pp. 88–95. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.07.021
17. Пилипенко В.М., Черноиван В.Н., Черноиван Н.В. К вопросу создания и эксплуатации легких штукатурных систем // Архитектура и строительство. 2012. № 1 (225). С. 62–67.
18. Табунщиков Ю.А., Ливчак В.И., Гагарин В.Г., Шилкин Н.В. Пути повышения энергоэффективности эксплуатируемых зданий // АВОК. 2009. № 5. С. 38–47.
19. Монастырев П.В. Технология устройства дополнительной теплозащиты стен жилых зданий. М. : Изд-во АСВ, 2002. 160 с.
20. Гагарин В.Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. 2010. № 3. С. 8–16.
21. Борухова Л.В., Шибeko А.С. Нормирование воздухообмена в помещениях и энергоэффективность жилых зданий // Наука и техника. 2018. Т. 17. № 4. С. 306–313. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-4-306-313
22. Kaczmarek A., Wesołowska M. Factors affecting humidity conditions of a face wall layer of a heated building // Procedia Engineering. 2017. Vol. 193. Pp. 205–210. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.205
23. Ливчак В.И. Градусо-сутки отопительного периода как инструмент сравнения уровня энергоэффективности зданий в России и других странах // Энергосбережение. 2015. № 6. С. 20–25.
24. Самарин О.Д. Обоснование снижения теплозащиты ограждений с использованием актуализированной редакции СНиП 23-02-2003 // Жилищное строительство. 2014. № 3. С. 46–48.

25. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Перспективы повышения энергетической эффективности жилых зданий в России // Вестник МГСУ. 2011. № 3–1. С. 192–200.

26. Гагарин В.Г., Козлов В.В. О нормировании теплозащиты и требованиях расхода энергии на отопление и вентиляцию в проекте актуализированной редакции СНиП «Тепловая защита зданий» // Вест-

ник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. № 31 (50). Ч. 2. С. 468–474.

27. Дворецкий А.Т., Денисова Т.В., Клевцев К.Н. Карта изолиний градусо-суток отопительного периода для территории Российской Федерации // Строительство и техногенная безопасность. 2016. № 4 (56). С. 14–18.

Поступила в редакцию 11 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 28 июля 2021 г.

Одобрена для публикации 28 июля 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Вячеслав Николаевич Черноиван** — кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры технологии строительного производства; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; vnchernov@list.ru;

Анна Вячеславовна Торхова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры экономики и организации строительства; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; РИНЦ ID: 1097613; bel_anna@list.ru;

Николай Вячеславович Черноиван — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной механики; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; chernov@inbox.ru;

Владимир Геннадьевич Новосельцев — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; RINCE ID: 974278; vgnovoseltsev@yandex.ru.

REFERENCES

1. Pastushkov P.P., Pavlenko N.V., Zherebtsov A.V. Researches of thermal and physical characteristics of heat-insulating materials in composition of facade systems. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 12:56-60. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.12.56-60 (rus.).

2. Kryshov S.I., Kurilyuk I.S. Problems of expert assessment of heat protection of buildings. *Housing Construction*. 2016; 7:3-5. (rus.).

3. Yartsev V.P., Mamontov A.A., Mamontov S.A. The influence of external factors on thermo-physical and continual mechanical properties of mineral wool boards. *Questions of Modern Science and Practice. V.I. Vernadsky University*. 2014; 1:125-134. (rus.).

4. Chernov V.N., Novoseltsev V.G., Chernov N.V. Technical condition of constructive layers of thermo-insulated external walls of maintained buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 4:45-48. (rus.).

5. Chernov V.N., Novoseltsev V.G., Chernov N.V., Kovenko Y.G., Matviyenko Y.V. To an estimation of operation efficiency of the multilayer brickwork of load bearing walls with plate heater. *Construction Science and Technology*. 2013; 2:27-31. (rus.).

6. Lobov O.I., Ananiev A.I., Rymarov A.G. Main reasons for non-compliance of factual level of heat protection of external walls of modern buildings with regulatory requirements. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 11:67–71. (rus.).

7. Fokin K.F. *Construction heat engineering of enclosing parts of buildings*. Moscow, AVOK-PRESS, 2006; 256. (rus.).

8. Gryzlov V.S., Kaptyushina A.G. Proposals for the regulation of thermal resistance of enclosing structures of buildings. *Modern High Technologies*. 2019; 1:41-46. (rus.).

9. Gagarin V.G., Kozlov V.V., Zubarev K.P. Analysis of the area's location of maximum moisture in the wall system with different thickness of insulation layer. *Housing Construction*. 2016; 6:8-12. (rus.).

10. Vasilyev B.F. *Field studies of the temperature and humidity conditions of residential buildings*. Moscow, Stroyizdat, 1957; 210. (rus.).

11. Gagarin V.G., Zubarev K.P. Moisture potential theory application for modelling of enclosing structure unsteady-state moisture regime. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(4):484-495. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495 (rus.).

12. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Sorption of water vapor materials of mineral wool products of modern manufacture. *Building Materials*. 2019; 6:40-43. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-40-43 (rus.).

13. Batalin B.S., Evseev L.D. Performance properties of expanded polystyrene cause concerns. *Building Materials*. 2009; 10:55-58. (rus.).

14. Belkharouch D., Chaker A. Effects of moisture on thermal conductivity of the lightened construction material. *International Journal of Hydrogen*

Energy. 2016; 41(17):7119-7125. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.01.160

15. Perekhovtsev A.G. Indoor thermal comfort is the basis for rating the heat protection of buildings. Proposals on enhancing the standards of thermal protection of buildings. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2020; 4:227-237. (rus.).

16. Dylewski R., Adamczyk J. Economic and ecological indicators for thermal insulating building investments. *Energy and Buildings*. 2012; 54:88-95. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.07.021

17. Pilipenko V.M., Chernoiivan V.N., Chernoiivan N.V. On the issue of creating and operating light plaster systems. *Architecture and Construction*. 2012; 1:62-67. (rus.).

18. Tabunshchikov Y.A., Livchak V.I., Gagarin V.G., Shilkin N.V. Ways to improve the energy efficiency of operated buildings. *AVOK*. 2009; 5:38-47. (rus.).

19. Monastirev P.V. *Technology of the device of additional thermal protection of walls of residential buildings*. Moscow, ASV Publishing House, 2002; 160. (rus.).

20. Gagarin V.G. Macroeconomic aspects of the justification of energy-saving measures to improve the thermal protection of building enclosing structures. *Building Materials*. 2010; 3:8-16. (rus.).

21. Borukhava L.V., Shybeka A.S. Introduction of norms for air exchange in rooms and energy efficiency of residential buildings. *Science and Technique*.

2018; 17(4):306-313. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-4-306-313. (rus.).

22. Kaczmarek A., Wesołowska M. Factors affecting humidity conditions of a face wall layer of a heated building. *Procedia Engineering*. 2017; 193:205-210. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.205

23. Livchak V.I. Degree-day heating period as a tool for comparing the level of energy efficiency of buildings in Russia and other countries. *Energy Saving*. 2015; 6:20-25. (rus.).

24. Samarin O.D. Substantiation of reducing the heat protection of enclosures with the use of an actualized version of SNiP 23-02-2003. *Housing Construction*. 2014; 3:46-48. (rus.).

25. Gagarin V.G., Kozlov V.V. Prospects of increase of power efficiency of residential buildings in Russia. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 3-1:192-200. (rus.).

26. Gagarin V.G., Kozlov V.V. On the regulation of thermal protection and requirements for energy consumption for heating and ventilation in the draft updated version of the SNiP "Thermal protection of buildings". *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2013; 31-2:468-474. (rus.).

27. Dvoretzky A.T., Denisova T.V., Klevets K.N. Map of isolines of the degree-day heating period for the territory of the Russian Federation. *Building and Industrial Safety*. 2016; 4:14-18. (rus.).

Received May 11, 2021.

Adopted in revised form on July 28, 2021.

Approved for publication on July 28, 2021.

Bionotes: **Vyacheslav N. Chernoiivan** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Production Technology; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; vnchernoiivan@list.ru;

Anna V. Torkhova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and Construction Organization; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; ID RISC: 1097613; bel_anna@list.ru;

Nikolay V. Chernoiivan — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; chernoivan@inbox.ru;

Vladimir G. Novoseltsev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; ID RISC: 974278; vgnovoseltsev@yandex.ru.

Система раздельного сбора твердых коммунальных отходов жителями многоквартирных домов

О.Н. Дьячкова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема управления твердыми коммунальными отходами (ТКО), рассматриваемая с позиции устойчивого развития, актуальна и в мире, и в России. С одной стороны, она обусловлена гигантскими территориями, занятыми санкционированными и несанкционированными захоронениями отходов, которые загрязняют окружающую среду. С другой — связана с истощением природных ресурсов и возможностью использовать скрытые резервы отходов, годных для утилизации. Накопление смешанных отходов и вызванная этим необходимость увеличения технологических перерабатывающих мощностей неэффективны, а также сопровождаются выбросами в природу загрязняющих веществ. Перспективным считается раздельный сбор. Прогнозируется, что с началом действия региональных операторов система обращения с отходами в России выйдет на новый уровень, обеспечивающий охрану окружающей среды и качество жизни населения. Однако межотраслевая проблема раздельного сбора гораздо шире возможностей региональных операторов. Она связана с особенностями градостроительства и городского хозяйства населенных пунктов субъектов РФ; развитием направлений промышленности страны, использующих вторсырье.

Материалы и методы. Применили системный анализ научной литературы, статистических данных, нормативных документов, моделирование процессов.

Результаты. Рассматривается организационно-технологическая модель структуры раздельного сбора ТКО жителями многоквартирных домов (МКД) в цепи «природа — хозяйственная деятельность — природа». Накопление опасных и крупногабаритных отходов выделяется в отдельные подсистемы в системе обращения жителей МКД с отходами.

Выводы. Во избежание накопления значительных объемов смешанных ТКО жителями МКД в контейнерах, расположенных на придомовых площадках и мусоросборных камерах, предлагается трансформация в системе обращения с отходами, образуемыми населением. Внедрение экологических инноваций требуется на всех этапах жизненного цикла продукции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: устойчивое развитие, экологическая безопасность, охрана окружающей среды, градостроительная деятельность, городское хозяйство, система обращения с отходами, твердые коммунальные отходы, раздельный сбор отходов, морфологический состав отходов, вторичное сырье, многоквартирный дом

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дьячкова О.Н. Система раздельного сбора твердых коммунальных отходов жителями многоквартирных домов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 838–858. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.838-858

Separate collection of solid household waste by residents of multi-family homes

Olga N. D'yachkova

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

ABSTRACT

Introduction. The problem of solid household waste management, analyzed in the context of sustainable development, is relevant both in Russia and worldwide. On the one hand, it deals with vast legitimate and illegitimate landfills, polluting the environment. On the other hand, it deals with the depletion of natural resources and the potential usability of latent reserves of recyclable waste. It is inefficient to accumulate mixed waste and build recycling capacities, since they are accompanied by atmospheric pollutions. Separate collection of waste has a great potential. According to the estimates, Russia's waste management system will move to a new level when local waste management companies come into operation. This new level will ensure environmental protection and higher standards of living. However, the intersectoral problem of separate waste collection cannot be solved by local waste management operators. This problem deals with urban development patterns and urban economies of the RF subjects, as well as the Russian industries, that use recyclable materials.

Materials and methods. The co-authors have applied the system analysis of the research literature, statistical data and regulatory documents, as well as process modeling.

Results. The co-authors have analyzed the engineering model of separate waste collection, implemented by residents of multi-family homes within the framework of the "nature – economic activities – nature" pattern. The accumulation of hazardous and oversized waste is organized as the separate subsystems of the waste management system implemented by the residents of a multi-family home.

Conclusions. The co-authors propose to modify the system of household waste management to prevent the over-accumulation of substantial amounts of mixed household waste in waste containers near residential houses and in waste collection rooms. The introduction of ecologically friendly innovations is needed at each stage of the life cycle of any product.

KEYWORDS: sustainable development, environmental safety, environmental protection, urban planning activities, urban economy, waste management system, household waste, separate waste collection, morphological waste composition, secondary raw materials, multi-family home

FOR CITATION: D'yachkova O.N. Separate collection of solid household waste by residents of multi-family homes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(7):838-858. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.838-858 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение окружающей среды отходами производства и потребления представляет собой комплекс проблем, требующих системного подхода [1–4]. Процесс управления отходами хозяйственной и иной деятельности в современном мире направлен на утилизацию большей их части и сведение к минимуму неперерабатываемых объемов, депонируемых на полигонах [5, 6].

Отходы производства и потребления — вещества или предметы, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления, которые подлежат удалению¹.

В России за период 2010–2017 гг. количество ежегодно образующихся отходов увеличилось на 66,5 %². Образовано отходов производства и потребления в: 2010 г. — 3735 млн т, 2011 г. — 4303 млн т, 2012 г. — 5008 млн т, 2013 г. — 5153 млн т, 2014 г. — 5268 млн т, 2015 — 5060 млн т, 2016 г. — 5441 млн т, 2017 г. — 6221 млн т, 2018 г. — 7266 млн т, 2019 г. — 7750,9 млн т^{2, 3}.

Твердые коммунальные отходы (ТКО) — отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в процессе их использования физическими лицами в жилых помещениях в целях удовлетворения личных и бытовых нужд. К ТКО также относятся отходы, образующиеся в процессе деятельности юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и подобные по составу отходам, образующимся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами¹.

В России объем вывоза ТКО с территории городских поселений в 2017 г. составил 274,4 млн м³ или 0,88 % от общего количества образованных отходов². 10 % от общего объема ТКО вывезено на мусороперерабатывающие заводы². Объем вы-

воза ТКО в 2019 г. достиг 304,4 млн м³. Около 16 % от общего объема вывезенных ТКО было доставлено на мусороперерабатывающие заводы³.

В России основным способом обращения с ТКО является захоронение². В 2017 г. объем вывезенных ТКО на объекты захоронения составил 239 млн м³ (50,9 тыс. т) или 87 % от общего количества вывоза ТКО². На обезвреживание, в том числе на мусоросжигательные предприятия, в 2017 г. вывезено 6,0 млн м³ (0,9 млн т) или 2,2 % от общего объема вывоза ТКО².

Сбор ТКО в городах осуществляется преимущественно смешанным способом, т.е. отходы без предварительной сортировки собираются в контейнеры³. Применение смешанной системы сбора ТКО снижает объемы выбора вторичных ресурсов и увеличивает нагрузку на полигоны³.

В рамках национального проекта «Экология» в целях создания эффективной системы обращения с отходами производства и потребления реализуется федеральный проект «Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами». В 2019 и 2020 гг. основные показатели федерального проекта в Российской Федерации составили⁴:

- доля ТКО, направленных на утилизацию, в общем объеме образованных ТКО в 2019 г. — 4,4 %, в 2020 г. — 4 %;
- доля ТКО, направленных на обработку, в общем объеме образованных ТКО в 2019 г. — 29,7 %, в 2020 г. — 38,1 %.

Поиску решений проблемы обращения с ТКО посвящены исследования ученых во многих странах, в том числе в России. Изучаются вопросы технической [7–9], технологической [10–12], организационной [13–16], управленческой [17–19], экономической [20–23], экологической [24–28], социальной [29–33] направленности. На основе парадигмы биосферосовместимости^{5, 6} ведутся исследования экологиче-

¹ Об отходах производства и потребления : Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ

² Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». М. : Минприроды России; НПП «Кадастр», 2018. 888 с.

³ Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году». М. : Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2020. 1000 с.

⁴ Сайт ЕМИСС. URL: <https://fedstat.ru/>

⁵ Ильичев В.А. и др. Принципы преобразования города в биосферосовместимый и развивающий человека / Научная монография / В.А. Ильичев, С.Г. Емельянов, В.И. Колчунов, В.А. Гордон, Н.В. Бакаева. М. : Изд-во АСВ, 2015. 184 с.

⁶ Ильичев В.А. и др. Инновационные технологии в строительстве городов. Биосферная совместимость и человеческий потенциал: учебное пособие / В.А. Ильичев, С.Г. Емельянов, В.И. Колчунов, Н.В. Бакаева. М. : Изд-во АСВ, 2019. 208 с.

ской безопасности городских систем [34, 35]. Исходя из концепции природоподобных технологий среды жизнедеятельности и биопозитивных инновационных продуктов совершенствуется нормативно-техническая документация⁷ [3, 36–40].

Обращение с ТКО должно отвечать критерию безопасного равновесия в природно-технологическом балансе на заданном временном интервале на всех участках системы в цепи «природа — хозяйственная деятельность — природа» [41–46]. Проблемы подсистем системы обращения с ТКО, включая накопление [47, 48], сбор и транспортирование [49–52], обработку и обезвреживание [53, 54], хранение [55], утилизацию [56–62], захоронение [63–70], рассматриваются в многочисленных публикациях. Научным сообществом накоплен значительный опыт комплексных подходов [71–75], реализуемый в разных странах [76–84] с учетом природно-климатических [85], территориально-градостроительных [86–89], исторических [90–92], социально-экономических [92–97] условий. Однако вопрос комплексной организации раздельного сбора ТКО жителями многоквартирных домов (МКД) для многих регионов мира, в том числе России, остается открытым и требующим решения [98–104].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованы системный анализ научной литературы, статистических данных, нормативных документов, включая материалы, посвященные реформе обращения с отходами, представленные на порталах Минприроды России, Минстроя России, администрации Санкт-Петербурга; моделирование процессов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Симбиоз градостроительной деятельности и городского хозяйства является основой устойчивого развития городской территории (рис. 1). Устойчивое развитие города и элементов ее планировочной структуры (квартал, микрорайон, район и т.д.) включает эффективное обращение с ТКО, которое обеспечивает безопасность и качество жизнедеятельности населения при накоплении отходов, а также способствует снижению нагрузки на окружающую среду [3, 37]. В процессе градостроительной деятельности закладываются земельные участки под объекты размещения отходов, а также предусматриваются площадки для накопления ТКО в жилых кварталах [90]. Жилищно-коммунальное хозяйство, отвечая за санитарно-эпидемиологическое благополучие урбанизированной территории, обеспечивает своевременный

сбор и транспортирование отходов МКД к объектам утилизации и размещения [42, 71, 88].

Федеральным проектом «Формирование комфортной городской среды» национального проекта «Жилье и городская среда» к концу 2024 г. предусмотрено повышение индекса качества городской среды на 30 %, соответственно сокращение количества городов с неблагоприятной средой в два раза⁸.

Для определения индекса качества городской среды используются 36 индикаторов, характеризующих шесть типов пространств города⁹:

- жилье;
- общественно-деловая инфраструктура;
- социально-досуговая инфраструктура;
- озеленение территорий;
- уличная инфраструктура;
- общегородское пространство,

которые оцениваются по шести факторам, формирующим среду обитания:

- безопасность;
- комфортность;
- экологичность;
- идентичность и разнообразие;
- современность среды;
- эффективность управления органами власти.

Качество экологии в индексе оценивается косвенно индикаторами¹⁰:

- доля ТКО, направленных на обработку и утилизацию, в общем объеме образованных и вывезенных ТКО;
- загруженность дорог;
- доля озелененных территорий общего пользования в общей площади зеленых насаждений;
- уровень озеленения;
- состояние зеленых насаждений;
- доля населения, имеющего доступ к озелененным территориям общего пользования, в общей численности населения;
- доля площади города, убираемая механизированным способом, в общей площади города.

Параметр, характеризующий систему обращения с отходами, в матрице индикаторов оценивает тип пространства «жилье и прилегающие пространства» по категории «экологичность и здоровье»¹⁰.

Изначально индикатор учитывал количество вывезенных ТКО на душу населения, источником данных являлся Росстат, расчет производился по формуле T_i/N , где T_i — количество вывезенных

⁸ Сайт Минстроя России. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/>

⁹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 23.03.2019 № 510-р «Об утверждении Методики формирования индекса качества городской среды».

¹⁰ Руководство по определению первоочередных направлений развития городской среды с помощью индекса качества городской среды. URL: https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/133/rukovodstvo_index_compressed.pdf

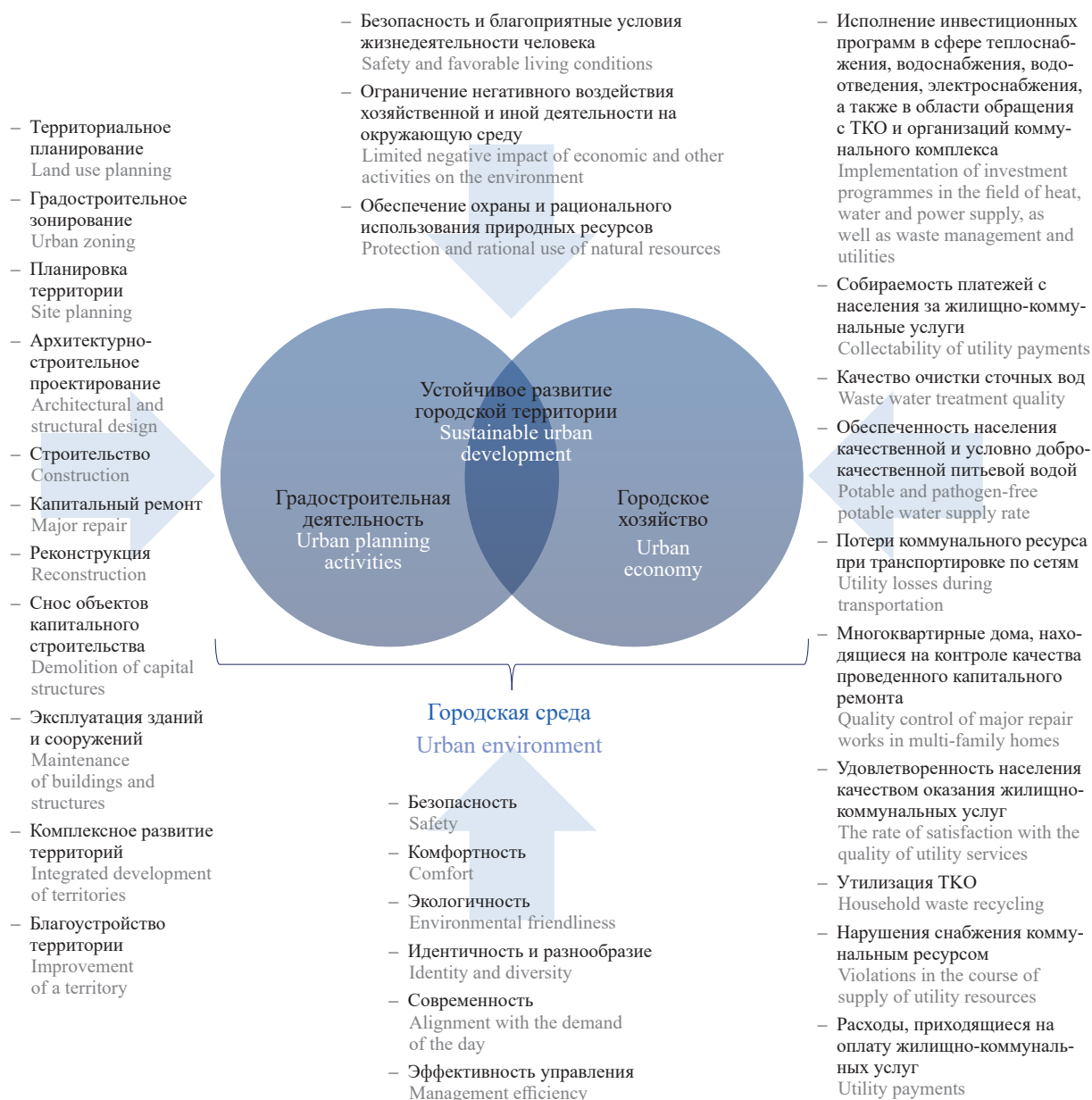


Рис. 1. Принципиальная схема обеспечения устойчивого развития городской территории

Fig. 1. The basic pattern of sustainable urban development

ТКО; N — численность населения. Индикатор, характеризующий эффективность работы коммунальных служб и наличие скоплений мусора в жилых районах, использовался для оценки экологической ситуации в жилых районах города, генерирующих основной массив ТКО. Считалось, что увеличение объема вывоза мусора на душу населения ведет к повышению качества среды в жилых районах и стимулирует улучшение экологической обстановки⁹.

В дальнейшем при расчете индекса качества городской среды используемый индикатор, характеризующий уровень снижения негативного воздействия на окружающую среду, претерпел изменения. В новой редакции с помощью индикатора оценивается доля ТКО, направленных на обработ-

ку, в общем объеме образованных и вывезенных ТКО, по формуле: $(T_r/T_n) \cdot 100$, где T_r — масса ТКО, отправленных на обработку; T_n — масса образованных и вывезенных ТКО. Индикатор характеризует уровень снижения негативного воздействия на окружающую среду, увеличение этого параметра стимулирует улучшение экологической обстановки за счет увеличения объема ТКО, направляемых на обработку⁹.

Для определения уровня качества предоставления населению жилищно-коммунальных услуг в регионах, а также в целях контроля текущего состояния отрасли и оценки эффективности деятельности органов исполнительной власти с позиции качества и доступности жилищно-коммунального хозяйства рассчитывается индекс качества жилищ-

но-коммунальных услуг субъекта Российской Федерации:

$$\text{Индекс}_{\text{ЖКУ}} = \sum_{n=1}^{11} (K_n B_n),$$

где Индекс_{ЖКУ} — индекс качества жилищно-коммунальных услуг субъекта; K_n — показатель, входящий в расчет индекса; B_n — весовой коэффициент показателя; n — порядковый номер показателя¹¹.

Индекс представляет собой сумму взвешенных показателей, в состав которых входит показатель уровня утилизированных ТКО (K_{15}). Показатель характеризуется долей утилизированных ТКО в общем объеме ТКО и рассчитывается по формуле: $\text{ТКО}_{\text{доля}} = (\text{ТКО}_{\text{утилизированные}} / \text{ТКО}_{\text{всего}}) \cdot 100$, где $\text{ТКО}_{\text{доля}}$ — доля утилизированных ТКО; $\text{ТКО}_{\text{утилизированные}}$ — масса утилизированных ТКО; $\text{ТКО}_{\text{всего}}$ — общая масса ТКО, образованных в отчетном периоде на территории субъекта по данным Федеральной службы государственной статистики. При доле утилизации ТКО на 10 % и более $K_{15} = 1$; при доле утилизации ТКО от 9 до 10 % $K_{15} = 0,9$; соответственно от 8 до 9 % — $K_{15} = 0,8$; от 7 до 8 % — $K_{15} = 0,7$; от 6 до 7 % — $K_{15} = 0,5$; от 5 до 6 % — $K_{15} = 0,3$; от 3 до 5 % — $K_{15} = 0,1$; при доле утилизации ТКО менее чем на 3 % $K_{15} = 0$. Коэффициент значимости показателя (B_{15}) принимается равным 1,5¹¹.

Таким образом, обе рассмотренные методики стимулируют руководство субъектов РФ на переход инфраструктуры коммунального хозяйства жилого фонда к раздельному сбору отходов. Хотя велика вероятность, что плановое значение индикатора в регионах достигается за счет увеличения технологических перерабатывающих мощностей предприятий, обрабатывающих ТКО, образованные населением [89].

Обработка отходов — предварительная подготовка отходов к дальнейшей утилизации, включая их сортировку, разборку, очистку¹.

Утилизация отходов — использование отходов для производства продукции, выполнения работ, оказания услуг, включая повторное применение отходов, в том числе повторное применение отходов по прямому назначению, их возврат в производственный цикл после соответствующей подготовки, извлечение полезных компонентов для их повторного применения, а также использование ТКО в качестве возобновляемого источника энергии после извлечения из них полезных компонентов на объектах обработки¹.

Система безопасного обращения с отходами, создаваемая на уровне субъектов РФ, включает:

- разработку и утверждение территориальных схем обращения с отходами;

- разработку дорожных карт по переходу на новую систему обращения с отходами;

- заключение соглашений с региональными операторами по обращению с ТКО.

В состав региональной территориальной схемы обращения с отходами входят¹:

- данные о нахождении источников образования отходов;
- информация о количестве образующихся отходов;
- сведения об установленных целевых показателях по обезвреживанию, утилизации и размещению отходов;
- данные о нахождении мест накопления отходов;
- информация о месте нахождения объектов обработки, утилизации, обезвреживания отходов;
- сведения о месте нахождения объектов размещения отходов;
- баланс количественных характеристик образования, обработки, утилизации, обезвреживания, размещения отходов, в том числе ТКО;
- схема потоков отходов, в том числе ТКО, от источников их образования до объектов обработки, утилизации, обезвреживания отходов, объектов размещения отходов;
- данные о планируемых строительстве, реконструкции, выведении из эксплуатации объектов обработки, утилизации, обезвреживания, размещения отходов, в том числе ТКО;
- оценка объема соответствующих капитальных вложений в строительство, реконструкцию, выведение из эксплуатации объектов обработки, утилизации, обезвреживания, размещения отходов, в том числе ТКО;
- прогнозные значения предельных тарифов в области обращения с ТКО;
- сведения о зонах деятельности регионально-го оператора;
- электронная модель территориальной схемы обращения с отходами.

По городам РФ за период 2010–2020 гг. наблюдается различная динамика показателей объемов вывоза ТКО, включая вывоз на объекты, используемые для обработки отходов, что обусловлено существенными региональными особенностями³.

В Санкт-Петербурге к 2024 г. запланированы достижения показателей регионального проекта «Формирование комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами»¹²:

- доля направленных на утилизацию отходов, выделенных в результате раздельного накопления и обработки ТКО, в общей массе образованных ТКО — 11,1 %;

¹¹ Об утверждении Методики определения индекса качества жилищно-коммунальных услуг субъекта Российской Федерации : Приказ Минстроя России от 18.12.2017 № 1679-пр.

¹² Сайт Администрации Санкт-Петербурга. URL: <https://www.gov.spb.ru/>

Табл. 1. Динамика обращения с отходами в Санкт-Петербурге⁴
Table 1. Waste management in St. Petersburg⁴

Параметр Parameter	Период, год Time period, year										
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Объем образованных отходов производства и потребления, т/год Production and consump- tion waste, tons/year						4 265 197,0118	8 039 879,0861	8 290 517,2237	7 662 807,341		10 748 723,593
Объем ТКО, вывезенных с территории города, тыс. м³/год Waste removed from the city, m³/year	7061,3	7928,9	8276	7553,1	9781,6	8794,5	6881,6	8125,7	8945,1	8800,2	10679,7
Объем ТКО, вывезенных на мусороперерабатываю- щие заводы, тыс. м³/год Waste taken to waste processing plants, m³/year	7061,4	7262,7	8254,6	7533,1	1582,4	1409,7	1011,2	1040	2055,5	231,1	1063,1
Количество обезвреженных отходов производства и потребления, т/год Neutralized production waste, tons/year						387 510,7062	461 758,3373	455 859,6981	376 854,035		362 485,563
Доля использованных и обезвреженных отходов в общем объеме образовавшихся отходов в процессе производства и потребления, % Share of neutralized waste, %							28,8983	31,1507	45,5397	58,5418	42,5401
Доля утилизированных ТКО в общем объеме ТКО, % Share of recycled waste, %											18,222

- доля ТКО, направленных на обработку, в общей массе образованных ТКО — 37,6 %;
- доля направленных на захоронение ТКО, в том числе прошедших обработку, в общей массе образованных ТКО — 88,9 %.

Динамика показателей Санкт-Петербурга, характеризующих обращение с ТКО, в общем объеме отходов производства и потребления показана в табл. 1.

На территории Санкт-Петербурга образуется 9 648 032,261 т/год отходов, из них: в результате хозяйственной деятельности юридических лиц и индивидуальных предпринимателей (за исключением ТКО) — 7 972 976,752 т/год; ТКО — 1 675 055,509 т/год, в том числе ТКО в результате хозяйственной деятельности юридических лиц и индивидуальных предпринимателей — 287 886,521 т/год, объектов Минобороны РФ — 16 379,774 т/год, в результате жизнедеятельности населения — 1 370 789,213 т/год (7 119 133,80 м³/год)¹². В жилых помещениях МКД образуется 1 133 438,10 т/год (5 886 461,19 м³/год) ТКО и 232 005,36 т/год (1 204 909,71 м³/год) крупногабаритных отходов¹². В период 2019–2020 гг. соотношение численности населения и объемов ТКО составляло 5384 тыс. чел. / 2 056 646 т/год¹². По прогнозным данным, предполагается тенденция увеличения населения города и рост ТКО, соответственно, на 2025 г. — 5918 тыс. чел. / 2260676 т/год, на 2030 г. — 6079 тыс. чел. / 2322281 т/год, на 2040 г. — 6547 тыс. чел. / 2 500 836 т/год, учитывая норматив накопления ТКО в месяц на одного проживающего — 31,808 кг (0,171 м³), в год — 381,696 кг (2,055 м³)¹² [14, 101].

Сохранение для настоящего и будущих поколений благоприятного состояния природных компонентов городской среды — одна из актуальных проблем устойчивого развития урбанизированной территории Санкт-Петербурга [25]. Основными депонирующими загрязняющими вещества природными средами являются наземные и водные экосистемы [25]. Качество городских почвы, воды и воздуха по тем или иным параметрам не всегда соответствует действующим нормативам, что может представлять опасность для населения [29]. Рациональная организация обращения с ТКО МКД может внести существенный вклад в устойчивое развитие территории города [25, 26, 29, 88].

Санкт-Петербург вправе использовать мораторий на деятельность регионального оператора до 1 января 2022 года. Планируется, что на территории города региональным оператором выступит Санкт-Петербургское государственное унитарное предприятие «Завод по механизированной переработке бытовых отходов» (СПб ГУП «Завод МПБО-2») ^{12, 13}.

¹³ Сайт СПб ГУП «Завод МПБО-2». URL: <https://mpbo2.ru/>

В Ленинграде на Волхонском шоссе в 1970 г. построен первый в стране опытный завод по механизированной переработке бытовых отходов с запроектированной мощностью 400 тыс. м³/год и увеличенной до 900 тыс. м³/год к 1973 г. Промышленная установка термической переработки (пиролиза) производительностью 30 тыс. т/год введена в эксплуатацию в 1982 г. С 2007 г. опытный завод МПБО становится филиалом завода МПБО-2, который начал работать в поселке Янино еще в 1994 г. при первоначальной мощности 600 тыс. м³/год, а после модернизаций технологии биокомпостирования отходов в 2000 г. — 750 тыс. м³/год, с 2006 г. — 900 тыс. м³/год. К 2009 г. производительность выросла до 1070 тыс. м³/год¹³ [24, 63].

В соответствии с Инвестиционной программой СПб ГУП «Завод МПБО-2» на период 2019–2023 гг. планируется модернизация технологического оборудования, в рамках которой предусматривается увеличение мощности предприятия, в том числе за счет строительства сортировочных комплексов, а также модернизации комплекса аэробного компостирования ТКО. Модернизация позволит извлекать в полном объеме органическую фракцию из состава поступающих на переработку ТКО и готовить на ее основе компост высокого качества, а также увеличить глубину и повысить качество обработки ТКО с целью извлечения максимального количества полезных фракций, предназначенных для последующей утилизации и переработки. Планируется, что принимаемые меры коренным образом изменят для Санкт-Петербурга баланс между переработкой ТКО и их прямым полигонным захоронением в сторону глубокой переработки^{12, 13} [11].

В системе обращения с отходами жителей МКД различают обращение с ТКО, опасными и крупногабаритными отходами.

С 2010 г. в Санкт-Петербурге действует система сбора опасных отходов, образуемых населением. В 2019 г. Комитетом по благоустройству Санкт-Петербурга обеспечено функционирование системы сбора опасных отходов, образованных населением, в составе семи экомобилей, для которых предусмотрено 8880 стоянок в 111 муниципальных образованиях, то есть по два адреса в каждом, и 407 эбоксов. Данные о местах установки эбоксов, осуществления стоянок экомобилей размещены на официальном сайте Комитета и в сети интернет¹² [54].

Складирование крупногабаритных отходов осуществляется потребителями в бункеры, расположенные на контейнерных площадках или на специальных площадках для их складирования¹⁴ [20, 78].

¹⁴ Об обращении с твердыми коммунальными отходами и внесении изменения в постановление Правительства Российской Федерации от 25 августа 2008 года № 641 : Постановление Правительства Российской Федерации от 12.11.2016 № 1156.

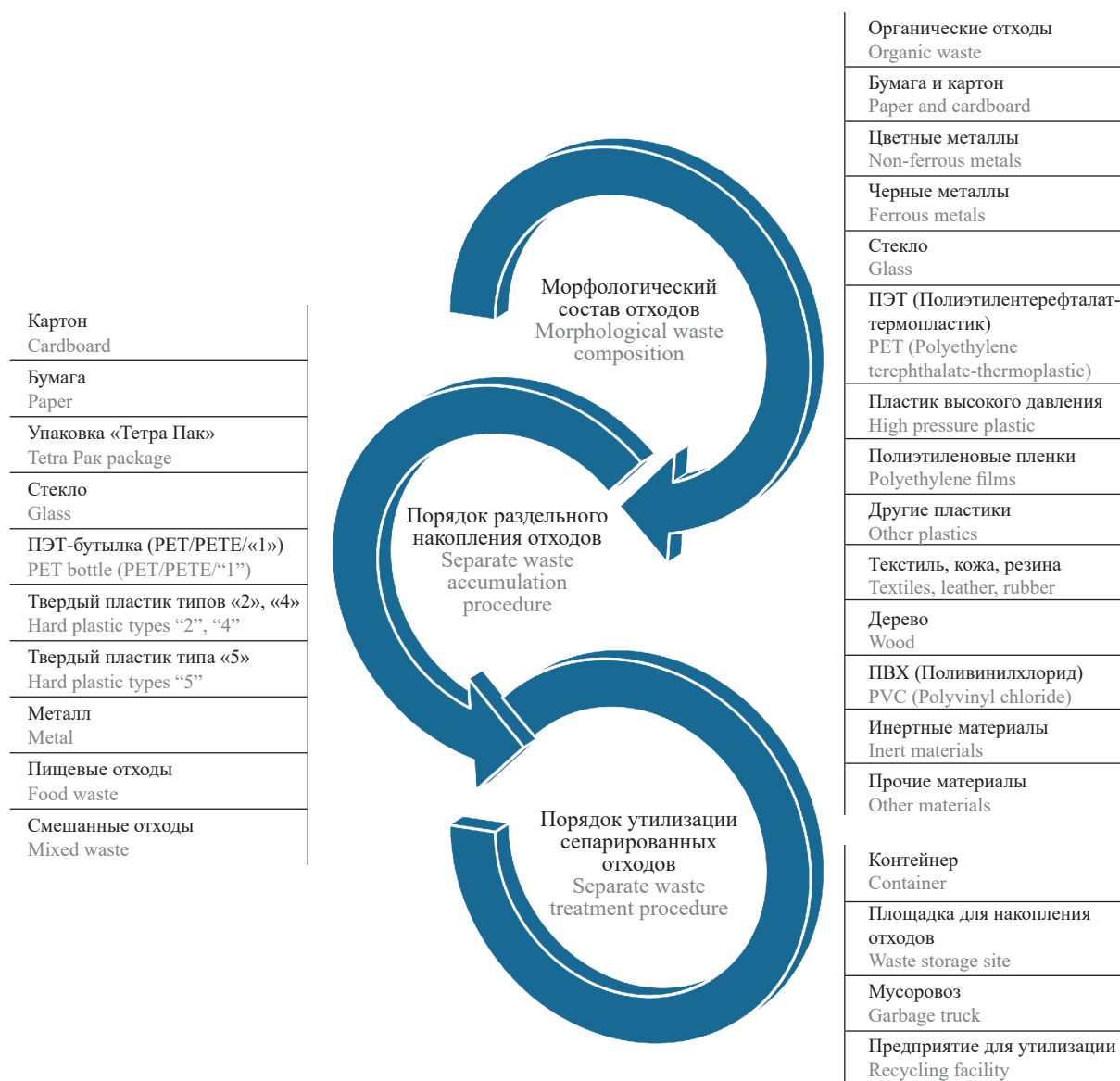


Рис. 2. Элементы системы раздельного сбора ТКО МКД

Fig. 2. Elements of the separate waste collection system implemented by the residents of a multi-family home

В морфологическом составе ТКО Санкт-Петербурга преобладают пищевые отходы — 27,4 %, бумага и картон составляют 21,5 %, пластмассы — 11,9 %, стекло — 8,9 %. Полезные компоненты, которые являются потенциальным вторичным сырьем, и смешанные ТКО разделены примерно поровну. Для прогнозируемого количества ТКО в 2040 г. соотношение составит 1250 тыс. т для вторичных ресурсов и 1250 тыс. т для смешанных отходов¹² [52, 66].

Пищевые отходы — это биоразлагаемые органические материалы. В мире существует достаточно практик обращения с пищевыми отходами [96]. При установке измельчителя в кухонную раковину отходы направляются в канализацию. Для раздельного сбора требуется установить специальный контейнер на придомовой площадке, тогда необходимо предусмотреть пакетирование отходов жильцами на уровне квартиры. Утилизация пищевых отходов направлена на производство биотоплива, компоста.

Макулатуру бумажную и картонную, применяемую в качестве вторичного сырья для переработки на бумагу и картон, разделяют на три группы — высокого, среднего и низкого качества. Макулатура каждой группы в зависимости от состава, источников поступления, цвета и способности к роспуску имеет марки.

Пластик — это органический материал, в основе которого синтетические или природные высокомолекулярные соединения. Используемые пластики чаще всего представляют собой комбинацию из полимеров различных типов, кроме того, имеют различную степень загрязненности, что затрудняет и, соответственно, удорожает их переработку. Основными методами утилизации пластика являются физический, химический и термический [61].

Вторсырьем для новой стеклянной упаковки может стать использованная. Обязательным условием для утилизации стеклосырья является правиль-

ное накопление, когда стеклянную тару различают по цвету [57].

Научные исследования использования новой продукции, изготовленной из отходов стройиндустрии, а также имеющийся опыт повторного применения материалов строительного производства позволяют прогнозировать востребованность заводов по утилизации различных строительных отходов для приема, в том числе строительного мусора, образующегося в процессе ремонта квартир в МКД (условно относимого к ТКО), и сокращение появления стихийных свалок [8, 10, 18, 58, 59, 91].

Выделим основные элементы системы раздельного сбора ТКО МКД и рассмотрим требуемые системой раздельного сбора трансформации традиционной системы. На схеме (рис. 2) показаны примерные перечни отходов по морфологическому составу и по раскладке в контейнеры, а также список основных технических элементов, обеспечивающих процесс раздельного сбора [44, 94].

Если утилизирующие отходы предприятия диктуют организацию складирования ТКО, разделенных по видам и группам отходов, группам однородных отходов, при раскладке контейнеров на площадках накопления в жилом квартале, то, следовательно, необходимо развивать производства не только по переработке селективно собранных населением отходов, но и области применения этой продукции. Выстраивается цепочка «контейнеризированные отходы — утилизирующее предприятие — область применения продукции», бесперебойную работу которой обеспечивает потребный объем отходов, а также мощности предприятий по утилизации и изготовлению новой продукции. Требуется прогнозировать обеспеченность соответствующим видом отходов работы технологической линии по утилизации и спрос на выпуск продукции.

При отсутствии или недостаточных объемах таких производств анализ морфологического состава имеет значение при распределении отходов для захоронения на той или иной карте полигона [17].

Определяют схему размещения мест накопления ТКО и осуществляют ведение их реестра органы местного самоуправления. Реестр мест накопления ТКО включает данные: о нахождении площадок и их технических характеристиках, собственниках площадок, об источниках образования складировуемых отходов¹⁵.

В Санкт-Петербурге накопление ТКО, которые образуются в результате жизнедеятельности населения, проживающего в МКД, осуществляется¹⁵:

- при наличии систем мусоропроводов: в контейнерах, установленных в мусороприемных камерах, и в контейнерах и бункерах, установленных на контейнерных площадках;

- при отсутствии систем мусоропроводов: в контейнерах и бункерах, установленных на контейнерных площадках, или в контейнерах, установленных на площадках накопления отходов.

Площадка накопления отходов — место, определенное под установку контейнеров и бункеров для складирования ТКО в исторически сложившейся застройке, где отсутствует техническая возможность оборудовать контейнерную площадку¹⁵.

Мусороприемная камера — помещение, составная часть комплекса инженерного оборудования, предназначенного для вертикального транспортирования и накопления ТКО в контейнерах¹⁵.

Трансформация системы обращения с ТКО МКД повлечет в существующих районах необходимость реконструкции эксплуатируемых мест накопления отходов, потребует предусматривать на этапе планирования новых районов проектирования контейнерных площадок с учетом внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) системы обращения с отходами производства и потребления.

«Умная» площадка накопления отходов:

- имеет прочное, моющееся покрытие с отверстием для стока в ливневую канализацию;
- оборудуется универсальным бункером под контейнеры;
- бункер изготавливается из моющегося, ударопрочного, бактерицидного материала с теплоизоляционным внутренним слоем;
- бункер оснащается автоматизированной системой домкратов для выдвижения контейнеров;
- предусматривается мобильная или стационарная мойка площадки и конструкций несъемного бункера;
- площадка оборудуется камерами системы видеонаблюдения.

«Умный» контейнер:

- материал контейнера, изготовленный из вторсырья, годится для утилизации, обеспечивает минимальную массу контейнера при максимальной прочности конструкции;
- контейнер оснащается программой, которая принимает отходы по установленным видам и группам отходов или группам однородных отходов;
- крышка контейнера открывается электронным ключом;
- контейнер оснащается электронными весами;
- контейнер имеет GPS-навигатор, который позволяет определить его текущее местоположение и степень наполняемости;

¹⁵ Об утверждении Порядка накопления твердых коммунальных отходов (в том числе их раздельного накопления) на территории Санкт-Петербурга : Распоряжение Комитета по благоустройству Санкт-Петербурга от 30.11.2018 № 410-р.

• контейнер оборудуется приспособлениями для вертикального и горизонтального перемещения.

Трансформация системы обращения с отходами — это не только внедрение цифровых технологий, но и трансформация системы путем пересмотра стратегии, целей, моделей, операций, продуктов и пр. Трансформация обращения с отходами производства и потребления, включающая систему раздельного сбора ТКО МКД, в цепи «природа — хозяйственная деятельность — природа» должна основываться на системном подходе с использованием возможностей искусственного интеллекта, работы с большими данными, новых техник, материалов и технологий [105, 106].

Организационно-технологическая модель структуры обращения с ТКО МКД с раздельным сбором (рис. 3) может иметь вид:

$M_{\text{ТКО МКД}} = \text{ТКО}_1 + \text{ТКО}_2 + \text{ТКО}_3 + \text{ТКО}_4 + \text{ТКО}_5 + \text{ТКО}_6 + \text{ТКО}_7 + \text{ТКО}_8$, где ТКО_1 — этап накопления ТКО. Собственники ТКО осуществляют разделение отходов по видам и складирование сортированных отходов в контейнерах для соответствующих видов ТКО. $\{A_1\}$, $\{B_1\}$, $\{C_1\}$, $\{D_1\}$, $\{In_1\}$ — ТКО, разделенные по видам и группам отходов, группам однородных отходов, для накопления в соответствующих контейнерах, размещенных на площадке накопления; $\{A_1 + \dots + In_1\}$ — смешанные ТКО, накапливаются в соответствующем контейнере. Раздельное накопление сортированных ТКО считается организованным в случае утверждения органом государ-

ственной власти субъекта РФ порядка раздельного накопления отходов и фактического выполнения потребителями их разделения по установленным нормативным правовым актам субъекта РФ, видам отходов и складирования сортированных ТКО в отдельных контейнерах для соответствующих видов.

ТКО_2 — этап сбора ТКО. Раздельное накопление ТКО обеспечивается региональным оператором путем установки специальных контейнеров с цветовой индикацией, имеющих маркировку с содержанием информации о компонентах ТКО, подлежащих накоплению в соответствующем контейнере, на площадках накопления. $\{A_2\}$, $\{B_2\}$, $\{C_2\}$, $\{D_2\}$, $\{In_2\}$, $\{A_2 + \dots + In_2\}$ — ТКО на этапе погрузки в специализированные транспортные средства. Региональный оператор заключает договоры на оказание услуг по обращению с отходами с собственниками ТКО и несет ответственность за обращение с ТКО с момента их погрузки в мусоровоз в местах сбора и накопления.

ТКО_3 — этап транспортирования ТКО. Для сбора и транспортирования сепарированных населением ТКО применяются специальные машины. $\{A_3\}$, $\{B_3\}$, $\{C_3\}$, $\{D_3\}$, $\{In_3\}$, $\{A_3 + \dots + In_3\}$ — ТКО на этапе транспортирования к местам хранения, утилизации или захоронения.

ТКО_4 — этап обработки отходов. Предварительная подготовка отходов $\{A_4\}$, $\{B_4\}$, $\{C_4\}$, $\{D_4\}$, $\{In_4\}$, $\{A_4 + \dots + In_4\}$ к дальнейшей утилизации, включая их сортировку, разборку, очистку.

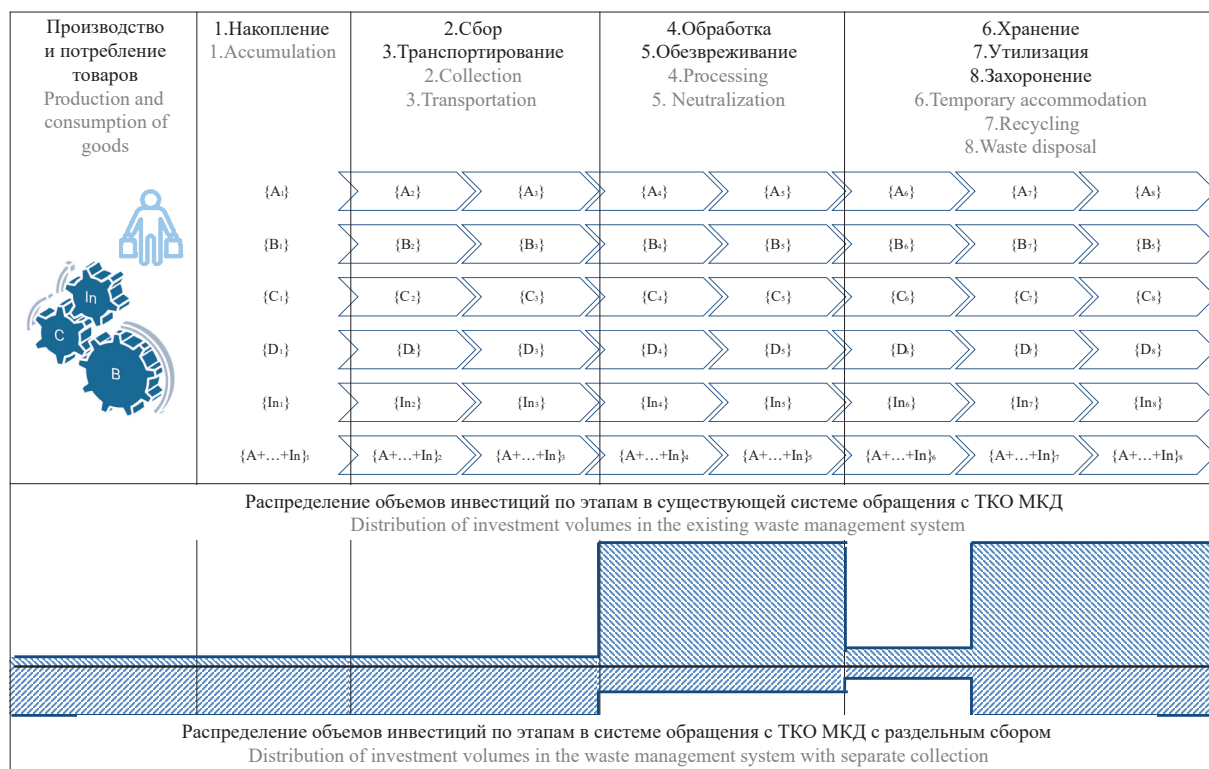


Рис. 3. Модель системы раздельного сбора ТКО МКД в глобальной системе хозяйственной и иной деятельности
Fig. 3. Separate waste collection system for residents of multi-family dwelling in the global system economic activity

ТКО₅ — этап обезвреживания отходов. Уменьшение массы отходов $\{A_5\}$, $\{B_5\}$, $\{C_5\}$, $\{D_5\}$, $\{In_5\}$, $\{A_5+...+In_5\}$, изменение их состава, физических и химических свойств в целях снижения негативного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую среду.

ТКО₆ — этап хранения ТКО. Складирование отходов $\{A_6\}$, $\{B_6\}$, $\{C_6\}$, $\{D_6\}$, $\{In_6\}$, $\{A_6+...+In_6\}$ в специализированных объектах сроком более чем одиннадцать месяцев в целях утилизации, обезвреживания, захоронения. Для того или иного вида отходов этот этап может отсутствовать.

ТКО₇ — этап утилизации ТКО $\{A_7\}$, $\{B_7\}$, $\{C_7\}$, $\{D_7\}$, $\{In_7\}$, $\{A_7+...+In_7\}$ в вариантах рециклинга, регенерации, рекуперации, в виде вторичных энергетических ресурсов.

ТКО₈ — этап захоронения ТКО. Изоляция не подлежащих дальнейшей утилизации отходов $\{A_8\}$, $\{B_8\}$, $\{C_8\}$, $\{D_8\}$, $\{In_8\}$, $\{A_8+...+In_8\}$.

Распределение основных объемов инвестиций в существующей системе обращения с ТКО МКД приходится на этапы : 4. Обработка, 5. Обезвреживание, 7. Утилизация, 8. Захоронение. При переходе в процессе трансформации к новой системе раздельного сбора ТКО МКД прогнозируется перераспределение объемов инвестиций на этапы - 1. Накопление, 2. Сбор, 3. Транспортирование, так как потребуются технические переоснащение площадок накопления отходов, специализированных транспортных средств и пр. (рис. 3). Также на рис. 3 показана необходимость увеличения инвестиций в жизненном цикле продукции для дополнительных научных исследований, маркировки, вторичного применения и др. экологических инноваций [32, 102, 106].

Многоуровневая архитектура управления инфраструктурой «умных» городов на основе интернета вещей может быть использована при решении проблемы управления отходами [107–109]. В сфере обращения с отходами технологии искусственного интеллекта, больших данных могут быть использованы для определения вероятностей в системе обращения с ТКО МКД в цепи «природа — хозяйственная деятельность — природа» [106, 110, 111].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Система раздельного сбора твердых коммунальных отходов (ТКО) жителями многоквартирных домов (МКД) является составной частью системы обращения с отходами производства и потребления населенного пункта в глобальной системе хозяйственной и иной деятельности человечества. Показатели утилизации отходов производства и потребления на территории России и, в частности, Санкт-Петербурга, а также объемы отходов, образуемые населением, свидетельствуют о не-

обходимости трансформации системы обращения с отходами жителей МКД.

Трансформация системы предполагает внедрение инноваций на всех этапах жизненного цикла: при разработке, изготовлении продуктовой упаковки и товаров разового потребления; при проектировании, изготовлении и эксплуатации мусорных контейнеров; при проектировании, реконструкции/строительстве и эксплуатации площадок накопления; при проектировании, сборке/модернизации и эксплуатации специализированных транспортных средств; в организационно-технологической цепи обращения с отходами; на предприятиях утилизации отходов и полигонах. Трансформация системы должна быть ориентирована на применение «зеленых» технологий на этапах жизненного цикла элементов цепи «природа — хозяйственная деятельность — природа».

Возможности регионального оператора могут быть увеличены за счет привлечения предприятий, занимающихся утилизацией вторсырья, на субподрядной основе.

Результаты анализа морфологического состава ТКО населенного пункта могут быть использованы при проектировании мест накопления отходов в жилых кварталах для расчета количества контейнеров раздельного сбора. Важную роль имеет предоставление потребителям информации «зеленой» стандартизации и маркировки. До начала строительства или реконструкции мест накопления отходов в жилых кварталах и во время их эксплуатации населению требуется предоставлять повсеместный доступ к информации о правилах раздельного сбора ТКО на площадках накопления, включая размещение информации на портале правительства города и сайтах муниципальных образований, на сайте регионального оператора; в СМИ; в виде раздачи и рассылки листовок, на продуктовых этикетках, на стендах в местах накопления, на мусорных контейнерах.

Эффективность работы системы раздельного сбора ТКО жителями МКД, диапазон влияния на окружающую среду в той или иной степени зависит от эффективности участков подсистем обращения с отходами — «накопление — сбор — транспортирование — обработка — обезвреживание — хранение — утилизация — захоронение». Значимость системы управления, координирующей процесс на городском уровне, трудно переоценить.

Внедрение экономических инструментов стимулирования, а также политики экологических инноваций может способствовать переходу страны, региона, населенного пункта к модели замкнутого цикла обращения с отходами. «Умным» городам нужна «умная» система обращения с отходами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайсман Я.И., Пугин К.Г. Ретроспективный анализ и перспективы развития систем управления обращением с отходами производства // Вестник МГСУ. 2015. № 2. С. 70–84.
2. Венцюлис Л.С., Пименов А.Н., Быстрова Н.Ю. Основные научно-исследовательские работы лаборатории систем обращения с отходами НИЦЭБ РАН за последние 20 лет // Региональная экология. 2018. № 4 (54). С. 28–37. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-4-28-37
3. Теличенко В.И., Щербина Е.В. Социально-природно-техногенная система устойчивой среды жизнедеятельности // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 5–12. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.5-12
4. Castiglieo Joshua R., Pollack Adam, Cleveland Cutler J., Walsh Michael J. Evaluating emissions reductions from zero waste strategies under dynamic conditions: A case study from Boston // Waste Management. 2021. Vol. 126. Pp. 170–179. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.02.026
5. Чертеп К.Л., Шестаков Н.И. Современные биопозитивные технологии переработки отходов коммунально-строительного сектора // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 8. С. 1135–1146. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1135-1146
6. Шалболова У.Ж., Силка Д.Н., Кенжегалиева З.Ж., Егембердиева С.М. Сравнительный анализ развития жилищно-коммунального хозяйства России и Казахстана // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 836–846. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.836-846
7. Абросимов А.В., Никольский Д.Б., Шешукова Л.В. Использование космических снимков и геоинформационных технологий для мониторинга мест складирования отходов // Экология урбанизированных территорий. 2014. № 1. С. 38–43.
8. Ткач С.А., Теличенко В.И. Решение экологических задач в процессе утилизации техногенных отходов при производстве газобетона // Экология урбанизированных территорий. 2016. № 2. С. 39–44.
9. Шигаев В.Ю., Шелепов Д.А., Хохлов А.Е., Меренов И.А. Исследование электрокинетических и электрохимических явлений в фосфогипсе при решении геоэкологических задач // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2021. № 2. С. 75–85. DOI: 10.31857/S0869780921020090
10. Мырзин В.А., Толмачева Н.А., Зелинская Е.В., Курина А.В., Гаращенко А.А. Исследование экологически безопасных строительных материалов на основе отходов // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 9 (120). С. 1143–1153. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1143-1153
11. Юганова Т.И. Методология экологической оценки жизненного цикла твердых коммунальных отходов. Основные положения и примеры применения // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 5. С. 3–23.
12. Silva C.L., Weins N., Potinkara M. Formalizing the informal? A perspective on informal waste management in the BRICS through the lens of institutional economics // Waste Management. 2019. Vol. 99. Pp. 79–89. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.08.02
13. Музалевский А.А., Федоров М.П., Сергеев В.В. Риск-анализ модели полигонов твердых бытовых отходов вокруг Санкт-Петербурга // Экология урбанизированных территорий. 2019. № 3. С. 22–27.
14. Никанорова А.А., Пименов А.Н. Прогнозирование объемов ТКО в Ленинградской области // Региональная экология. 2017. № 3 (49). С. 45–48.
15. Юганова Т.И. Выбор участков для размещения объектов обращения с отходами на основе методов многокритериального принятия решений // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 4. С. 79–93. DOI: 10.31857/S0869-78092019479-93
16. Tonjes D.J., Aphale O., Clark L., Thyberg K.L. Conversion from dual stream to single stream recycling results in nuanced effects on revenues and waste stream amounts and composition // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 138. Pp. 151–159. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.07.020
17. Осипов В.И. Управление твердыми коммунальными отходами как федеральный экологический проект // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 3. С. 3–11. DOI: 10.31857/S0869-7809201933-11.
18. Пугин К.Г., Вайсман Я.И. Управление рисками негативных воздействий на объекты окружающей среды строительных материалов из отходов производства // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 73–87.
19. Khandelwal H., Thalla A.R., Kumar S., Kumar R. Life cycle assessment of municipal solid waste management options for India // Bioresource Technology. 2019. Vol. 288. P. 121515. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121515
20. Венцюлис Л.С., Скорик Ю.И. Использование древесины и твердых коммунальных отходов в качестве топлива в энергетике: экологический и экономический выигрыш // Региональная экология. 2012. № 1–2 (33). С. 44–47.
21. Лыков И.Н., Логинов А.А., Оболенская Е.В. Геоэкологическая и экономическая оценка системы обращения с твердыми коммунальными отходами в Калужской области // Экология урбанизированных территорий. 2017. № 3. С. 87–91.
22. Mwanza B.G., Mbohwa C., Telukdarie A. Levers influencing sustainable waste recovery at households level: a review // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 21. Pp. 615–622. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.163

23. *Wadehra S., Mishra A.* Encouraging urban households to segregate the waste they generate: insights from a field experiment in Delhi, India // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 134. Pp. 239–247. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.03.013
24. *Венцюлис Л.С., Воронов Н.В., Быстрова Н.Ю., Родионов В.З.* Эколого-экономическая эффективность систем обращения с твердыми коммунальными отходами в регионах водосборного бассейна Финского залива // *Региональная экология*. 2017. № 1 (47). С. 16–21.
25. *Дьячкова О.Н.* Влияние загрязнения почвы на экологическую безопасность городской среды Санкт-Петербурга // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. 2020. № 1. С. 67–71. DOI: 10.31857/S0869780920010044
26. *Дьячкова О.Н.* Система контролирующих параметров рационального использования водных ресурсов // *Яковлевские чтения: сб. докл. XVI Междунар. научно-техн. конф., посвящ. памяти академика РАН С.В. Яковлева*. 2021. С. 75–83.
27. *Музалевский А.А., Федоров М.П., Сергеев В.В.* Оценка экологических рисков в природно-технических системах, образованных полигонами твердых бытовых отходов // *Экология урбанизированных территорий*. 2020. № 1. С. 28–34.
28. *Слюсарь Н.Н.* Использование результатов оценки экологического риска для разработки программ вывода из эксплуатации старых свалок // *Вестник МГСУ*. 2016. № 8. С. 88–99.
29. *Дьячкова О.Н.* Влияние состояния природных компонентов городской среды на здоровье населения // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: сб. докл. Первой Национальной конф.* 2020. С. 449–554.
30. *Carattini S., Baranzini A., Lalive R.* Is taxing waste a waste of time? Evidence from a Supreme Court Decision // *Ecological Economics*. 2018. Vol. 148. Pp. 131–151. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.02.001
31. *Chu Zh., Wang W., Zhou A., Huang W.-Ch.* Charging for municipal solid waste disposal in Beijing // *Waste Management*. 2019. Vol. 94. Pp. 85–94. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.05.051
32. *Edwards J., Burna S., Crossin E., Othman M.* Life cycle costing of municipal food waste management systems: the effect of environmental externalities and transfer costs using local government case studies // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 138. Pp. 118–129. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.06.018
33. *Ma J., Hipel K.W., Hanson M.L., Cai X., Liu Y.* An analysis of influencing factors on municipal solid waste source-separated collection behavior in Guilin, China by Using the Theory of Planned Behavior // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 37. Pp. 336–343. DOI: 10.1016/j.scs.2017.11.037
34. *Ильичев В.А., Емельянов С.Г., Колчунов В.И., Бакаева Н.В., Кобелева С.А.* Моделирование и анализ закономерностей динамики изменения состояния биосферосовместимых урбанизированных территорий // *Жилищное строительство*. 2015. № 3. С. 3–9.
35. *Ильичев В., Емельянов С., Колчунов В., Бакаева Н.* About the dynamic model formation of the urban livelihood system compatible with the biosphere // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725–726. Pp. 1224–1230.
36. *Сухинина Е.А.* Строительство зданий из вторичного сырья с учетом требований экологических стандартов // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 2. С. 186–201. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.186-201
37. *Суздаева А.Л.* Современный характер урбанизации и необходимость комплексного решения проблем экологической безопасности, безопасности жизнедеятельности и охраны труда // *Экология урбанизированных территорий*. 2014. № 2. С. 12–16.
38. *Теличенко В.И., Слесарев М.Ю.* Проблема и решение системы оценки экологической безопасности строительства в мегаполисе // *Экология урбанизированных территорий*. 2013. № 1. С. 13–17.
39. *Теличенко В.И., Слесарев М.Ю.* «Зеленая» стандартизация будущего — фактор экологической безопасности среды жизнедеятельности // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 8. С. 90–97.
40. *Ye Q., Anwar M.A., Zhou R., Asmi F., Ahmad I.* China's green future and household solid waste: Challenges and prospects // *Waste Management*. 2020. Vol. 105. Pp. 328–338. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.02.025
41. *Волкодаева М.В., Федина Ж.Т.* Проблема твердых бытовых отходов. Краткая история проблемы // *Экология урбанизированных территорий*. 2014. № 1. С. 34–37.
42. *Звягинцева А.В., Швецова А.А.* Кластерный анализ регионов России по показателям жилищно-коммунального хозяйства // *Жилищное строительство*. 2018. № 8. С. 40–43.
43. *Сергиенко Л.И., Морозова Н.В.* Биологическая рекультивация земель на полигонах захоронения твердых бытовых отходов // *Экология урбанизированных территорий*. 2014. № 1. С. 49–53.
44. *Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S.M.* Solid waste issue: sources, composition, disposal, recycling, and valorization // *Egyptian Journal of Petroleum*. 2018. Vol. 27. Issue 4. Pp. 1275–1290. DOI: 10.1016/j.ejpe.2018.07.003
45. *Lamboglia R., Fiorentino R., Mancini D., Garzella S.* From a garbage crisis to sustainability strategies: the case study of Naples' waste collection firm // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 186. Pp. 726–735. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.151
46. *Mwanza B.G., Mbohwa C., Telukdarie A.* The influence of waste collection systems on resource recovery: a review // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 21. Pp. 846–853. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.192

47. Rossit D.G., Toutouh J., Nesmachnow S. Exact and heuristic approaches for multi-objective garbage accumulation points location in real scenarios // *Waste Management*. 2020. Vol. 105. Pp. 467–481. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.02.016
48. Torres-Pereda P., Parra-Tapia E., Rodríguez M.A., Félix-Arellano E., Riojas-Rodríguez H. Impact of an intervention for reducing waste through educational strategy: A Mexican case study, what works, and why? // *Waste Management*. 2020. Vol. 114. Pp. 183–195. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.06.027
49. Calabrò Paolo S., Komilis D. A standardized inspection methodology to evaluate municipal solid waste collection performance // *Waste Management*. 2019. Vol. 246. Pp. 184–191. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.142
50. Liu L., Liao W. Optimization and profit distribution in a two-echelon collaborative waste collection routing problem from economic and environmental perspective // *Waste Management*. 2021. Vol. 120. Pp. 400–414. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.09.045.
51. Tong Y.D., Huynh T.D.X., Khong T.D. Understanding the role of informal sector for sustainable development of municipal solid waste management system: A case study in Vietnam // *Waste Management*. 2021. Vol. 124. Pp. 118–127. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.01.033
52. Vu H.L., Bolingbroke D., Ng K.T.W., Fallah B. Assessment of waste characteristics and their impact on GIS vehicle collection route optimization using ANN waste forecasts // *Waste Management*. 2019. Vol. 88. Pp. 118–130. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.037
53. Венцюлис Л.С. Экономическая и экологическая эффективность различных способов обезвреживания и утилизации отходов // *Региональная экология*. 2015. № 7 (42). С. 88–92.
54. Пичугин Е.А. Методы, способы и технологии обезвреживания и утилизации опасных стойких органических загрязнителей // *Экология урбанизированных территорий*. 2016. № 3. С. 40–46.
55. Peri G., Ferrante P., La Gennusa M., Pisanello C., Rizzo G. Greening MSW management systems by saving footprint: the contribution of the waste transportation // *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 219. Pp. 74–83. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.04.098
56. Донченко В.К., Хильченко Г.В. Современные тенденции формирования рынков вторичных ресурсов // *Региональная экология*. 2018. № 4 (54). С. 88–97. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-4-88-97
57. Никанорова А.А., Лебедев Д.А., Никаноров П.А., Пименов А.Н., Венцюлис Л.С. Перспективы извлечения вторичных материальных ресурсов из ТКО в Ленинградской области // *Региональная экология*. 2019. № 2 (56). С. 72–85. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-2-72-85
58. Олейник П.П., Олейник С.П. Основные проблемы переработки строительных отходов // *Жилищное строительство*. 2005. № 5. С. 24–26.
59. Пахратдинов А.А., Ткач Е.В., Орешкин Д.В. Экологическое и геоэкологическое обоснование утилизации бетонного лома в качестве щебня при производстве железобетонных изделий // *Экология урбанизированных территорий*. 2016. № 3. С. 84–88.
60. Цховребов Э.С. Формирование региональных стратегий управления обращением с вторичными ресурсами // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 4. С. 450–463. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.450-463
61. Escario J.-J., Rodriguez-Sanchez C., Casaló L.V. The influence of environmental attitudes and perceived effectiveness on recycling, reducing, and reusing packaging materials in Spain // *Waste Management*. 2020. Vol. 113. Pp. 251–260. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.05.043.
62. Tong X., Nikolic I., Dijkhuizen B., van den Hoven M., Minderhoud M., Wäckerlin N. et al. Behaviour change in post-consumer recycling: applying agent-based modelling in social experiment // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 187. Pp. 1006–1013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.261
63. Венцюлис Л.С. Эколого-экономические ущербы от размещения твердых коммунальных отходов в районах Ленинградской области, примыкающих к Финскому заливу // *Региональная экология*. 2015. № 2 (37). С. 27–32.
64. Галицкая И.В., Путилина В.С., Юганова Т.И. Аммонийный азот в фильтрате полигонов ТКО: образование, трансформация, долгосрочность загрязнения // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. 2021. № 1. С. 3–13. DOI: 10.31857/S0869780921010021
65. Галицкая И.В., Путилина В.С., Юганова Т.И. Продолжительность выщелачивания металлов из свалочного тела при захоронении твердых коммунальных отходов // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. 2020. № 6. С. 3–23. DOI: 10.31857/S086978092006003X
66. Загорская Ю.М., Завизион Ю.В. Оценка степени разложения твердых коммунальных отходов разного срока захоронения по данным состава // *Экология урбанизированных территорий*. 2016. № 2. С. 49–54.
67. Зеленцов Д.В., Тупицына О.В., Чертес К.Л. Конструктивно-строительное оформление системы и сооружений подачи и распределения воздуха в обращении с отходами // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 1. С. 118–125. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.118-125
68. Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Еремина О.Н., Анисимова Н.Г. Методологические принципы оценки геологической среды для размещения объектов обращения с ТКО // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. 2021. № 1. С. 48–58. DOI: 10.31857/S0869780921010045

69. Лыков И.Н., Зякун А.М., Оболенская Е.В., Голофтьева А.С. Утилизация отходов на полигоне ТКО в г. Калуге и интенсивность образования биогаза // Экология урбанизированных территорий. 2016. № 4. С. 44–49.
70. Лыков И.Н., Логинов А.А., Дадаянц А.К. Особенности использования минерального биофильтра на полигоне твердых коммунальных отходов компостированием // Экология урбанизированных территорий. 2019. № 4. С. 51–56.
71. Никанорова А.А., Пименов А.Н., Венцюлис Л.С. Направления совершенствования систем обращения с отходами в населенных пунктах Ленинградской области // Региональная экология. 2017. № 4 (50). С. 77–82.
72. Цховребов Э.С. Ресурсосбережение: основные этапы становления, теории и методы, тенденции и перспективы развития в промышленности и строительной индустрии России // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 1. С. 112–158. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.112-158
73. Цховребов Э.С., Величко Е.Г. Теоретические положения формирования методологии создания единой комплексной системы обращения строительных отходов // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 1 (100). С. 83–93. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.83-93
74. Pandey R.U., Surjan A., Kapshe M. Exploring linkages between sustainable consumption and prevailing green practices in reuse and recycling of household waste: Case of Bhopal city in India // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 173. Pp. 49–59. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.227
75. Xiao S., Dong H., Geng Y., Brander M. An overview of China's recyclable waste recycling and recommendations for integrated solutions // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 134. Pp. 112–120. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.02.032
76. Банчева А.И. Об опыте Японии в управлении отходами // Экология урбанизированных территорий. 2016. № 2. С. 61–69.
77. Венцюлис Л.С., Быстрова Н.Ю. Экологическая эффективность систем обращения с твердыми коммунальными отходами в Швеции // Региональная экология. 2019. № 2 (56). С. 86–92. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-2-86-92
78. Венцюлис Л.С., Пименов А.Н., Никанорова А.А. Экономическая эффективность системы обращения с твердыми коммунальными отходами в Германии // Региональная экология. 2019. № 3 (57). С. 115–122. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-3-115-122
79. Высокинская Р.В., Криночкина О.К. Обращение с твердыми коммунальными отходами в развитых и развивающихся странах // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 1. С. 93–96. DOI: 10.31857/S0869780920010214
80. Заиканова И.Н. Правовой подход к решению проблем управления и геоэкологической безопасности хранения коммунальных отходов в странах ЕС // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2021. № 1. С. 59–68. DOI: 10.31857/S0869780921010094
81. Ali M., Geng Y., Robins D., Cooper D., Roberts W., Vogtländer J. Improvement of waste management practices in a fast expanding sub-megacity in Pakistan, on the basis of qualitative and quantitative indicators // Waste Management. 2019. Vol. 85. Pp. 253–263. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.12.030
82. Andersson C., Stage J. Direct and indirect effects of waste management policies on household waste behaviour: the case of Sweden // Waste Management. 2018. Vol. 76. Pp. 19–27. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.03.038
83. Azevedo B.D., Scavarda L.F., Caiado R.G.G., Fuss M. Improving urban household solid waste management in developing countries based on the German experience // Waste Management. 2021. Vol. 120. Pp. 772–783.
84. Duygan M., Stauffacher M., Meylan G. Discourse coalitions in Swiss waste management: gridlock or winds of change? // Waste Management. 2018. Vol. 72. Pp. 25–44. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.11.006
85. Скорик Ю.И., Венцюлис Л.С., Быстрова Н.Ю. Проблемы размещения твердых коммунальных отходов в Ленинградской области // Региональная экология. 2013. № 1–2 (34). С. 138–142.
86. Ершова С.А., Шишелова С.А., Орловская Т.Н. Экономические и правовые аспекты оценки эффективности градостроительных преобразований территории // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 9. С. 1308–1320. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1308-1320
87. Кострикин П.Н. Модель синхронизации комплексного развития многофункциональной городской среды // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 3 (114). С. 339–348.
88. Любарская М.А., Чекалин В.С., Бачуринская И.А. Учет влияния экологического следа в системе управления инфраструктурой городского хозяйства // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 10. С. 1461–1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1461-1472
89. Финогенов А.И. Проблемы архитектурно-планировочной организации городских объектов производственно-коммунального назначения // Вестник МГСУ. 2015. № 8. С. 30–40.
90. Пугачев Е.А., Пышненко Е.В. Экологические проблемы урбанизированных территорий // Экология урбанизированных территорий. 2016. № 1. С. 29–34.
91. Рябов Ю.В. Прогнозирование мест возникновения несанкционированных свалок в целях мониторинга нарушенных земель // Региональная экология. 2012. № 1–2 (33). С. 63–80.
92. Савоськина Р.Р., Бахонина Е.И. Проблема свалок бытовых отходов в республике Башкортостан // Экология урбанизированных территорий. 2014. № 4. С. 71–74.

93. Пименов А.Н., Рябов Ю.В. Социально-экономические критерии оценки систем обращения с отходами в трансграничных субрегионах водосборного бассейна Финского залива // Региональная экология. 2017. № 4 (50). С. 101–107.
94. Фоменко Г.А., Фоменко М.А., Арапова Е.А., Ладыгина О.В. Совершенствование системы статистического учета показателей твердых коммунальных отходов // Экология урбанизированных территорий. 2016. № 1. С. 43–49.
95. Okonta F.N., Mohlalifi M. Assessment of factors affecting source recycling among metropolitan Johannesburg residents // Waste Management. 2020. Vol. 105. Pp. 445–449. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.02.006
96. Ek C., Miliute-Plepiene J. Behavioral spillovers from food-waste collection in Swedish municipalities // Journal of Environmental Economics and Management. 2018. Vol. 89. Pp. 168–186. DOI: 10.1016/j.jeem.2018.01.004
97. Gilli M., Nicolli F., Farinelli P. Behavioural attitudes towards waste prevention and recycling // Ecological Economics. 2018. Vol. 154. Pp. 294–305. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.08.009
98. Алексашина В.В., Карташова К.К. Проблемы твердых бытовых отходов (ТБО) в мегаполисе (на примере Москвы) // Экология урбанизированных территорий. 2014. № 4. С. 59–67.
99. Вахитов Ю.Ф., Шамсутдинова Л.Р., Зверева Т.И., Акбалина З.Ф., Белан Л.Н. Изучение изменения морфологического состава твердых бытовых отходов в мегаполисе г. Уфа // Экология урбанизированных территорий. 2014. № 1. С. 44–48.
100. Венцюлис Л.С., Пименов А.Н., Никанорова А.А. Направления совершенствования систем обращения с твердыми коммунальными отходами в Санкт-Петербурге // Региональная экология. 2018. № 2 (52). С. 95–102. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-2-95-102
101. Кулибаба В.В., Мурашко И.И., Торопова Н.М. Мониторинг оборота муниципальных твердых бытовых отходов Ленинградской области // Региональная экология. 2012. № 1–2 (33). С. 85–91.
102. Gardiner R., Hajek P. Municipal waste generation, R&D intensity, and economic growth nexus — A case of EU regions // Waste Management. 2020. Vol. 114. Pp. 124–135. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.06.038
103. Meng X., Wen Z., Qian Y. Multi-agent based simulation for household solid waste recycling behavior // Resources, Conservation and Recycling. 2016. Vol. 128. Pp. 535–545. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.09.033
104. Ng S.L. An assessment of multi-family dwelling recycling in Hong Kong: A managerial perspective // Waste Management. 2019. Vol. 89. Pp. 294–302. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.04.014
105. Marques P., Manfroí D., Deitos E., Cegoni J., Castilhos R., Rochol J. et al. An IoT-based smart cities infrastructure architecture applied to a waste management scenario // Ad Hoc Networks. 2019. Vol. 87. Pp. 200–208. DOI: 10.1016/j.adhoc.2018.12.009
106. Sarc R., Curtis A., Kandlbauer L., Khodier K., Lorber K.E., Pomberger R. Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management — A review // Waste Management. 2019. Vol. 45. Pp. 476–492. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.035.
107. Cubillos M., Wulff Jesper N., Wohlk S. A multilevel Bayesian framework for predicting municipal waste generation rates // Waste Management. 2021. Vol. 127. Pp. 90–100. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.04.011
108. Esmailian B., Wang B., Lewis K., Duarte F., Ratti C., Behdad S. The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper // Waste Management. 2018. Vol. 81. Pp. 177–195. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.09.047
109. Gaeta G.L., Ghinoi S., Silvestri F., Tassinari M. Innovation in the solid waste management industry: Integrating neoclassical and complexity theory perspectives // Waste Management. 2021. Vol. 120. Pp. 50–58. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.11.009
110. Abdallah M., Talib M.A., Feroz S., Nasir Q., Abdalla H., Mahfood B. Artificial intelligence applications in solid waste management: A systematic research review // Waste Management. 2020. Vol. 109. Pp. 231–246. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.04.057
111. Xu A., Chang H., Xu Y., Li R., Li X., Zhao Y. Applying artificial neural networks (ANNs) to solve solid waste-related issues: A critical review // Waste Management. 2021. Vol. 124. Pp. 385–402. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.02.029

Поступила в редакцию 17 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 12 июня 2021 г.

Одобрена для публикации 21 июня 2021 г.

ОБ АВТОРЕ: **Ольга Николаевна Дьячкова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии строительного производства; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; SPIN-код: 7630-8646; dyachkova_on@mail.ru.

REFERENCES

1. Vaysman Ya.I., Pugin K.G. Retrospective Analysis and Development Prospects for the Industrial Waste Management Control Systems. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 2:70-84. (rus.).
2. Ventsyulis L.S., Pimenov A.N., Bystrova N.Yu. The main research works of the laboratory of waste management systems, St. Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety RAS, over the last 20 years. *Regional'naya ekologiya*. 2018; 4(54):28-37. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-4-28-37 (rus.).
3. Telichenko V.I., Shcherbina E.V. Social-natural-technogenic system of sustainable environment of vital activity. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 6:5-12. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.5-12 (rus.).
4. Castiglio Joshua R., Pollack Adam, Cleveland Cutler J., Walsh Michael J. Evaluating emissions reductions from zero waste strategies under dynamic conditions: A case study from Boston. *Waste Management*. 2021; 126:170-179. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.02.026
5. Chertes K.L., Shestakov N.I. *Modern biopositive technologies of waste processing in the utilities and construction industries*. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1135-1146. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1135-1146 (rus.).
6. Shalbolova U.Zh., Silka D.N., Kenzhagaliyeva Z.Zh., Egemberdiyeva S.M. Comparative analysis of the development of housing and communal services of Russia and Kazakhstan. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13:7(118):836-846. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.836-846 (rus.).
7. Abrosimov A.V., Nikolskiy D.B., Sheshukova L.V. Satellite images and gis technologies for monitoring waste storage places. *Ecology of Urbanized Areas*. 2014; 1:38-43. (rus.).
8. Tkach S.A., Telichenko V.I. Environmental problems of recycling of technogenic waste in the production of aerated concrete. *Ecology of Urbanized Areas*. 2016; 2:39-44. (rus.).
9. Shigaev V.YU., Shelepov D.A., Khokhlov A.E., Merenov I.A. Investigation of electrokinetic and electrochemical phenomena in phosphogypsum in solving geoecological problems. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2021; 2:75-85. DOI: 10.31857/S0869780921020090 (rus.).
10. Vsevolod A. Mymrin, Natalia A. Tolmacheva, Elena V. Zelinskaia, Anastasia V. Kurina, Aleksandr A. Garashchenko. Research of the environmentally safe waste-based building materials. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13:9:1143-1153. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1143-1153 (rus.).
11. Yuganova T.I. Methodology of assessing the environmental life cycle of municipal solid waste. Conceptual issues and examples of application. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2020; 5:3-23. DOI: 10.31857/S0869780920050094 (rus.).
12. Silva C.L., Weins N., Potinkara M. Formalizing the informal? A perspective on informal waste management in the BRICS through the lens of institutional economics. *Waste Management*. 2019; 99:79-89. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.08.02
13. Muzalevsky A.A., Fedorov M.P., Sergeev V.V. Risk analysis of polygon model of solid waste in the vicinity of St. Petersburg. *Ecology of Urbanized Areas*. 2019; 3:22-27. (rus.).
14. Nikanorova A.A., Pimenov A.N. Forecasting the msw volumes in Leningrad Oblast. *Regional Ecology*. 2017; 3(49):45-48. (rus.).
15. Yuganova T.I. Selection of sites for allocation of waste disposal objects based on the multicriteria decision-making methods. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2019; 4:79-93. DOI: 10.31857/S0869-78092019479-93 (rus.).
16. Tonjes D.J., Aphale O., Clark L., Thyberg K.L. Conversion from dual stream to single stream recycling results in nuanced effects on revenues and waste stream amounts and composition. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018; 138:151-159. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.07.020.
17. Osipov V.I. Management of solid municipal waste as the federal ecological project. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2019; 3:3-11. DOI: 10.31857/S0869-7809201933-11 (rus.).
18. Pugin K.G., Vaysman Ya.I. Risk Management of the Negative Impacts of Building Materials Produced of Production Wastes on the Environmental Medium. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 6:73-87. (rus.).
19. Khandelwal H., Thalla A.R., Kumar S., Kumar R. Life cycle assessment of municipal solid waste management options for India. *Bioresource Technology*. 2019; 288:121515. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121515
20. Ventsyulis L.S., Skorik Yu.I. Using wood and municipal solid waste as a fuel in the energy sector: an environmental and economic benefit. *Regional Ecology*. 2012; 1-2(33):44-47. (rus.).
21. Lykov I.N., Loginov A.A., Obolenskaya E.V. Geoecological and economic assessment of solid municipal waste management in the Kaluga Region. *Ecology of Urbanized Areas*. 2017; 3:87-91. (rus.).
22. Mwanza B.G., Mbohwa C., Telukdarie A. Levers influencing sustainable waste recovery at households level: a review. *Procedia Manufacturing*. 2018; 21:615-622. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.163

23. Wadehra S., Mishra A. Encouraging urban households to segregate the waste they generate: insights from a field experiment in Delhi, India. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018; 134:239-247. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.03.013
24. Ventsyulis L.S., Voronov N.V., Bystrova N.Yu., Rodionov V.Z. Ecological-economic efficiency of municipal solid waste treatment systems in Gulf of Finland catchment area regions. *Regional Ecology*. 2017; 1(47):16-21. (rus.).
25. D'yachkova O.N. Influence of soil contamination on ecological safety of St. Petersburg urban environment. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2020; 1:67-71. DOI: 10.31857/S0869780920010044 (rus.).
26. D'yachkova O.N. System of control parameters for the rational use of water resources. *Yakovlev's Readings: a collection of reports of the XVI International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of Academician S.V. Yakovleva*. 2021; 75-83. (rus.).
27. Muzalevsky A.A., Fedorov M.P., Sergeev V.V. Risk assessment in natural-technical systems formed by solid waste landfills. *Ecology of Urbanized Areas*. 2020; 1:28-34. (rus.).
28. Slyusar' N.N. The Use of Environmental Risk Assessment for the Development of Retirement Programs for Old Dumps. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 8:88-99 (rus.).
29. D'yachkova O.N. Influence of the state of natural components of the urban environment on public health. *Actual problems of the construction industry and education: a collection of reports from the First National Conference*. 2020; 449-554. (rus.).
30. Carattini S., Baranzini A., Lalive R. Is taxing waste a waste of time? Evidence from a Supreme Court Decision. *Ecological Economics*. 2018; 148:131-151. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.02.001
31. Chu Zh., Wang W., Zhou A., Huang W.-Ch. Charging for municipal solid waste disposal in Beijing. *Waste Management*. 2019; 94:85-94. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.05.051
32. Edwards J., Burna S., Crossin E., Othman M. Life cycle costing of municipal food waste management systems: the effect of environmental externalities and transfer costs using local government case studies. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018; 138:118-129. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.06.018
33. Ma J., Hipel K.W., Hanson M.L., Cai X., Liu Y. An analysis of influencing factors on municipal solid waste source-separated collection behavior in Guilin, China by Using the Theory of Planned Behavior. *Sustainable Cities and Society*. 2018; 37:336-343. DOI: 10.1016/j.scs.2017.11.037
34. Ilyichev V.A., Emelyanov S.G., Kolchunov V.I., Bakayeva N.V., Kobeleva S.A. Modeling and analyzing of the regularities the dynamics state change of biosphere compatible urban areas. *Housing Construction*. 2015; 3:3-9 (rus.).
35. Ilyichev V., Emelyanov S., Kolchunov V., Bakaeva N. About the dynamic model formation of the urban livelihood system compatible with the biosphere. *Applied Mechanics and Materials*. 2015; 725-726:1224-1230.
36. Sukhinina E.A. Using secondary raw materials in construction of buildings with account taken 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.).
37. Suzdaleva A.L. Modern pattern of urbanization and need for a complex solution to the environmental security problems, life safety and labor protection. *Ecology of Urbanized Areas*. 2014; 2:12-16. (rus.).
38. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. System of assessment of ecological safety of construction processes in the megalopolis: problem and solution. *Ecology of Urbanized Areas*. 2013; 1:13-17. (rus.).
39. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. "Green" Standardization of the future is the factor of environmental safety of the environment of lifetime. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 8:90-97. (rus.).
40. Ye Q., Anwar M.A., Zhou R., Asmi F., Ahmad I. China's green future and household solid waste: Challenges and prospects. *Waste Management*. 2020; 105:328-338. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.02.025
41. Volkodava M.V., Fedina Y.T. Problem of municipal solid waste. Short history of the problem. *Ecology of Urbanized Areas*. 2014; 1:34-37. (rus.).
42. Zviagintseva A.V., Shvetsova A.A. Cluster analysis of Russian Regions according to indicators of housing and communal services. *Housing Construction*. 2018; 8:40-43. (rus.).
43. Sergienko L.I., Morozova N.V. The biological recultivation of lands on polygons of rubbish. *Ecology of Urbanized Areas*. 2014; 1:49-53. (rus.).
44. Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S.M. Solid waste issue: sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2018; 27(4):1275-1290. DOI: 10.1016/j.ejpe.2018.07.003
45. Lamboglia R., Fiorentino R., Mancini D., Garzella S. From a garbage crisis to sustainability strategies: the case study of Naples' waste collection firm. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 186:726-735. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.151
46. Mwanza B.G., Mbohwa C., Telukdarie A. The influence of waste collection systems on resource recovery: a review. *Procedia Manufacturing*. 2018; 21:846-853. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.192
47. Rossit D.G., Toutouh J., Nesmachnow S. Exact and heuristic approaches for multi-objective garbage accumulation points location in real scenarios. *Waste Management*. 2020; 105:467-481. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.02.016

48. Torres-Pereda P., Parra-Tapia E., Rodríguez M.A., Félix-Arellano E., Riojas-Rodríguez H. Impact of an intervention for reducing waste through educational strategy: A Mexican case study, what works, and why? *Waste Management*. 2020; 114:183-195. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.06.027
49. Calabrò Paolo S., Komilis D. A standardized inspection methodology to evaluate municipal solid waste collection performance. *Waste Management*. 2019; 246:184-191. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.142
50. Liu L., Liao W. Optimization and profit distribution in a two-echelon collaborative waste collection routing problem from economic and environmental perspective. *Waste Management*. 2021; 120:400-414. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.09.045
51. Tong Y.D., Huynh T.D.X., Khong T.D. Understanding the role of informal sector for sustainable development of municipal solid waste management system: A case study in Vietnam. *Waste Management*. 2021; 124:118-127. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.01.033
52. Vu H.L., Bolingbroke D., Ng K.T.W., Fallah B. Assessment of waste characteristics and their impact on GIS vehicle collection route optimization using ANN waste forecasts. *Waste Management*. 2019; 88:118-130. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.037
53. Ventsyulis L.S. Economic and environmental efficiency of various methods of neutralization and disposal of waste. *Regional Ecology*. 2015; 7(42):88-92. (rus.).
54. Pichugin E.A. Methods, techniques and technologies of neutralization and disposal of hazardous persistent organic pollutants. *Ecology of Urbanized Areas*. 2016; 3:40-46. (rus.).
55. Peri G., Ferrante P., La Gennusa M., Pianello C., Rizzo G. Greening MSW management systems by saving footprint: the contribution of the waste transportation. *Journal of Environmental Management*. 2018; 219:74-83. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.04.098
56. Donchenko V.K., Khil'chenko G.V. Modern trends in the formation of markets for secondary resources. *Regional Ecology*. 2018; 4(54):88-97. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-4-88-97 (rus.).
57. Nikanorova A.A., Lebedev D.A., Nikanorov P.A., Pimenov A.N., Ventsyulis L.S. Prospects for extracting secondary material resources from the msw in the Leningrad Region. *Regional Ecology*. 2019; 2(56):72-85. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-2-72-85 (rus.).
58. Oleinik P.P., Oleinik S.P. The main problems of processing construction waste. *Housing Construction*. 2005; 5:24-26. (rus.).
59. Pakhratdinov A.A., Tkach E.V., Oreshkin D.V. Environmental and geo-environmental rationale for recycling concrete scrap as crushed stone in the production of concrete products. *Ecology of Urbanized Areas*. 2016; 3:84-88. (rus.).
60. Tshovrebov E.S. Formation of regional management strategies of secondary resource handling. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(4):450-463. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.450-463 (rus.).
61. Escario J-J., Rodriguez-Sanchez C., Casaló L.V. The influence of environmental attitudes and perceived effectiveness on recycling, reducing, and reusing packaging materials in Spain. *Waste Management*. 2020; 113:251-260. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.05.043
62. Tong X., Nikolic I., Dijkhuizen B., van den Hoven M., Minderhoud M., Wäckerlin N. et al. Behaviour change in post-consumer recycling: applying agent-based modelling in social experiment. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 187:1006-1013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.261
63. Ventsyulis L.S. Environmental-economic damages from solid municipal waste disposal in Leningrad Oblast districts adjacent to the Gulf of Finland. *Regional Ecology*. 2015; 2(37):27-32. (rus.).
64. Galitskaya I.V., Putilina V.S., Yuganova T.I. Ammonium nitrogen in the leachate of MSW landfills: formation, transformation, and long-term pollution. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2021; 1:3-13. DOI: 10.31857/S0869780921010021 (rus.).
65. Galitskaya I.V., Putilina V.S., Yuganova T.I. Duration of leaching metals from the landfill body at municipal solid waste disposal sites. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2020; 6:3-23. DOI: 10.31857/S086978092006003X (rus.).
66. Zagorskaya Yu.M., Zavizion Yu.V. Assessment decomposition degree of municipal solid waste with different disposal period according to the composition. *Ecology of Urbanized Areas*. 2016; 2:49-54. (rus.).
67. Zelentsov D.V., Tupitsyna O.V., Chertes K.L. Structural and construction design of the system and structures of the supply and distribution of air in the treatment of waste. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:1:118-125. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.118-125 (rus.).
68. Kozliakova I.V., Kozhevnikova I.A., Eremina O.N., Anisimova N.G. Methodological principles of assessing geoenvironment for allocation of municipal solid waste management facilities. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2021; 1:48-58. DOI: 10.31857/S0869780921010045 (rus.).
69. Likov I.N., Zjakun A.M., Obolenskaja E.V., Golofteeva A.S. Disposal of waste at the landfill of municipal solid wastes in Kaluga and the intensity of biogas formation. *Ecology of Urbanized Areas*. 2016; 4:44-49. (rus.).
70. Lykov I.N., Loginov A.A., Dadayants A.K. Features of using a mineral biofilter at a solid municipal

waste landfill. *Ecology of Urbanized Areas*. 2019; 4:51-56. (rus.).

71. Nikanorova A.A., Pimenov A.N., Ventsyulis L.S. Directions of perfection of waste management systems in Leningrad Region settlements. *Regional Ecology*. 2017; 4(50):77-82. (rus.).

72. Tshovrebov E.S. Resource-saving: main formation stages, theories and methods, tendencies and prospects of development in industry and construction of Russia. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):112-158. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.112-158 (rus.).

73. Tskhovrebov E.S., Velichko E.G. Theoretical Provisions of Formation of Methodology for Creation of Complex System of Construction Waste Treatment. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(1):(100):83-93. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.83-93 (rus.).

74. Pandey R.U., Surjan A., Kapshe M. Exploring linkages between sustainable consumption and prevailing green practices in reuse and recycling of household waste: Case of Bhopal city in India. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 173:49-59. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.227

75. Xiao S., Dong H., Geng Y., Brander M. An overview of China's recyclable waste recycling and recommendations for integrated solutions. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018; 134:112-120. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.02.032

76. Bancheva A.I. On Japan's experience in waste management. *Ecology of Urbanized Areas*. 2016; 2:61-69. (rus.).

77. Ventsyulis L.S., Bystrova N.Yu. Environmental efficiency of solid municipal waste management systems in Sweden. *Regional Ecology*. 2019; 2(56):86-92. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-2-86-92 (rus.).

78. Ventsyulis L.S., Pimenov A.N., Nikanorova A.A. Economic efficiency of the municipal solid waste management system in Germany. *Regional Ecology*. 2019; 3(57):115-122. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-3-115-122 (rus.).

79. Vysokinskaya R.V., Krinochkina O.K. MSW management in developed and developing countries. *Geokologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2020; 1:93-96. DOI: 10.31857/S0869780920010214 (rus.).

80. Zaikanova I.N. Legal approach to management and ensuring safe disposal of municipal waste in EU countries. *Geokologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2021; 1:59-68. DOI: 10.31857/S0869780921010094 (rus.).

81. Ali M., Geng Y., Robins D., Cooper D., Roberts W., Vogtländer J. Improvement of waste management practices in a fast expanding sub-megacity in Pakistan, on the basis of qualitative and quantitative indicators. *Waste Management*. 2019; 85:253-263. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.12.030

82. Andersson C., Stage J. Direct and indirect effects of waste management policies on household waste behaviour: the case of Sweden. *Waste Management*. 2018; 76:19-27. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.03.038

83. Azevedo B.D., Scavarda L.F., Caia-do R.G.G., Fuss M. Improving urban household solid waste management in developing countries based on the German experience. *Waste Management*. 2021; 120:772-783.

84. Duygan M., Stauffacher M., Meylan G. Discourse coalitions in Swiss waste management: gridlock or winds of change? *Waste Management*. 2018; 72:25-44. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.11.006

85. Skorik Yu.I., Ventsyulis L.S., Bystrova N.Yu. Problems of solid municipal waste disposal in the Leningrad region. *Regional Ecology*. 2013; 1-2(34):138-142. (rus.).

86. Ershova S.A., Shishelova S.A., Orlovskaya T.N. Efficiency assessment of urban planning transformations: economic and legal aspects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(9):1308-1320. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1308-1320 (rus.).

87. Kostrikin P.N. Model of synchronization of integrated development of multifunctional urban environment. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13:3(114):339-348. (rus.).

88. Liubarskaia M.A., Chekalin V.S., Bachurinskaya I.A. Environmental footprint and its influence in the context of urban economy management. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(10):1461-1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1461-1472 (rus.).

89. Finogenov A.I. Architectural-Planning Organization Problems of Municipal Objects for Industrial-Communal Purposes. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 8:30-40. (rus.).

90. Pugachev E.A., Pyishnenko E.V. Ecological issues of urban areas. *Ecology of Urbanized Areas*. 2016; 1:29-34. (rus.).

91. Riabov Y.V. Forecasting the places of occurrence of unauthorized dumps in order to monitor disturbed lands. *Regional Ecology*. 2012; 1-2(33):63-80. (rus.).

92. Savoskina R.R., Bakhonina E.I. The problem of municipal landfills in the Republic of Bashkortostan. *Ecology of Urbanized Areas*. 2014; 4:71-74. (rus.).

93. Pimenov A.N., Riabov Y.V. Socio-economic assessment criteria for the waste management systems in the cross-border sub-regions of the Gulf of Finland catchment area. *Regional Ecology*. 2017; 4(50):101-107. (rus.).

94. Fomenko G.A., Fomenko M.A., Arabova E.A., Ladygina O.V. The improvement of statistical accounting system for solid municipal waste indicators. *Ecology of Urbanized Areas*. 2016; 1:43-49. (rus.).

95. Okonta F.N., Mohlalifi M. Assessment of factors affecting source recycling among metropolitan Johannesburg residents. *Waste Management*. 2020; 105:445-449. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.02.006
96. Ek C., Miliute-Plepiene J. Behavioral spillovers from food-waste collection in Swedish municipalities. *Journal of Environmental Economics and Management*. 2018; 89:168-186. DOI: 10.1016/j.jeem.2018.01.004
97. Gilli M., Nicolli F., Farinelli P. Behavioural attitudes towards waste prevention and recycling. *Ecological Economics*. 2018; 154:294-305. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.08.009
98. Aleksashina V.V., Kartasheva K.K. Solid waste problems in a megalopolis (exemplified by Moscow). *Ecology of Urbanized Areas*. 2014; 4:59-67. (rus.).
99. Vakhitov Yu.F., Shamsutdinova L.R., Zvereva T.I., Akbalina Z.F., Belan L.N. The study of changes in the composition of the household waste in the megalopolis of UFA. *Ecology of Urbanized Areas*. 2014; 1:44-48. (rus.).
100. Ventsyulis L.S., Pimenov A.N., Nikanorova A.A. Directions for improving the management systems for solid municipal waste in St. Petersburg. *Regional Ecology*. 2018; 2(52):95-102. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-2-95-102 (rus.).
101. Kulibaba V.V., Murashko I.I., Toropova N.M. Monitoring of the turnover of municipal solid waste in the Leningrad Region. *Regional Ecology*. 2012; 1-2:33:85-91. (rus.).
102. Gardiner R., Hajek P. Municipal waste generation, R&D intensity, and economic growth nexus — A case of EU regions. *Waste Management*. 2020; 114:124-135. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.06.038
103. Meng X., Wen Z., Qian Y. Multi-agent based simulation for household solid waste recycling behavior. *Resources, Conservation and Recycling*. 2016; 128:535-545. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.09.033
104. Ng S.L. An assessment of multi-family dwelling recycling in Hong Kong: A managerial perspective. *Waste Management*. 2019; 89:294-302. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.04.014
105. Marques P., Manfroï D., Deitos E., Cegoni J., Castilhos R., Rochol J. et al. An IoT-based smart cities infrastructure architecture applied to a waste management scenario. *Ad Hoc Networks*. 2019; 87:200-208. DOI: 10.1016/j.adhoc.2018.12.009
106. Sarc R., Curtis A., Kandlbauer L., Khodier K., Lorber K.E., Pomberger R. Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management — A review. *Waste Management*. 2019; 45:476-492. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.035
107. Cubillos M., Wulff Jesper N., Wohlk S. A multilevel Bayesian framework for predicting municipal waste generation rates. *Waste Management*. 2021; 127:90-100. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.04.011
108. Esmaeilian B., Wang B., Lewis K., Duarte F., Ratti C., Behdad S. The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper. *Waste Management*. 2018; 81:177-195. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.09.047
109. Gaeta G.L., Ghinoi S., Silvestri F., Tassinari M. Innovation in the solid waste management industry: Integrating neoclassical and complexity theory perspectives. *Waste Management*. 2021; 120:50-58. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.11.009
110. Abdallah M., Talib M.A., Feroz S., Nasir Q., Abdalla H., Mahfood B. Artificial intelligence applications in solid waste management: A systematic research review. *Waste Management*. 2020; 109:231-246. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.04.057
111. Xu A., Chang H., Xu Y., Li R., Li X., Zhao Y. Applying artificial neural networks (ANNs) to solve solid waste-related issues: A critical review. *Waste Management*. 2021; 124:385-402. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.02.029

Received May 17, 2021.

Adopted in revised form on June 12, 2021.

Approved for publication on June 21, 2021.

BIONOTES: **Olga N. D'yachkova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Technology; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 7630-8646; dyachkova_on@mail.ru.

Разработка технико-экономических алгоритмов расчета для калькуляторов инженерных систем

А.А. Мелехин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность темы обусловлена развитием цифровых технологий в науке и технике, в том числе при разработке и реконструкции инженерных систем зданий и сооружений. В настоящее время разработано много нормативной документации: сводов правил, ГОСТов и др. Она постоянно обновляется. Проблемой является недостаточная адаптация нормативной документации в программных комплексах.

Материалы и методы. Для решения этого вопроса, а также технико-экономического обоснования подбора ограждающих конструкций и расчета тепловой нагрузки на здание разработан инженерный калькулятор. Автором созданы алгоритмы расчета для инженерного калькулятора на основе нормативной документации по тепловой защите зданий и методике определения теплового потока по укрупненным параметрам объекта, методике экономического обоснования применения.

Результаты. Проведено сравнение полученных результатов расчетов в инженерном калькуляторе на основе алгоритма расчета теплового потока по укрупненным параметрам объекта с результатами по данным проектов зданий. В качестве решения прикладной задачи в инженерном калькуляторе произведен расчет технико-экономического обоснования применения ограждающих конструкций на примере одного из зданий.

Выводы. В процессе исследования поставлены и решены следующие задачи: рассчитаны новые коэффициенты a , n на базе методики расчета удельного теплового потока по укрупненным параметрам объекта; разработаны алгоритмы для создания инженерных калькуляторов на базе DHTML программирования, в том числе алгоритм расчета теплового потока по укрупненным параметрам объекта и алгоритм технико-экономического обоснования применения тех или иных ограждающих конструкций; разработано web-приложение для расчета теплового потока по укрупненным параметрам объекта и технико-экономического обоснования применения тех или иных ограждающих конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инженерный калькулятор, отопление, тепловой поток, укрупненный расчет, программирование, строительная теплофизика, ограждающие конструкции, тепловая защита зданий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мелехин А.А. Разработка технико-экономических алгоритмов расчета для калькуляторов инженерных систем // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 859–875. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.859-875

Development of technical and economic analysis algorithms for calculators of engineering systems

Andrey A. Melekhin

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

ABSTRACT

Introduction. The problem relevance is explained by the advancement of digital technologies in science and engineering, including the design and reconstruction of engineering systems of buildings and structures. Numerous regulatory documents have been developed so far, including codes of rules, All-Russian State Standards (GOSTs) and other regulatory instruments. This scope of documents is regularly updated. The problem is the insufficient adaptation of this regulatory documentation in software packages.

Materials and methods. To solve this problem and to complete a feasibility study backing the choice of envelopes and the analysis of thermal loads on buildings, an engineering calculator has been developed. The author has designed calculation algorithms for an engineering calculator based on (1) the regulatory documentation, applicable to the thermal protection of buildings, and (2) the heat flow analysis methodology based on the aggregate parameters of a construction facility, and (3) the economic justification of the methodology application.

Results. The results obtained using the engineering calculator and based on the heat flow analysis algorithm that employs aggregate parameters are compared with the results extracted from the building designs. To solve the applied problem, the engineering calculator uses one sample building to analyze the feasibility of application of various types of envelopes.

Conclusions. In the course of research, the author set and solved the following tasks: the method of specific heat flow analysis, based on the aggregate parameters of a construction facility, was applied to calculate new a , n coefficients; DHTML software was applied to develop algorithms for engineering calculators, including the heat flow analysis algorithm based on the aggregate parameters and the feasibility study algorithm applied to justify the use of particular types of building enve-

lopes; a web application was developed to analyze the heat flow on the basis of the aggregate parameters and the feasibility of application of certain types of building envelopes.

KEYWORDS: engineering calculator, heating, heat flow, integrated calculation, software development, thermal physics in civil engineering, building envelopes, thermal protection of buildings

FOR CITATION: Melekhin A.A. Development of technical and economic analysis algorithms for calculators of engineering systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(7):859-875. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.859-875 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы обусловлена развитием цифровых технологий для решения инженерных задач в строительной области, инженерных системах, разработке инженерных калькуляторов [1–15]. Многие авторы занимались созданием программных комплексов для строительства, разработкой алгоритмов и цифровизацией расчетов инженерных систем и зданий [16–35]. Для решения задачи расчета тепловой нагрузки и технико-экономического обоснования применения ограждающих конструкций может быть применен инженерный калькулятор [36]. Автором разработаны алгоритмы технико-экономического расчета для инженерных калькуляторов на основе нормативной документации по СП 50.13330.2021 «Тепловая защита зданий» (изменение № 1) и МДС 41-4.2000 «Методика определения теплового потока по укрупненным параметрам объекта». Приведены примеры расчета теплового потока на здание по укрупненным параметрам объекта и расчет ограждающих конструкций общественного здания с экономическим обоснованием применения различных типов ограждающих конструкций.

Укрупненным расчетом на отопление зданий занимались некоторые авторы [37–48], например И.Г. Староверов [49] приводит формулу для расчета расхода на отопление по укрупненным измерителям. Расчет ориентировочных тепловых потерь здания определяется как произведение поправочного коэффициента, удельной тепловой характеристики, наружного отапливаемого объема и разницы температур внутреннего и наружного воздуха. Удельная тепловая характеристика рассчитывается по формуле Н.С. Ермолаева. В этой формуле учитываются периметр здания, его площадь и высота, коэффициент остекления, коэффициенты теплопередачи ограждающих конструкций.

В методических указаниях дана формула для определения теплового потока по укрупненным параметрам объекта [50]. Тепловой поток также вычисляется как произведение поправочного коэффициента, учитывающего район строительства здания, удельной отопительной характеристики здания, объема здания по наружному обмеру, разности температур внутри помещения и наружного воздуха для наиболее холодной пятидневки, повышающего коэффициента для учета потерь теплоты теплопроводами.

Проведен систематический анализ тепловых нагрузок на отопление зданий в РФ по данным типовых проектов зданий с сайта Министерства строительства РФ¹. С учетом этого рассчитаны новые коэффициенты a , n для определения удельной отопительной характеристики здания для вновь строящихся зданий. Коэффициенты вычислены методом статистического подбора среднего значения. В статистическом обзоре проанализированы данные тепловых нагрузок на отопление из проектов более 100 зданий различного назначения в климатических зонах РФ.

На рис. 1 приведено сравнение удельного теплового потока на отопление жилых зданий до 1958 г., с 1958 до 2000 гг., после 2000 г. постройки.

Графики построены по данным удельной тепловой нагрузки согласно МДС 41-4.2000, за исключением графика для зданий после 2000 г. постройки. График для зданий после 2000 г. составлен по формуле (2) с учетом эмпирических коэффициентов a , n .

Удельный тепловой поток на отопление зданий во временных интервалах колеблется в пределах до 30 %. Причем значение удельного теплового потока для зданий после 2000 г. постройки и для зданий до 1958 г. меньше на 15 %, а для зданий до 1958 г. постройки и с 1958 до 2000 гг. меньше на 15 %. Разница удельных значений теплового потока на отопление по временным интервалам объясняется внедрением глобального строительства комплекса жилых зданий в стране по типовым проектам в каждое время.

До 1958 г. строительство жилых зданий велось из кирпича, шлакоблоков (за исключением деревянных домов, в том числе с отделкой из цементной штукатурки) с увеличенной толщиной стен, что позволяло обеспечивать хорошее требуемое сопротивление теплопередачи ограждающих конструкций зданий.

В 1950–1960 гг. для обеспечения быстрого возводимого жилья для населения внедряется строительство зданий с низкими коэффициентами сопротивления теплопередачи стен и, соответственно, для компенсации комфортных температур в жилых помещениях — с увеличенным расходом теплового потока на отопление.

После 2000 г. строятся здания из многослойных ограждающих конструкций с применением новых

¹ Минстрой России. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs>

строительных материалов с пониженными коэффициентами сопротивления теплопередачи (вентилируемые фасады и др.), оконных стеклопакетов, индивидуальных тепловых пунктов, автоматизации систем отопления, что позволило снизить удельный тепловой поток на отопление.

В настоящее время методика определения тепловых потоков по укрупненным параметрам объекта повсеместно в РФ не используется, хотя в некоторых теплоснабжающих организациях она применялась и применяется для заключения договоров с потребителями и расчета за тепловую энергию при отсутствии тепловых счетчиков или в период их нерабочего состояния, отсутствия проектной документации раздела отопления и вентиляции.

Проведен анализ удельного потребления тепловой энергии на отопление зданий по данным действующей нормативной документации. Согласно таблице № 14 раздела № 10 СП 50.13330.2012 (изменение № 1) удельный тепловой поток на отопление зданий для различного назначения определяется по этажности зданий или согласно таблице № 13 по площади зданий.

На рис. 2 приведена диаграмма зависимости удельного теплового потока на отопление от числа этажей здания различного назначения по таблице № 14 СП 50.13330.2012 (изменение № 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основу алгоритма расчета теплового потока на отопление зданий по укрупненным параметрам объекта принята методика расчета количества тепловой энергии по укрупненным параметрам объекта. Алгоритм расчета теплового потока на здание, реализуемый в инженерном калькуляторе, описан ниже.

Тепловой поток на отопление здания (часовой) определяется по следующей формуле:

$$Q_o = \alpha V q_o (t_v - t_n) (1 + K_n), \quad (1)$$

где α — поправочный коэффициент; V — строительный отапливаемый объем, м^3 ; q_o — удельный тепловой поток на отопление здания $\text{Вт}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$; t_v — температура воздуха в отапливаемом помещении в соответствии с ГОСТ 30494-2011; t_n — температура наружного воздуха для проектирования отопления в соответствии с СП 131.13330.2012, $^\circ\text{C}$; K_n — коэффициент инфильтрации воздуха на отопление зданий.

Удельный тепловой поток на отопление здания q_o ($\text{Вт}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$) вычисляется следующим образом:

$$q_o = \frac{a}{\sqrt[n]{V}}, \quad (2)$$

где a , n — коэффициенты (для жилых зданий $a = 1$, $n = 7$; для иных зданий $a = 1$, $n = 5$ после 2000 г. постройки) или по данным исследований [51, 52] для

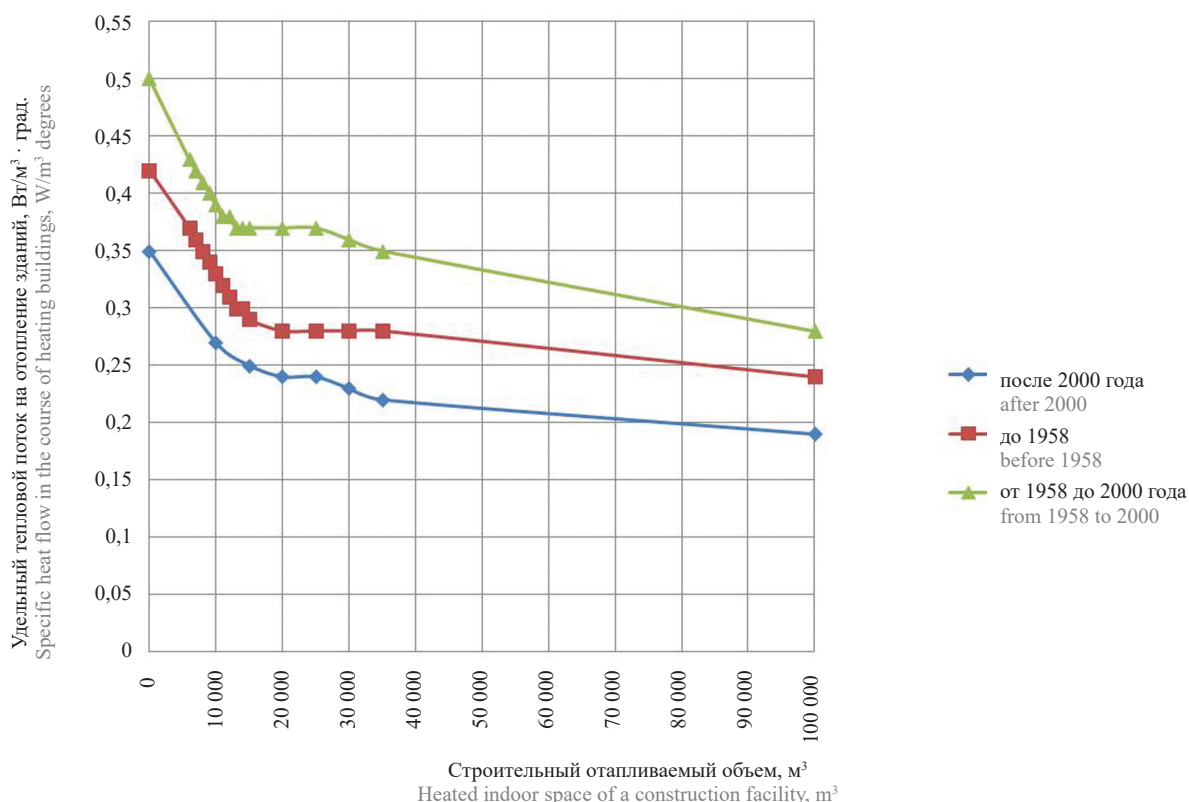


Рис. 1. Диаграмма зависимости удельного теплового потока на отопление зданий по сведениям МДС 41-4.2000 и новым данным с учетом коэффициентов a , n для зданий после 2000 г. постройки

Fig. 1. The graph describing dependence between specific heat flows arising in the course of heating buildings pursuant to MDS 41-4.2000 (Method for the determination of quantity of thermal energy and heat transfer agent in public piped hot water heat supply systems) and the new data obtained with regard for a , n coefficients for buildings constructed after 2000

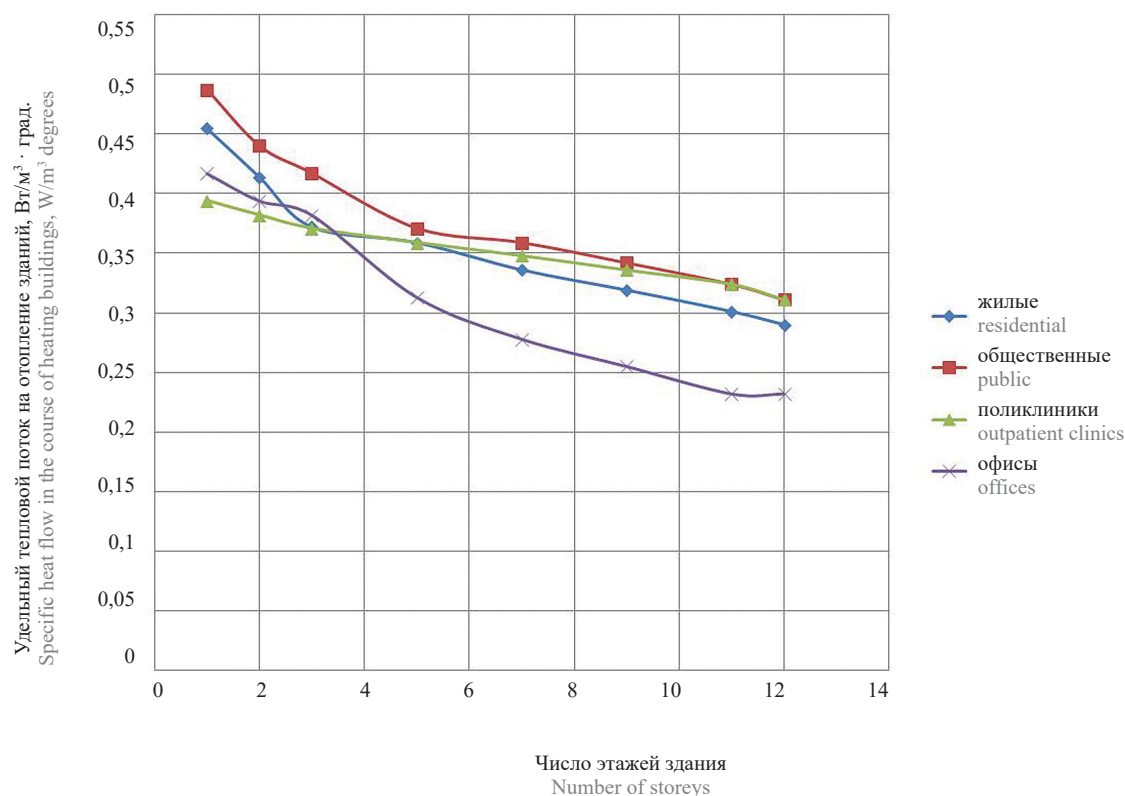


Рис. 2. Диаграмма зависимости удельного теплового потока на отопление зданий

Fig. 2. The graph describing dependences of specific heat flows arising in the course of heating a building

зданий до 2000 г. постройки; V — отапливаемый строительный объем, м³.

Коэффициент инфильтрации воздуха на отопление зданий определяется по формуле:

$$K_u = 0,01 \sqrt{2gL \left(1 - \frac{273 + t_n}{273 + t_b} \right) + \omega^2}, \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²; L — высота здания, м; ω — средняя скорость ветра в отопительный период по данным СП 131.13330.2012, м/с.

Автором разработан алгоритм расчета теплового потока по укрупненным параметрам объекта. Для создания инженерного калькулятора теплофизические характеристики переводятся в математические ($R_1, R_2, R_5, B, O, P, F, L, N, M, I, J$). В качестве реализации алгоритма расчета может быть использовано DHTML-программирование [53–62]. На рис. 3 показана реализация алгоритма расчета теплового потока на отопление жилого здания в инженерном калькуляторе с помощью DHTML-программы.

Рис. 3. Реализация алгоритма расчета теплового потока на отопление жилого здания в инженерном калькуляторе с помощью DHTML-программы

Fig. 3. The algorithm underlying the analysis of a heat flow, needed to heat a residential building and implemented in an engineering calculator developed with the help of the DHTML software

На основе выражений (1)–(3) создан алгоритм расчета теплового потока энергии на отопление жилых и других зданий. Алгоритм расчета теплового потока по укрупненным параметрам здания включает определение:

- коэффициента инфильтрации воздуха

$$R5 = 0,01 \cdot ((2 \cdot 9,81 \cdot I \cdot (1 - (273 + L)/(273 + M)) + (J \cdot J)^{0,5}), \quad (4)$$

где I — высота здания, м; L — температура наружного воздуха для проектирования отопления здания, °C; M — температура воздуха в отапливаемом помещении, °C; J — средняя скорость ветра в отопительный период, м/с;

- удельного теплового потока

$$R2 = 1/(O)^{(1/F)}, \quad (5)$$

где F — коэффициент n ; O — строительный отапливаемый объем здания, м³;

- часового теплового потока

$$R1 = B \cdot O \cdot R2 \cdot (M - L) \cdot (1 + R5) / 1000, \quad (6)$$

где B — поправочный коэффициент α ; O — строительный отапливаемый объем здания, м³; $R2$ — удельный тепловой поток на отопление здания, град.; M — температура воздуха в отапливаемом помещении, град.; L — температура наружного воздуха на проектирование отопления здания, град.; $R5$ — коэффициент инфильтрации воздуха на отопление здания.

В качестве технико-экономического обоснования применения строительных ограждающих конструкций (стен, перекрытий, светопрозрачных конструкций) при строительстве и реконструкции здания автором разработан инженерный калькулятор [63–71]. Алгоритм для инженерного калькулятора создан с целью определения расчетной и нормативной удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, класса энергоэффективности здания и оценки применения различных вариантов ограждающих конструкций при строительстве и реконструкции. В качестве экономического обоснования использования видов ограждающих конструкций применен дисконтированный срок окупаемости инвестиций [72–74].

В процессе расчета в инженерном калькуляторе можно варьировать тип фасада, кровли, подвального перекрытия, светопрозрачных конструкций. Тем самым оценивать рентабельность вариантов ограждающих конструкций. Алгоритм создан с учетом нормативной документации по тепловой защите зданий [75–80]. Для разработки инженерного калькулятора алгоритм разбит на блоки расчета:

- удельной теплозащитной характеристики здания;
- удельной вентиляционной характеристики здания;
- удельной характеристики бытовых тепловыделений здания;
- удельной характеристики теплоступлений в здание от солнечной радиации;

- удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания;

• определение класса энергосбережения здания. Далее приведены формулы для создания алгоритма технико-экономической оценки применения ограждающих конструкций здания.

Удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию жилых и общественных зданий:

$$q_{от}^p = k_{об} + k_{вент} - \beta_{пол} (k_{быт} + k_{рад}), \quad (7)$$

Для определения класса энергосбережения жилых и общественных зданий приведены технические характеристики и аналитические зависимости с целью создания алгоритма расчета класса энергосбережения жилых и общественных зданий:

$$q = \frac{q_{от}^p - q_{от}}{q_{от}^p} 100. \quad (8)$$

В качестве показателя технико-экономической эффективности капитальных затрат на те или иные ограждающие конструкции можно применять срок окупаемости. Определяются расчетные показатели модели в следующей последовательности. Коэффициент аннуитета A (рассчитывается при необходимости, если для дополнительного утепления используются заемные средства):

$$A = \frac{p_{кр} (1 + p_{кр})^m}{(1 + p_{кр})^m - 1}, \quad (9)$$

где $p_{кр}$ — месячная процентная ставка банка по кредиту, выраженная в сотых долях в расчете на периодичность платежей, %; m — число периодов погашения кредита, месяцев.

Капитальные затраты с учетом стоимости обслуживания кредита $\Delta \hat{K}$, руб. (рассчитываются при необходимости, если используются заемные средства):

$$\Delta \hat{K} = m A \Delta K, \quad (10)$$

где m — число периодов погашения кредита, месяцев; A — коэффициент аннуитета; ΔK — капитальные затраты (инвестиции без учета платежей по кредиту).

Градусо-сутки отопительного периода, °C·сут:

$$\text{ГСОП} = (t_{в} - t_{от}) z_{от}, \quad (11)$$

где $t_{в}$ — температура внутреннего воздуха, °C; $t_{от}$ — средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °C; $z_{от}$ — продолжительность отопительного периода, сут.

Величина снижения эксплуатационных затрат на отопление $\Delta \mathcal{E}$, руб./год, достигаемая за счет дополнительного утепления ограждающей конструкции:

$$\Delta \mathcal{E} = \left(\frac{1}{R_{ок}^н} - \frac{1}{R_{ок}^{прив}} \right) \frac{0,024 \text{ ГСОП } A_{ок} c_t}{1163}, \quad (12)$$

где $R_{ок}^н$ — номинальное значение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции,

$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; $R_{\text{ок}}^{\text{прив}}$ — приведенное значение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; ГСОП — градусо-сутки отопительного периода, $^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$; $A_{\text{ок}}$ — площадь ограждающей конструкции, м^2 ; $c_{\text{т}}$ — стоимость тепловой энергии, руб./Гкал.

Дисконтированный срок окупаемости инвестиций, направленных на дополнительное утепление ограждающей конструкции (при использовании заемных средств):

$$T = \Delta \hat{K} / \left(\frac{\Delta \Theta}{(1 + d_i)^m} \right), \quad (13)$$

$$1 + d_i = (1 + (r/100)) / (1 + (i/100)), \quad (14)$$

где d_i — коэффициент дисконтирования; r — ставка рефинансирования по данным ЦБ РФ, %; i — темп инфляции, %; m — число периодов (лет).

Для создания инженерного калькулятора технические и экономические характеристики переводятся в математические. В качестве реализации алгоритма расчета может быть использовано DHTML-программирование. На основе формул (7)–(14) разработан алгоритм оценки применения ограждающих конструкций жилых и общественных зданий.

При расчете в инженерном калькуляторе выбираются следующие исходные данные:

- 1) приведенное сопротивление теплопередаче стены, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (при необходимости возможно добавление в справочник нового типа ограждающих конструкций);
- 2) приведенное сопротивление теплопередаче чердачного перекрытия, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (при необходимости возможно добавление в справочник нового типа ограждающих конструкций);
- 3) приведенное сопротивление теплопередаче подвального перекрытия, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (при необходимости возможно добавление в справочник нового типа ограждающих конструкций);
- 4) приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (при необходимости возможно добавление в справочник нового типа ограждающих конструкций);
- 5) площади соответствующих стен, чердачного и подвального перекрытия, светопрозрачных конструкций (AQ, AR, AS, AT);
- 6) отопляемый объем здания (H);
- 7) коэффициенты, учитывающие отличие внутренней или наружной температуры у конструкции от принятых в расчете ГСОП (AU, AX, AY, AZ).

При определении удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания выбираются исходные данные для расчета:

- 1) коэффициента эффективности регулирования подачи теплоты в системах отопления (DE):
 - с местными терморегуляторами и фасадным авторегулированием на вводе — 0,95;

- с местными терморегуляторами и центральным авторегулированием на вводе — 0,9;

- без местных терморегуляторов и с фасадным авторегулированием — 0,85;

- с местными терморегуляторами и без авторегулирования на вводе — 0,8;

- без местных терморегуляторов и с центральным авторегулированием на вводе — 0,7;

- без местных терморегуляторов и без авторегулирования на вводе — 0,6;

- 2) коэффициента для расчета количества приточного воздуха жилых зданий (AE):

- с расчетной заселенностью квартир менее 20 м^3 — 3;

- в других жилых зданиях — 1;

- 3) интервала этажности здания (AB):

- общественное здание до трех этажей (включительно) — 0,1;

- общественное здание от трех до девяти включительно этажей — 0,15;

- общественное здание более девяти этажей — 0,2;

- жилое здание — 0;

- 4) средней температуры наружного воздуха отопительного периода;

- 5) расчетного количества жителей в здании;

- 6) площади жилых помещений (по данным чертежей или паспортов БТИ);

- 7) площади общественных и административных зданий (определяемой, как сумма площадей всех помещений, за исключением коридоров, тамбуров, переходов, лестничных клеток, лифтовых шахт, внутренних открытых лестниц и пандусов, а также помещений, предназначенных для размещения инженерного оборудования и сетей);

- 8) средней высоты этажа от пола до потолка;

- 9) числа часов работы механической вентиляции в течение недели;

- 10) числа часов учета инфильтрации в течение недели;

- 11) отопляемого объема здания;

- 12) коэффициента снижения объема воздуха в здании.

Общий алгоритм технико-экономического обоснования применения тех или иных ограждающих конструкций включает определение:

- 1) расчетной удельной характеристики расхода тепловой энергии

$$R21 = R17 + R11 - R23 (R19 + R2), \quad (15)$$

где $R21$ — расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $R17$ — удельная теплозащитная характеристика здания, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $R11$ — удельная вентиляционная характеристика здания, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $R2$ — удельная характеристика внутренних теплопоступлений здания, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $R19$ — удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной радиации, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$.

2) удельной теплозащитной характеристики здания

$$R17 = (AQAU/CQ + ARAX/CR + ASAY/CS + ATAZ/CD)/H; \quad (16)$$

3) удельной вентиляционной характеристики здания

$$R11 = (0,28 \cdot AC \cdot R12 \cdot R8 \cdot AD(1 - Q) + R9AH)/168/H; \quad (17)$$

4) удельной характеристики внутренних теплопоступлений здания

$$R2 = (AK/R3/R4)/H(G - D); \quad (18)$$

5) удельной характеристики теплопоступлений в здание от солнечной радиации:

$$R19 = 11,6R20/(R1H); \quad (19)$$

6) отклонения расчетной удельной отопительной характеристики здания от нормативной рассчитываем по следующей формуле, %:

$$R28 = (R21 - BG)/BG100, \quad (20)$$

где $R28$ — отклонение расчетной удельной отопительной характеристики здания от нормативной, %; $R21$ — расчетная удельная отопительная характеристика, Вт/(м³·°C); BG — нормируемая удельная отопительная характеристика Вт/(м³·°C);

7) класса энергоэффективности здания;

8) капитальных затрат, руб.

$$R32 = BNAQ + BQAR + BPAS + BOAT; \quad (21)$$

9) месячной процентной ставки по кредиту, %

$$R41 = CT/100 \cdot 12; \quad (22)$$

10) коэффициента аннуитета

$$R40 = R41(1+R41)CU + (1 + R41)CU - 1; \quad (23)$$

11) капитальных затрат с учетом кредитных средств, руб.

$$R42 = R32R40CU; \quad (24)$$

12) эксплуатационных затрат по каждому виду ограждающей конструкции

$$R44 = 1/((R1DD + CZ)0,8) - (1/CR); \quad (25)$$

$$R45 = 1/((R1BY + DA)0,63) - (1/CQ); \quad (26)$$

$$R46 = 1/((R1DC + CY)0,8) - (1/CS); \quad (27)$$

$$R47 = (1/CX - 1/CD); \quad (28)$$

13) суммарных эксплуатационных затрат, руб.

$$R33 = (R44AR + R45AQ + R46AS + R47AT) \cdot (0,024 \cdot R1CC/1163); \quad (29)$$

14) срока окупаемости, лет:

$$R34 = R32/R33; \quad (30)$$

15) дисконтированного срока окупаемости, лет:

$$R43 = R42/(1/(1 + CV)^{(CU/12)R33}). \quad (31)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 4 приведен пример расчета теплового потока в инженерном калькуляторе. Вот реальный проект жилого дома. Строительный отапливаемый объем 48 545 м³. Температура для проектирования

системы отопления –25 °С. Скорость ветра 2 м/с. Высота здания 43 м. Температура воздуха в жилых помещениях принята 20 °С. Согласно проекту тепловые потери с ограждающих конструкций рассчитаны по СП 50.13330.2012. На отопление данного дома в холодный период по проекту требуется 602 кВт. Расход на отопление при расчете в инженерном калькуляторе: 554,9 Вт. Разница между расчетом по СП 50.13330.2012 (изменение № 1) и в инженерном калькуляторе не более 10 %.

Проведено сравнение расчетов тепловых потоков на отопление по данным проектов зданий и в инженерном калькуляторе. В таблице приведена информация для расчета в инженерном калькуляторе проектов жилых и общественных зданий в РФ. Отапливаемый объем зданий колеблется от 546 до 23 030 м³. Температура наружного воздуха при проектировании системы отопления — от –15 до –41 градуса. Скорость ветра — от 2 до 4,5 м/с. Высота здания — от 6 до 43 м. Температура воздуха в помещениях зданий — от 12 до 20 градусов. Коэффициент для температуры наружного воздуха — от 0,89 до 1,15. Коэффициент n — от 5 до 7.

На рис. 5 показаны тренды расхода теплового потока на отопление зданий по проекту и при расчете в инженерном калькуляторе. Теплопо-

поправочный коэффициент альфа
1.08

отапливаемый строительный объем здания, куб.м.
48545

коэффициент n
4

температура наружного воздуха для проектирования системы отопления, град.
-25

коэффициент
0

температура воздуха в помещении, град.
20

высота здания, м.
36

скорость ветра в отопительный период, м/с
3

Кoeffициент инфильтрации воздуха
0.11

Удельный тепловой поток, Вт/куб.м*град.
0.21

Часовой тепловой поток, кВт
549.9

Рис. 4. Пример расчета теплового потока в инженерном калькуляторе

Fig. 4. Sample heat flow analysis performed by the engineering calculator

Принятые параметры для строительных расчетов в инженерном калькуляторе

Parameters used by the engineering calculator to perform structural analysis

Но- мер No.	Название проекта Project name	Строительный отапливаемый объем, м³ Heated indoor space of a con- struction facil- ity, m3	Скорость ветра в отоп- ительный период, м/с Wind veloc- ity during the heating season, m/s	<i>a/a</i>	<i>n/n</i>	Высота здания, м Building height, m	Темпе- ратура помеще- ний, °C Indoor tempera- ture, °C	Наружная температура воздуха, °C Outdoor air temperature, °C
1	3-этажный 36-квартирный жилой дом в Астраханской области 3-storeyed residential building (36 flats) in the Astrakhan Region	8593	3,8	1,15	7	13	20	-21
2	12-этажное жилое здание в Новосибирской области 12-storeyed residential building in the Novosibirsk Region	2899	3,6	1,08	7	9	20	-25
3	72-квартирное жилое здание в г. Симферополь Residential building in Simferopol (72 flats)	16 867	4,5	1,29	7	31	20	-15
4	Жилой дом в г. Саратов Residential building in Saratov	546	3,3	1,08	7	9	20	-25
5	Административное здание в Челябинской области Office building in the Chelyabinsk Region	2263	2,3	0,98	7	12	20	-32
6	Дом культуры в Красноярском крае Community centre in the Krasnoyarsk Krai	12 825	2,5	0,89	5	14,5	18	-41
7	12-этажное здание в Московской области 12-storey building in the Moscow Region	48 545	2	1,08	7	43	20	-25
8	Здание промышленного назначения в Пермском крае Industrial building in the Perm Krai	2654	3	0,95	5	6	12	-35
9	Детский сад на 280 мест в г. Нижний Новгород Kindergarten (280 children) in Nizhny Novgorod	23 030	4,4	0,97	5	8,2	20	-33

требление по проекту колеблется от 24 до 615 кВт. Потребление тепла при расчете в инженерном калькуляторе составило от 25,8 до 563,4 кВт. Разница между проектными данными и расчетами в инже-

нерном калькуляторе — от 6,2 до 30,1 %. Расчет теплового потока в инженерном калькуляторе может быть использован для предварительной оценки и выбора системы отопления.

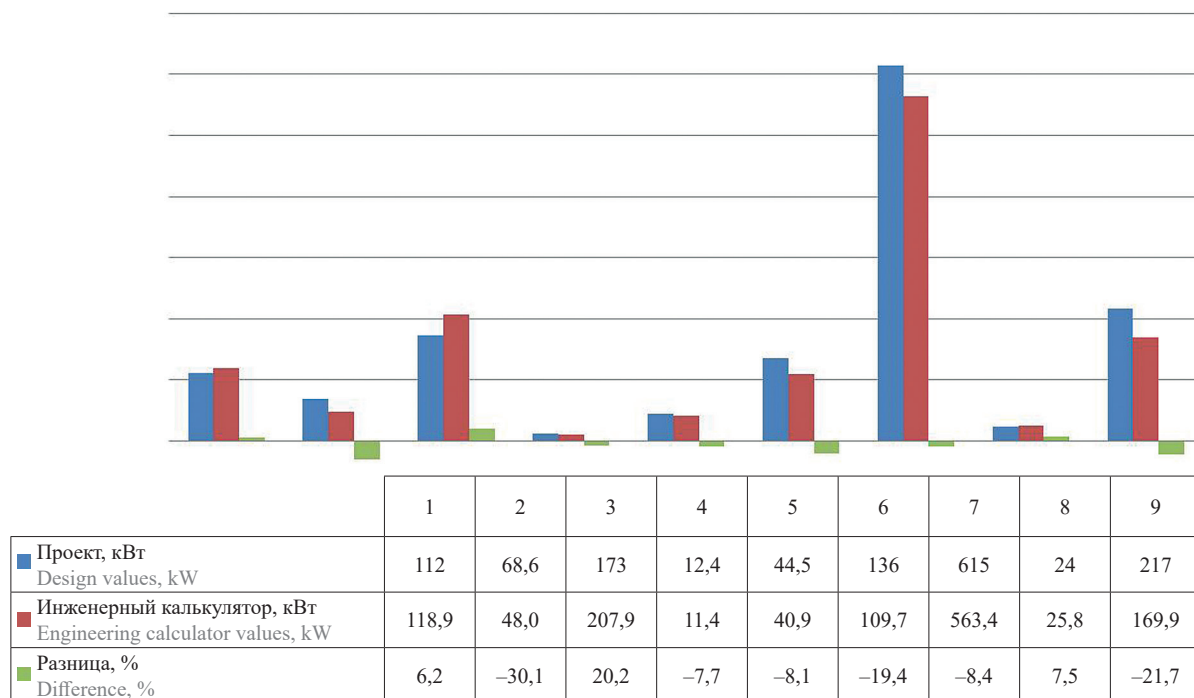


Рис. 5. Тренды теплового потока для отопления зданий

Fig. 5. Trends of heat flows used to heat buildings

Расчет нормируемой удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания

нормируемая (базовая) удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий (жилые многоквартирные, гостиницы, общежития), Вт/(м²·°C)

образоват. учреждения 2 эт.

отклонение расчетного значения от нормативного удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания
-36.66 %

Обозначение класса	Наименование класса	Величина отклонения расчетного (фактического) значения удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания от нормируемого, %	Рекомендуемые мероприятия, разрабатываемые субъектами РФ
А++	Очень высокий	Ниже -60	Экономическое стимулирование
А+		От -50 до -60 включительно	
А		От -40 до -50 включительно	
В+	Высокий	От -30 до -40 включительно	Экономическое стимулирование
В		От -15 до -30 включительно	
С+	Нормальный	От -5 до -15 включительно	Мероприятия не разрабатываются
С		От +5 до -5 включительно	
С-		От +15 до +5 включительно	
Д	Пониженный	От +15,1 до +50 включительно	Реконструкция (реставрация) при соответствующем экономическом обосновании
Е	Низкий	Более +50	Реконструкция (реставрация) при соответствующем экономическом обосновании или снос

стоимость 1 Гкал тепловой энергии (тариф), руб.
3000

годовая процентная ставка банка по кредиту, %
10

число периодов погашения кредита, месяцев
60

коэффициент дисконтирования
0.05

капитальные затраты
8 500 000 руб.

общее снижение эксплуатационных затрат, руб.
349 524.34 руб.

Срок окупаемости, лет
29.2 лет

Коэффициент аннуитета А
0.02

месячная процентная ставка по кредиту
0.008

Капитальные затраты с учетом стоимости обслуживания кредита
10 200 000 руб.

Дисконтированный срок окупаемости
37.25

Рис. 6. Фрагмент результатов технико-экономического расчета в инженерном калькуляторе

Fig. 6. An extract from the feasibility study performed by the engineering calculator

В качестве примера в инженерном калькуляторе произведен технико-экономический расчет обоснования реконструкции здания детского сада на 280 мест в Нижнем Новгороде (рис. 6).

Для расчета в инженерном калькуляторе приняты следующие параметры ограждающих конструкций:

1) до реконструкции для трехслойной стены по монолитному железобетону приведенное сопротивление теплопередаче стен $R = 3,42 \text{ Вт/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$, для эксплуатируемой кровли $R = 5,55 \text{ Вт/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$, для перекрытия над подвалом $R = 4,0 \text{ Вт/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$, для светопрозрачных конструкций (двухкамерный стеклопакет из обычного стекла) $R = 0,54 \text{ Вт/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$;

2) площадь ограждающих конструкций (стен) — 2200 м^2 ; кровли — 3250 м^2 ; подвального перекрытия — 3250 м^2 ; светопрозрачных конструкций — 400 м^2 ;

3) коэффициент, учитывающий отличие внутренней или наружной температуры у конструкции от принятых в расчете ГСОП (стен, кровли, подвального перекрытия, светопрозрачных конструкций) — 1;

4) строительный отапливаемый объем — $16\,610 \text{ м}^3$;

5) средняя температура наружного воздуха для отопительного периода принята $-4,1 \text{ }^\circ\text{C}$;

6) количество суток отопительного периода для данной местности — 215 суток;

7) температура внутреннего воздуха для детского сада принята $+20 \text{ }^\circ\text{C}$;

8) средняя высота этажа от пола до потолка — 3 м;

9) рекуператор в системе вентиляции отсутствует, поэтому принят 0;

10) коэффициент снижения объема воздуха в здании по рекомендациям тепловой защиты — 0,85;

11) для определения расхода инфильтрующего воздуха коэффициент для этажей до трех — 0,1;

12) число часов работы механической вентиляции в течение недели — 168 ч;

13) число часов учета инфильтрации воздуха в течение недели — 168 ч;

14) удельная теплоемкость воздуха — $1 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$;

15) коэффициент для расчета количества приточного воздуха жилых зданий — 1;

16) воздухообмен принят для восьми совмещенных санитарных узлов ($50 \text{ м}^3/\text{ч}$ для каждого) и двух кухонь с 4-конфорочными газовыми плитами ($90 \text{ м}^3/\text{ч}$ для каждой);

17) расчетная удельная теплозащитная характеристика здания после расчета в инженерном калькуляторе — $0,16 \text{ Вт/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$;

18) нормируемая удельная теплозащитная характеристика здания — $0,185 \text{ Вт/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$;

19) величина бытовых тепловыделений на 1 м^2 площади общественного здания принята по расчетному числу людей 90 Вт/чел ;

20) отапливаемый объем здания — $16\,610 \text{ м}^3$;

21) расчетное число жителей в здании — 280;

22) расчетная площадь здания — 2950 м^2 .

После расчета в инженерном калькуляторе получены следующие характеристики:

1) удельная расчетная теплозащитная характеристика меньше нормативной, следовательно, условие выполняется;

2) средняя плотность приточного воздуха за отопительный период — $1,31 \text{ кг/м}^3$;

3) количество инфильтрующего воздуха в здании — $1412 \text{ м}^3/\text{ч}$;

4) количество приточного воздуха жилых помещений — $2950 \text{ м}^3/\text{ч}$;

5) количество приточного воздуха в санузлы и кухонные помещения — $580 \text{ м}^3/\text{ч}$;

6) удельная вентиляционная характеристика — $0,17 \text{ Вт/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$;

7) удельная характеристика бытовых тепловыделений здания — $56 \text{ Вт/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$;

8) удельная характеристика тепlopоступлений в здание от солнечной радиации после расчета — $0,5 \text{ Вт/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$;

9) расчетная удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания — $0,33 \text{ Вт/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$;

10) отклонение нормативного от расчетного удельного потребления тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания после расчета в инженерном калькуляторе составило $-36,6 \%$;

11) класс энергоэффективности здания — В+.

В примере рассмотрен пример технико-экономического обоснования применения видов ограждающих конструкций. Снижение эксплуатационных затрат по видам конструкций обосновано использованием тех или иных видов ограждающих конструкций. Снижение получено за счет разницы между значениями сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций до и после реконструкции. Капитальные затраты рассчитаны с учетом реконструкции стен площадью 2200 м^2 с установкой трехслойной стены по монолитному железобетону $K = 0,29$ взамен стандартной стены $K = 0,09$, замены: кровельного покрытия площадью 2950 м^2 с установкой кровли $K = 0,18$ взамен стандартной кровли $K = 0,06$; подвального перекрытия площадью 2950 м^2 с установкой перекрытия $K = 0,25$ взамен $K = 0,2$; оконных блоков площадью 400 м^2 с установкой двухкамерного стеклопакета из обычного стекла $K = 1,85$ взамен $K = 1,48$. Стоимость 1 м^2 ограждающих конструкций (наружных стен, кровли, подвального перекрытия, светопрозрачных конструкций) принята по типу 1 по условной цене $1000 \text{ руб. за } 1 \text{ м}^2$. Процентная ставка по кредиту принята 10% годовых. Расчетная норма дисконтирования

5 %. После расчета в инженерном калькуляторе капитальные затраты на реконструкцию составили 8 500 000 руб. и с учетом кредитных средств на 60 месяцев — 10 200 000 руб. Общее снижение эксплуатационных затрат — 349 524 руб. в год. Срок окупаемости — 24,3 лет. Дисконтированный срок окупаемости с учетом кредитования и ставки дисконтирования — 37,25 лет².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Актуальность темы обусловлена развитием цифровых технологий для решения инженерных задач, в том числе в строительной области. В качестве прикладной задачи решается задача создания технико-экономических алгоритмов для расчета теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий. Данные алгоритмы реализуются в инженерном калькуляторе. В ходе проведения анализа нормативной документации по тепловой защите зданий, методики определения теплового потока по укрупненным параметрам объекта, методики технико-экономического обоснования проектов определены основные параметры и аналитические зависимости для создания алгоритмов расчета

и применения при создании инженерных калькуляторов. В качестве реализации алгоритмов используется язык программирования DHTML.

В процессе исследования автором были поставлены и решены следующие задачи:

- рассчитаны новые коэффициенты a , n на основе методики расчета удельного теплового потока по укрупненным параметрам объекта;
- разработаны алгоритмы для создания инженерных калькуляторов на базе DHTML программирования, в том числе алгоритм расчета теплового потока по укрупненным параметрам объекта и алгоритм технико-экономического обоснования применения тех или иных ограждающих конструкций;
- разработано web-приложение для расчета теплового потока по укрупненным параметрам объекта и технико-экономического обоснования применения тех или иных ограждающих конструкций;
- проведено сравнение полученных результатов расчетов в инженерном калькуляторе на основе алгоритма расчета теплового потока по укрупненным параметрам объекта с результатами по данным проектов зданий (сходимость составила от +6,2 до −30,1 %);
- в качестве решения прикладной задачи в инженерном калькуляторе произведен расчет технико-экономического обоснования применения ограждающих конструкций на примере одного из зданий.

² Примеры реализованных инженерных калькуляторов. URL: https://ntcseis.ru/raschiet_v_zulu_2_6, https://ntcseis.ru/raschiet_v_zulu_2_2

ЛИТЕРАТУРА

1. Oropeza-Perez I. Development of a cooling-load calculator for the Mexican conditions of climate, construction and occupancy // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 205. Pp. 1115–1122. Chine. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.180
2. Rondon R., Groseclose T.M., Short A.E., Wilson C.J. Transcriptional programming using engineered systems of transcription factors and genetic architectures // *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. Issue 4784. P. 13. DOI: 10.1038/s41467-019-12706-4
3. Brooks S., Roy R. An overview of self-engineering systems // *Journal of Engineering Design*. 2021. P. 51. DOI: 10.1080/09544828.2021.1914323
4. Sellgren U., Williamsson D. Architecting complex engineered systems // *International design conference — design 2020*. 2020. Pp. 2415–2424. DOI: 10.1017/dsd.2020.335
5. Muhamediyeva D.T. Approaches to solving problems of optimization of solving monitoring problems based on natural computing algorithms // *Chemical technology, control and management*. 2020. Issue 5. Special issue 5–6. Pp. 128–133. DOI: 10.34920/2020.5-6.128-133
6. Mudiea S., Vadhatib M. Low energy catering strategy: insights from a novel carbon-energy calculator // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 123. Pp. 212–219. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.244
7. Sarma U., Bazbauers G. Algorithm for calculation of district heating tariff benchmark // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 128. Pp. 445–452. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.029
8. Moon J.W., Yang Y.K., Choi E.J., Choi Y.J., Lee K., Kim Y. et al. Development of a control algorithm aiming at cost-effective operation of a VRF heating system // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 149. Pp. 1522–1531. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.044
9. Starke A.R., Cardemilb M., Colle S. Multi-objective optimization of a solar-assisted heat pump for swimming pool heating using genetic algorithm // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 142. Pp. 118–126. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.067
10. Kossiakoff A., Seymour S.J., Flanagan D.A., Biemer S.M. Software systems engineering // *Systems Engineering Principles and Practice*, 3nd. 2020. Chapter 14. Pp. 393–448. DOI: 10.1002/9781119516699.ch14

11. Cohen M.W., Aga M., Weinberg T. Genetic algorithm software system for analog circuit design // *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 36. Pp. 17–22. DOI: 10.1016/j.procir.2015.01.033
12. Wang S., Han F., Bing O. Application of in-situ stress calculation in engineering // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 660. Pp. 1–5. DOI: 10.1088/1755-1315/660/1/012040
13. Wendes H. Engineering calculation procedures and forms // *HVAC Procedures and Forms Manual*. Edition 2nd. 2020. Chapter 4. Pp. 97–104. DOI: 10.1201/9781003152040-4
14. Kuo J. Basic principles for engineering calculation // *Air Pollution Control Engineering for Environmental Engineers*. 1 ed. 2018. Chapter 4. P. 16. DOI: 10.1201/9780429185793-4
15. Jounq S., Gordon L. Automating engineering calculations. 2009.
16. Sarlan A., Ahmad W., Rashikin N.S., Ceng Z.A., Ahmad R. The integration of engineering calculations: Engiepro // *Advanced Science Letters*. 2017. Vol. 23. Issue 11. Pp. 10709–10714. DOI: 10.1166/asl.2017.10136
17. Zhu G., Shou B. Thermal-structure analysis and engineering calculation for double tubesheets of heat exchanger // *ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference*. 2015. P. 6. DOI: 10.1115/PVP2015-45385
18. Gawronska E., Dyja R., Grosser A., Winczek J. Engineering calculations for complex geometric domains // *MATEC Web Conf*. 2018. Vol. 157. P. 7. DOI: 10.1051/mateconf/201815702009
19. Cleveland C.J., Morris C. Heating, ventilation, air conditioning // *Handbook of Energy*. 2014. Vol. II. Section 38. Pp. 669–675. DOI: 10.1016/B978-0-12-417013-1.00038-8
20. Melekhin A.A. The solution of private problems of optimization for engineering systems // *HVAC System*. Chapter 6. 2018. Pp. 89–99. DOI: 10.5772/intechopen.80520
21. Мелехин А.А. Решение частных задач оптимизации для инженерных систем зданий : монография. Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2015; 85 с.
22. Bejan A. Convection heat transfer. 4th ed. New York, USA : John Wiley & Sons, 2013. 704 p. DOI: 10.1002/9781118671627
23. Liu S., Saker M. A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 19. Pp. 64–81. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.021
24. Hasan M.I., Rageb A.M.A., Yaghoubi M. Investigation of a counter flow microchannel heat exchanger performance with using nanofluid as a coolant // *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*. 2012. Vol. 2. Pp. 35–43. DOI: 10.4236/jectc.2012.23004
25. Salimpour M.R., Bahrami Z. Thermodynamic analysis and optimization of air-cooled heat exchangers // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011. Vol. 47 (1). Pp. 35–44. DOI: 10.1007/s00231-010-0672-9
26. Holopírková L. Indoor microclimate of buildings // *Conference: PhD Research Symposium*. 2018. Pp. 83–91. DOI: 10.13164/phd.fa2018.13
27. Rodler A., Lauze N., Musy M. et al. Urban microclimate and building energy simulation coupling techniques // *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*. 2021. Pp. 317–337. DOI: 10.1007/978-3-030-65421-4_15
28. Muhanad Elfadil Mohamed, Mubarak Dirar A. Allah, Asim Ahmed Mohamed Fadol, Mohammed Margani Rashed, Hassaballa M.A. Mahmoud, Lutfi Mohammed AbdAlgadir et al. Quantum heat flow model for heat flow in some nanotube // *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Sciences*. 2019. Vol. 62 (1). Pp. 84–90.
29. Sugarman S.C. Heat flow // *HVAC Fundamentals*. 2020. Chapter 2. P. 10. DOI: 10.1201/9781003151975-2
30. Łapiński T.M., Leble S. A Mathematica program for heat source function of 1D heat equation reconstruction by three types of data // *Gdansk University of Technology, Faculty of Applied Physics and Mathematics*. Poland, 2014. P. 11. DOI: arXiv:1410.7066v1
31. Романова Е.Ю., Уварова Л.А. Моделирование инженерной системы // *Conference: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271353
32. Егоров И.Н., Кретинин Г.В., Леценко И.А., Купцов С.В. Многоцелевая оптимизация с использованием технологии IOSO // *7th ASMO UK. ISSMO Conference on engineering Design optimization*. Bath. UK, 2008.
33. Бутко А.О. Реализация инженерных расчетов в среде структурно-параметрического моделирования // *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2021. № 1 (181). С. 14–19. DOI: 10.52190/2073-2597_2021_1_14
34. Кашеварова Г.Г., Мартиросян А.С. Программная реализация алгоритма статистического разброса механических свойств материалов при проектировании конструкций // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 684. Pp. 106–110.
35. Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Гаврилов А.А., Харламов Е.Б., Филимонов С.А. Разработка свободного инженерного программного комплекса для численного моделирования процессов гидродинамики, теплообмена и химических реакций // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. 2017. Т. 10. № 4. С. 105–112.
36. Мелехин А.А. Разработка инженерного калькулятора для расчета теплового потока на ото-

пление зданий // Естественные и технические науки. 2021. № 1(152). С. 161–163.

37. *Erkinjonovich A.Z., Mamadaliyevich M.M., Muxammadovich A.A., Axmadjon o'g'li S.M.* Heat calculations of water-cooling tower // International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT). 2021. Vol. 2. Issue 1. Pp. 173–176. DOI: 10.48175/IJARSCT-766

38. *Kisielewski P., Hamera J.* Heat calculations of transformer // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011. Vol. 87 (3). Pp. 320–323.

39. *Михайлишин Е.В., Толстова Ю.И.* Теплоснабжение жилых районов: учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2012. 98 с.

40. *Волков А.А.* Основы проектирования, строительства, эксплуатации зданий и сооружений : учебное пособие. М. : МГСУ, 2015. 490 с.

41. *Музалевская Г.Н.* Инженерные сети городов и населенных пунктов : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2006. 149 с.

42. *Авдюнин Е.Г., Ершов Ю.Г., Шарафутдинова Н.К.* Системы теплоснабжения промышленных предприятий : учебное пособие. Иваново, 2004. 91 с.

43. *Беляева Г.М., Браилов В.П., Воронина С.В., Деканова Н.П., Жаворонков С.П., Карасик И.Я. и др.* Исследование систем теплоснабжения. М. : Наука, 1989. 215 с.

44. *Тихомиров А.К.* Теплоснабжение района города : учебное пособие. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2006. 134 с.

45. *Артюшин А.Н.* Энергоаудит систем теплоснабжения: источник — тепловая сеть — потребитель : монография. Чебоксары : Изд-во Чувашского ун-та, 2006. 459 с.

46. *Сотникова О.А., Мелькумов В.Н.* Теплоснабжение: учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2009. 292 с.

47. *Михеев А.П.* Промышленные здания : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2013. 438 с.

48. *Куладжи Т.В.* Методология оценки эффективности конструктивных решений в строительном комплексе : монография. Архангельск : ИД САФУ, 2014. 294 с.

49. *Богословский В.Н., Крупнов Б.А., Скандави А.Н. и др.* Внутренние санитарно-технические устройства. Отопление. 4-е изд. М. : Стройиздат, 1990. 344 с.

50. *Мелехин А.А.* Практикум по расчету тепловых потоков на теплоснабжение зданий по укрупненным параметрам объекта : учебно-методическое пособие. М. : Спутник+, 2020. 49 с.

51. *Мелехин А.А.* Актуализация расчета теплового потока на отопление зданий по укрупненным параметрам объекта // Естественные и технические науки. 2021. № 1 (152). С. 164–165.

52. *Мелехин А.А.* Инженерные системы объектов реконструкции и реставрации : учебно-методи-

ческое пособие. М. : Изд-во МГСУ–МИСИ, 2020. 34 с.

53. *Солодушкин С.И., Юманова И.Ф.* Web и DHTML. Екатеринбург, 2018. 128 с.

54. *Бурданова Е.В.* Информатика и основы программирования: учебное пособие. Белгород : НИУ «БелГУ», 2019. 119 с.

55. *Берд Д.* Инженерная математика. М. : ДМК Пресс, 2017. 540 с.

56. *Лазарев А.Б., Эварт Т.Е., Прис Н.М., Глухова А.Ф.* Разработка в Visual C++ приложений с графическим интерфейсом для решения инженерных задач: учебное пособие. Нижний Новгород : Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2020. 100 с.

57. *Рылько М.А.* Компьютерные методы проектирования зданий : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2012. 224 с.

58. *Frein B.* HTML5 and CSS3: Website development for any browsers and devices. Frain, Ben Responsive Web Design with HTML5 and CSS3. Birmingham; Mumbai : Pact Publishing, 2012. 298 с.

59. *Meyer E., Weil E.* CSS: The definitive guide: Visual presentation for the Web 4th Edition. 2017.

60. *Токарева М.А.* Введение в современные информационные технологии. Лабораторный практикум. Оренбург : ОГУ, 2012. 253 с.

61. *Торопова О.А., Сытник И.Ф.* Основы web-программирования. Технологии HTML, DHTML : учебное пособие. Саратов : Изд-во СГТУ, 2012.

62. *Дакетт Д.* Основы веб-программирования с использованием HTML, XHTML и CSS. М. : Эксмо, 2010. 767 с.

63. *Teni M., Dolaček-Alduk Z.* Overview and analysis of legislation in the field of thermal protection of buildings // Conference: Common Foundations. 2017. Pp. 21–28. DOI: 10.5592/CO/ZT.2017

64. *Kalús D., Gašparik J., Janík P., Kubica M., Šťastný P.* Innovative building technology implemented into facades with active thermal protection // Sustainability. 2021. Vol. 13 (8):4438. P. 21. DOI: 10.3390/su13084438

65. *Morau D., Libelle T., Garde F.* Performance evaluation of green roof for thermal protection of buildings in Reunion Island // Energy Procedia. 2012. Vol. 14. Pp. 1008–1016. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.12.1047

66. *Ching F., Mulville M.* Moisture & thermal protection // European Building Construction Illustrated. 2014. Chapter 7. P. 472. DOI: 10.1002/9781118786178.ch7

67. *Rogale D., Majstorović G., Rogale S.F.* Comparative analysis of the thermal insulation of multi-layer thermal inserts in a protective jacket // Materials. 2020. Vol. 13 (12):2672. P. 13. DOI: 10.3390/ma13122672

68. Rogale D., Rogale S.F., Majstorović G., Čubrčić G. Thermal properties of thermal insulation chambers // *Textile Research Journal*. 2020. Vol. 91. Issue 9–10. Pp. 953–961. DOI: 10.1177/0040517520966718

69. Kubečková D., Vrbová M. Historical development of thermal protection of prefabricated residential housing and its future, an example of the Czech Republic // *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 2623. DOI: 10.3390/en14092623

70. Бодров М.В., Кузин В.У., Морозов М.С., Смыков А.А. Определение экономической выгоды использования систем лучистого отопления на основе водяных инфракрасных излучателей // *Сборник докладов VIII Всероссийской научно-технической конференции, посвящ. столетию со дня рождения МИСИ–МГСУ*. 2020. С. 14–18.

71. Стахов А.Е., Фролик В., Кадокова С.Ю., Андреев А.А. Economic and mathematical analysis of thermal protection of buildings // *Энергосбережение и энергоэффективность*. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-16-4-107-112

72. Титаренко Н.В. Экономика архитектурно-проектных и градостроительных решений : учебное пособие. Екатеринбург : УрГАХУ, 2018. 215 с.

73. Самарин О.Д. Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий. М. : Изд-во АСВ, 2011. 127 с.

74. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность : монография. М. : МГСУ: Изд-во АСВ, 2009. 292 с.

75. Малявина Е.Г., Самарин О.Д. Строительная теплофизика и микроклимат зданий : учебник. М. : Изд-во МИСИ–МГСУ, 2018. 280 с.

76. Гагарин В.Г., Малявина Е.Г., Маркевич А.С. Теплотехнический расчет наружных ограждающих конструкций и определение тепловой нагрузки на системы отопления зданий : учебное пособие. М. : МГСУ, 2012. 100 с.

77. Гагарин В.Г., Малявина Е.Г., Маркевич А.С. Теплотехнический расчет наружных ограждений и расчет теплового режима здания : учебное пособие. М. : МГСУ, 2014. 110 с.

78. Гаражий О.В. Строительная теплофизика : учебное пособие. Пермь : Изд-во Пермского государственного университета, 2009. 55 с.

79. Перехоженцев А.Г., Войтович Е.В. О качестве нормирования теплозащиты зданий // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 3 (83). С. 110–111. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-83-3-100-111

80. Толстова Ю.И., Шумилов Р.Н. Основы строительной теплофизики: учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2014. 102 с.

Поступила в редакцию 7 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 9 июня 2021 г.

Одобрена для публикации 2 июля 2021 г.

Об авторе: Андрей Александрович Мелехин — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4180-6075, Scopus: 57191952249, ORCID: 3933620853385926; melchin2006@yandex.ru.

REFERENCES

1. Oropeza-Perez I. Development of a cooling-load calculator for the Mexican conditions of climate, construction and occupancy. *Procedia Engineering*. 2017; 205:1115–1122. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.180

2. Rondon R., Groseclose T.M., Short A.E., Wilson C.J. Transcriptional programming using engineered systems of transcription factors and genetic architectures. *Nature Communications*. 2019; 10(4784):13. DOI: 10.1038/s41467-019-12706-4

3. Brooks S., Roy R. An overview of self-engineering systems. *Journal of Engineering Design*. 2021; 51. DOI: 10.1080/09544828.2021.1914323

4. Sellgren U., Williamsson D. Architecting complex engineered systems. *International design conference — design 2020*. 2020; 2415–2424. DOI: 10.1017/dsd.2020.335

5. Muhamediyeva D.T. Approaches to solving problems of optimization of solving monitoring problems based on solving problems based on natural computing algorithms. *Chemical technology, control and management*. 2020; 5(5-6):128–133. DOI: 10.34920/2020.5-6.128-133

6. Mudiea S., Vadhatib M. Low energy catering strategy: insights from a novel carbon-energy calculator. *Energy Procedia*. 2017; 123:212–219. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.244

7. Sarma U., Bazbauers G. Algorithm for calculation of district heating tariff benchmark. *Energy Procedia*. 2017; 128:445–452. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.029

8. Moon J.W., Yang Y.K., Choi E.J., Choi Y.J., Lee K., Kim Y. et al. Development of a control algo-

rithm aiming at cost-effective operation of a VRF heating system. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 149:1522-1531. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.044

9. Starke A.R., Cardemilb M., Colle S. Multi-objective optimization of a solar-assisted heat pump for swimming pool heating using genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*. 2018; 142:118-126. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.067

10. Kossiakoff A., Seymour S.J., Flanigan D.A., Biemer S.M. Software systems engineering. *Systems Engineering Principles and Practice*, 3rd. 2020; 14:393-448. DOI: 10.1002/9781119516699.ch14

11. Cohen M.W., Aga M., Weinberg T. Genetic algorithm software system for analog circuit design. *Procedia CIRP*. 2015; 36:17-22. DOI: 10.1016/j.procir.2015.01.033

12. Wang S., Han F., Bing O. Application of in-situ stress calculation in engineering. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 660:1-5. DOI: 10.1088/1755-1315/660/1/012040

13. Wendes H. Engineering calculation procedures and forms. *HVAC Procedures and Forms Manual. Edition 2nd*. 2020; 4:97-104. DOI: 10.1201/9781003152040-4

14. Kuo J. Basic principles for engineering calculation. *Air Pollution Control Engineering for Environmental Engineers. 1 ed*. 2018; 4:16. DOI: 10.1201/9780429185793-4

15. Jounq S., Gordon L. *Automating engineering calculations*. 2009.

16. Sarlan A., Ahmad W., Rashikin N.S., Ceng Z.A., Ahmad R. The integration of engineering calculations: Engiepro. *Advanced Science Letters*. 2017; 23(11):10709-10714. DOI: 10.1166/asl.2017.10136

17. Zhu G., Shou B. Thermal-structure analysis and engineering calculation for double tubesheets of heat exchanger. *ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference*. 2015; 6. DOI: 10.1115/PVP2015-45385

18. Gawronska E., Dyja R., Grosser A., Winczek J. Engineering calculations for complex geometric domains. *MATEC Web Conf*. 2018; 157:7. DOI: 10.1051/mateconf/201815702009

19. Cleveland C.J., Morris C. Heating, ventilation, air conditioning. *Handbook of Energy*. 2014; II(38):669-675. DOI: 10.1016/B978-0-12-417013-1.00038-8

20. Melekhin A.A. The solution of private problems of optimization for engineering systems. *HVAC System. Chapter 6*. 2018; 89-99. DOI: 10.5772/intechopen.80520

21. Melekhin A.A. *Solution of partial optimization problems for engineering systems of buildings*. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publishing House, 2015; 85. (rus.).

22. Bejan A. *Convection Heat Transfer*. 4th ed. New York, USA, John Wiley & Sons, 2013; 704. DOI: 10.1002/9781118671627

23. Liu S., Saker M. A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 19:64-81. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.021

24. Hasan M.I., Rageb A.M.A., Yaghoubi M. Investigation of a counter flow microchannel heat exchanger performance with using nanofluid as a coolant. *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*. 2012; 2:35-43. DOI: 10.4236/jectc.2012.23004

25. Salimpour M.R., Bahrami Z. Thermodynamic analysis and optimization of air-cooled heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. New York, Springer, 2011; 47(1):35-44. DOI: 10.1007/s00231-010-0672-9

26. Holopírková L. Indoor microclimate of buildings. *Conference: PhD Research Symposium*. 2018; 83-91. DOI: 10.13164/phd.fa2018.13

27. Rodler A., Lauze N., Musy M. et al. Urban microclimate and building energy simulation coupling techniques. *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*. 2021; 317-337. DOI: 10.1007/978-3-030-65421-4_15

28. Muhanad Elfadil Mohamed, Mubarak Dirar A. Allah, Asim Ahmed Mohamed Fadol, Mohammed Margani Rashed, Hassaballa M.A. Mahmoud, Lutfi MohammedAbdAlgadir et al. Quantum heat flow model for heat flow in some nanotube. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Sciences*. 2019; 62(1):84-90.

29. Sugarman S.C. *Heat Flow*. HVAC Fundamentals. 2020; 2:10. DOI: 10.1201/9781003151975-2

30. Łapiński T.M., Leble S.A. Mathematica program for heat source function of 1D heat equation reconstruction by three types of data. *Gdansk University of Technology, Faculty of Applied Physics and Mathematics*. Poland, 2014; 11. DOI: arXiv:1410.7066v1

31. Romanova E.Yu., Uvarova L.A. Modeling of an engineering system. *Conference: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020. DOI: 10.1109 / FarEastCon50210. 2020. 9271353 (rus.).

32. Egorov I.N., Kretinin G.V., Leshchenko I.A., Kuptsov S.V. Multi-purpose optimization using IOSO technology. *7-th ASMO UK. ISSMO Conference on engineering Design optimization*. Bath, UK, 2008. (rus.).

33. Butko A.O. Realization engineering calculations in the environment of structural-parametric modeling. *Information technologies in design and production*. 2021; 1(181):14-19. DOI: 10.52190/2073-2597_2021_1_14(rus.).

34. Kashevarova G.G., Martirosyan A.S. Software implementation of the algorithm for statistical dispersion of mechanical properties of materials in the design of structures. *Advanced Materials Research*. 2013; 684:106-110. (rus.).

35. Dekterev A.A., Litvintsev K.Yu., Gavrilov A.A., Kharlamov E.B., Filimonov S.A. Development of a free

engineering software package for numerical modeling of hydrodynamics, heat transfer and chemical reactions. *Bulletin of the South Ural State University*. 2017; 10(4):105-112. (rus.).

36. Melekhin A.A. Development of an engineering calculator for calculating the heat flow for heating buildings. *Natural and technical sciences*. 2021; 1(152):161-163. (rus.).

37. Erkinjonovich A.Z., Mamadaliyevich M.M., Muxammadovich A.A., Axmadjon o'g'li S.M. Heat calculations of water-cooling tower. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*. 2021; 2(1):173-176. DOI: 10.48175/IJARSCT-766

38. Kisiielewski P., Hamera J. Heat calculations of transformer. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011; 87(3):320-323.

39. Mikhailishin E.V., Tolstova Yu.I. *Heat supply of residential areas: training manual*. Yekaterinburg, Publishing House of the Ural University, 2012; 98. (rus.).

40. Volkov A.A. *Fundamentals of design, construction, operation of buildings and structures : training manual*. Moscow, MGSU, 2015; 490. (rus.).

41. Muzalevskaya G.N. *Engineering networks of cities and settlements: textbook*. Moscow, Publishing House of the Association of Construction Universities, 2006; 149. (rus.).

42. Avdyunin E.G., Yershov Yu.G., Sharafutdinova N.K. *Heat supply systems of industrial enterprises*. Ivanovo, 2004; 91. (rus.).

43. Belyaeva G.M., Brailov V.P., Voronina S.V., Dekanova N.P., Zhavoronkov S.P., Karasik I.Ya. et al. *Research of heat supply systems*. Moscow, Nauka, 1989; 215. (rus.).

44. Tikhomirov A.K. *Heat supply of the city district : a tutorial*. Khabarovsk, Publishing house of TOGU, 2006; 134. (rus.).

45. Artyushin A.N. *Energy audit of heat supply systems: source-heat network-consumer : monograph*. Cheboksary, Publishing House of the Chuvash University, 2006; 459. (rus.).

46. Sotnikova O.A., Melkumov V.N. *Heat supply : training manual*. Moscow, Publishing house of the Association of Construction Universities, 2009; 292. (rus.).

47. Mikheev A.P. *Industrial buildings : textbook*. Moscow, Publishing House ASV, 2013; 438. (rus.).

48. Kulaji T.V. *Methodology for evaluating the effectiveness of structural solutions in the construction complex*. Arkhangelsk, SAFU Publishing House, 2014; 294. (rus.).

49. Bogoslovsky V.N., Krupnov B.A., Skanavi A.N. et al. *Internal sanitary devices. Heating. 4th ed*. Moscow, Stroyizdat, 1990; 344. (rus.).

50. Melekhin A.A. *Practicum on the calculation of heat flows for heat supply of buildings according to*

the enlarged parameters of the object : educational and methodical manual. Moscow, Sputnik+, 2020; 49. (rus.).

51. Melekhin A.A. Updating the calculation of heat flow for heating buildings according to the enlarged parameters of the object. *Natural and Technical Sciences*. 2021; 1(152):164-165. (rus.).

52. Melekhin A.A. *Engineering systems of objects of reconstruction and restoration : educational and methodical manual*. Moscow, MGSU-MISI Publishing House, 2020; 34. (rus.).

53. Solodushkin S.I., Yumanova I.F. *Web and DHTML*. Ekaterinburg, 2018; 128. (rus.).

54. Burdanova E.V. *Informatics and programming basics : training manual*. Belgorod, NRU "BelSU", 2019; 119. (rus.).

55. Byrd D. *Engineering Mathematics*. Moscow, DMK Press: Dodeka-XXI, 2017; 540. (rus.).

56. Lazarev A.B., Evart T.E., Pris N.M., Glukhova A.F. *Development in Visual C++ of applications with a graphical interface for solving engineering problems*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 2020; 100. (rus.).

57. Rylko M.A. *Computer methods of building design : training manual*. Moscow, Publishing house ASV, 2012; 224. (rus.).

58. Frein B. *HTML5 and CSS3: Website development for any browsers and devices*. Frain, Ben Responsive Web Design with HTML5 and CSS3 Birmingham; Mumbai, Pact Publishing, 2012; 298.

59. Meyer E., Weil E. *CSS: The Definitive Guide: Visual Presentation for the Web 4th Edition*. 2017.

60. Tokareva M.A. *Introduction to modern information technologies: laboratory practice*. Orenburg, OSU, 2012; 253. (rus.).

61. Toropova O.A., Sytnik I.F. *Basics of web programming. Technologies of HTML, DHTML : training manual*. Saratov, SSTU Publishing House, 2012. (rus.).

62. Duckett D. *Basics of Web programming using HTML, XHTML, and CSS. Text*. Moscow, Eksmo, 2010. 767. (rus.).

63. Teni M., Dolaček-Alduk Z. Overview and analysis of legislation in the field of thermal protection of buildings. *Conference: Common Foundations*. 2017; 21-28. DOI: 10.5592/CO/ZT.2017

64. Kalús D., Gašparík J., Janík P., Kubica M., Šťastný P. Innovative building technology implemented into facades with active thermal protection. *Sustainability*. 2021; 13(8):4438:21. DOI: 10.3390/su13084438

65. Morau D., Libelle T., Garde F. Performance evaluation of green roof for thermal protection of buildings in Reunion Island. *Energy Procedia*. 2012; 14:1008-1016. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.12.1047

66. Ching F., Mulville M.. Moisture & thermal protection. *European Building Construction Illustrated*. 2014; 7:472. DOI: 10.1002/9781118786178.ch7

67. Rogale D., Majstorović G., Rogale S.F. Comparative analysis of the thermal insulation of multi-layer

thermal inserts in a protective jacket. *Materials*. 2020; 13(12):2672:13. DOI:10.3390/ma13122672

68. Rogale D., Rogale S.F., Majstorović G., Čubrić G. Thermal properties of thermal insulation chambers. *Textile Research Journal*. 2020; 91(9-10):953-961. DOI: 10.1177/0040517520966718

69. Kubečková D., Vrbová M. Historical development of thermal protection of prefab residential housing and its future, an example of the Czech Republic. *Energies*. 2021; 14:2623. DOI: 10.3390/en14092623

70. Bodrov M.V., Kuzin V.U., Morozov M.S., Smykov A.A. Determination of the economic benefits of using radiant heating systems based on water infrared emitters. *Collection of reports of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference dedicated to the centenary of the birth of MISIS-MGSU*. 2020; 14-18. (rus.).

71. Stakhov A.E., Frolkis V., Kadokova S.Yu., Andreenko A.A. Economic and mathematical analysis of thermal protection of buildings. *Energy saving and Energy efficiency*. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-16-4-107-112 (rus.).

72. Titarenko N.V. *Economics of architectural design and urban planning solutions : training manual*. Ekaterinburg, Urgakhu, 2018; 215. (rus.).

73. Samarin O.D. *Questions of economy in ensuring the microclimate of buildings*. Moscow, Assoc. Publishing House. builds it. Universities, 2011; 127. (rus.).

74. Samarin O.D. *Thermophysics. Energy saving. Energy efficiency : Monograph*. Moscow, MSU, Pub-

lishing house of the Association of Construction Universities, 2009; 292. (rus.).

75. Malyavina E.G., Samarin O.D. *Construction thermophysics and microclimate of buildings : textbook*. Moscow, MISI-MGSU Publishing House, 2018; 280. (rus.).

76. Gagarin V.G., Malyavina E.G., Markevich A.S. *Heat engineering calculation of external enclosing structures and determination of heat load on building heating systems : training manual*. Moscow, MGSU, 2012; 100. (rus.).

77. Gagarin V.G., Malyavina E.G., Markevich A.S. *Thermal engineering calculation of external fences and calculation of the thermal regime of the building : training manual*. Moscow, MGSU, 2014; 110. (rus.).

78. Garazhiy O.V. *Construction thermophysics : training manual*. Perm, Publishing House of the Perm State Technical University, 2009; 55. (rus.).

79. Perekhodentsev A.G., Voitovich E.V. About the quality of building heat protection rationing. *Construction and Reconstruction*. 2019; 3(83):110-111. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-83-3-100-111 (rus.).

80. Tolstova Yu.I., Shumilov R.N. *Fundamentals of building thermal physics : training manual*. Yekaterinburg, Ural University Publishing House, 2014; 102. (rus.).

Received May 7, 2021.

Adopted in revised form on June 9, 2021.

Approved for publication on July 2, 2021.

B I O N O T E S: **Andrey A. Melekhin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat, Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4180-6075, Scopus: 57191952249, ORCID: 3933620853385926; melehin2006@yandex.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 69:658

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.876-884

Планирование капитального ремонта и реконструкции общественных зданий на основе нечеткого вывода

Е.В. Ганзен

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведен анализ основных факторов, оказывающих влияние на включение общественных зданий в план капитального ремонта и реконструкции (КРиР). К ним относятся техническое состояние объекта, определяемое на основании экспертного заключения, составленного по результатам обследования, продолжительность эффективной эксплуатации, выявляемая в соответствии с нормативными значениями, сроки выполнения работ, наличие инженерной и транспортной инфраструктур и др.

Материалы и методы. Сформулированы правила нечеткого вывода и приведена таблица экспертных заключений, полученных на основании данных правил. Для реализации процедуры нечеткого вывода использован алгоритм Мамдани с применением min-конъюнкции для агрегирования показателей, max-дизъюнкции для аккумуляции заключений и метода центра тяжести для дефазификации. С целью реализации предложенной системы нечеткого вывода применяется приложение «Редактор систем нечеткого вывода» пакета MatLab. Для построения функций принадлежности (ФП) использован метод иерархий Саати. Проведенный анализ литературных источников не выявил работ, в которых для оценки планирования КРиР общественных зданий использовались методы нечеткой логики и правила нечеткого вывода.

Результаты. Построены функции принадлежности для всех факторов и итогового показателя в выбранной шкале, соответствующей функции желательности Харрингтона в интервале значений [0; 100]. Приведены результаты реализации предложенной системы нечеткого вывода в среде MatLab, представленные в виде графиков и числовых значений всех входных лингвистических переменных.

Выводы. Нечеткий вывод позволяет получить числовое значение интегрального потенциала ремонта, на основании которого можно принять обоснованное решение о включении объекта в план КРиР. Достоинством подхода следует считать возможность модификации и расширения базы правил в ходе практического использования. Предложенный инструмент планирования предоставляет возможность учитывать совокупность главных факторов и обеспечивает экономию средств, сокращение сроков и повышение качества работ по КРиР общественных зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: капитальный ремонт, реконструкция, общественные здания, интегральный потенциал, планирование работ, нечеткая логика, функции принадлежности, правила нечеткого вывода

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ганзен Е.В. Планирование капитального ремонта и реконструкции общественных зданий на основе нечеткого вывода // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 876–884. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.876-884

Using fuzzy inference to plan capital repairs and reconstruction of public buildings

Evgeny V. Ganzen

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

ABSTRACT

Introduction. The article analyzes the determinants that condition the incorporation of public buildings into capital repair and reconstruction plans (CRR plan). These include the technical condition of a facility, specified in an expert opinion and identified on the basis of the survey results, the duration of effective operation, determined in accordance with guideline values, the work performance time, the availability of the engineering and transport infrastructure, and other factors.

Materials and methods. The co-authors formulated fuzzy inference rules and compiled a table of expert opinions issued on their basis. To implement the fuzzy inference procedure, the co-authors applied the Mamdani algorithm, the min-conjunction for aggregating indicators, the max-disjunction for accumulating conclusions, and the centre of gravity method to ensure defuzzification. The Editor of Fuzzy Output Systems of the MatLab package is used to implement the proposed fuzzy inference pattern. The Saati hierarchy method is used to design membership functions (FP). The analysis of literature sources did not identify any works in which fuzzy logic methods or fuzzy inference rules were used to plan the CRR of public buildings.

Results. Membership functions for all factors and the final indicator on the selected scale, corresponding to the Harrington desirability function in the range of values [0; 100], are designed. The results of the implementation of the proposed fuzzy inference system in the MatLab environment are presented in the form of graphs and numerical values of all input linguistic variables.

Conclusions. Fuzzy inference allows to obtain the numerical value of the integral repair potential that underlies an informed decision about the incorporation of a facility into the CRR plan. The strength of the approach is the modifiability and expandability of the rule base in practical work. The proposed planning tool allows to consider a combination of principal factors, cut costs, reduce the time frame and improve the public building repair quality.

KEYWORDS: capital repair, reconstruction, public buildings, integral potential, work planning, fuzzy logic, membership functions, fuzzy inference rules

FOR CITATION: Ganzen E.V. Using fuzzy inference to plan capital repairs and reconstruction of public buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(7):876-884. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.876-884 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Общественные здания, как и другие сооружения, подвержены физическому износу, который приводит к необходимости проведения капитального ремонта и реконструкции (КРиР) [1]. Выполнение ремонтных работ начинается с визуального и инструментального комиссионного обследования объекта, оценивающего степень физического износа. В случае неизбежности доведения объекта до действующих строительных норм и правил осуществляют реконструкцию, в результате которой могут быть изменены основные технико-экономические параметры объекта. При обнаружении неустраняемого физического износа здания, когда его дальнейшая эксплуатация становится невозможной по соображениям безопасности, проводится капитальный ремонт, а в случае устранимого износа — текущий ремонт [2–4]. Вопросы обязательности проведения текущего ремонта в статье не рассматриваются. По результатам обследования составляется проектно-сметная документация, в состав которой включаются разделы, согласованные с заказчиком. Затем разрабатываются проект организации строительства (ПОС), определяющий стратегию производства работ, и проект производства работ (ППР), определяющий их тактику, т.е. рациональное использование ресурсов на конкретном объекте [5]. При этом при принятии организационно-технологических решений следует учитывать специфику работ в условиях плотной городской застройки, что приводит к увеличению сроков и затрат [6].

В рамках существующей практики для включения объекта в план КРиР в первую очередь рассчитывается сметная стоимость. Если выделенного объема финансирования недостаточно, то под выделенный объем финансирования выбирают объекты с наихудшим техническим состоянием. В титульном списке остаются здания, состояние которых оценивается как аварийное. Однако степень износа основных конструктивных элементов (фундамент, стены) не должна превышать 40 %, а затраты на капитальный ремонт не должны превышать стоимость строительства нового здания [7].

Многокритериальность и многовариантность организационно-технологических решений обуславливают потребность использования современных аппаратно-программных платформ, информационных технологий, математических методов

системного подхода и процессного описания [8–11]. Слабый уровень организационно-технологических решений приводит к увеличению сроков, снижению качества работ, к перерасходу всех видов ресурсов (трудовых, материальных, финансовых).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведенный автором анализ показал, что основными факторами при планировании работ по КРиР общественных зданий являются:

Техническое состояние объекта («Состояние») — ТС (со значениями термов: среднее — ТСА, плохое — ТСР, аварийное — ТСЕ).

Продолжительность эффективной эксплуатации («Продолжительность») — DE (со значениями факторов: меньше — DEI, точно — DED, больше — DEC).

Сроки выполнения работ («Сроки») — TW (со значениями термов: больше — TWM, точно — TWA, меньше — TWS).

Инженерная и транспортная инфраструктура («Инфраструктура») — AI (со значениями термов: отсутствует — AIA, есть частично — AIP, присутствует — AIE).

Качество работ («Качество») — QW (со значениями термов: плохое — QWP, хорошее — QWG, очень хорошее — QWV).

Указанные факторы — нечеткие и для проведения нечеткого вывода сформулированы правила вывода [12]:

1. Если техническое состояние объекта «аварийное», продолжительность эффективной эксплуатации «больше», инженерная и транспортная инфраструктура «присутствует», плотность застройки «обычная», сроки выполнения работ «меньше» и качество выполнения работ «очень хорошее», то необходимость включения в план «очень высокая».

...

3. Если техническое состояние объекта «аварийное», продолжительность эффективной эксплуатации «больше», инженерная и транспортная инфраструктура «присутствует», плотность застройки «средняя», сроки выполнения работ «меньше» и качество выполнения работ «очень хорошее», то необходимость включения в план «очень высокая».

...

6. Если техническое состояние объекта «плохое», продолжительность эффективной эксплуатации «большая», инженерная и транспортная инфраструктура «присутствует», плотность застройки «обычная», сроки выполнения работ «меньше» и качество выполнения «очень хорошее», то необходимость включения в план «высокая».

...

9. Если техническое состояние объекта «среднее», продолжительность эффективной эксплуатации «большая», инженерная и транспортная инфраструктура «присутствует», плотность застройки «обычная», сроки выполнения работ «меньше» и качество выполнения «очень хорошее», то необходимость включения в план «средняя».

...

12. Если техническое состояние объекта «среднее», продолжительность эффективной эксплуатации «большая», инженерная и транспортная инфраструктура «частично», плотность застройки «средняя», сроки выполнения работ «большая»

и качество выполнения работ «хорошее», то необходимость включения в план низкая.

...

20. Если техническое состояние объекта «среднее», продолжительность эффективной эксплуатации «меньше», инженерная и транспортная инфраструктура «есть частично», плотность застройки «средняя», сроки выполнения работ «большая» и качество выполнения работ «хорошее», то необходимость включения в план «очень низкая».

Результаты экспертных заключений по всем сформированным нечетким правилам представлены в табл. 1.

Выходная переменная *NI* — «План» определяет необходимость включения в план и служит основанием для принятия решения о КРиР. В качестве ее значений выступают термы: *VH* — «очень высокая», *HI* — «высокая», *AV* — «средняя», *LO* — «низкая», *VL* — «очень низкая», которым соответствуют числовые значения по шкале желательности

Табл. 1. Экспертные заключения по нечетким правилам

Table 1. Expert opinions on fuzzy rules

Номер правила Rule number	TC	DE	AI	TW	QW	NI
1.	TCE	DEC	AIE	TWS	QWV	VH
2.	TCE	DED	AIE	TWS	QWV	VH
3.	TCE	DEI	AIE	TWS	QWV	VH
4.	TCE	DED	AIP	TWA	QWG	VH
5.	TCE	DEI	AIA	TWM	QWP	HI
6.	TCP	DEC	AIE	TWS	QWV	HI
7.	TCP	DED	AIP	TWA	QWG	HI
8.	TCP	DEI	AIA	TWM	QWP	AV
9.	TCA	DEC	AIE	TWS	QWV	AV
10.	TCA	DED	AIP	TWA	QWG	AV
11.	TCA	DEI	AIA	TWM	QWP	LO
12.	TCE	DEC	AIE	TWS	QWV	VH
13.	TCE	DED	AIP	TWS	QWV	VH
14.	TCE	DEI	AIA	TWS	QWV	HI
15.	TCE	DEC	AIA	TWS	QWV	VH
16.	TCE	DED	AIA	TWM	QWV	VH
17.	TCE	DEI	AIE	TWS	QWV	VH
18.	TCA	DEC	AIP	TWM	QWG	LO
19.	TCA	DED	AIA	TWM	QWP	VL
20.	TCA	DEI	AIP	TWM	QWG	VL

Харрингтона: $VH = 80-100$; $HI = 63-80$; $AV = 37-63$; $LO = 20-37$; $VL = 0-20$. В работе полагается, что значения переменной NI «очень высокая» и «высокая» предполагают планирование реконструкции здания, значение «средняя» предусматривает планирование капитального ремонта, а значения «низкая» и «очень низкая» не предполагают включение данного объекта в план КРиР. Чем больше значение выходной переменной, тем меньше значение интегрального потенциала, т.е. $P_{cr} = 1 - N$. С целью реализации схемы вывода применен метод Мамдани [13]. Для полученных экспертных правил (всего 20) базовой логической связкой подусловий будет нечеткая операция «И», а для агрегирования показателей применяются min-конъюнкции. Аккумуляция заключений предполагает применение max-дизъюнкции (причем она же используется для схемы вывода Мамдани). Дефаззификация предусматривает применение метода центра тяжести. Для реализации предложенной системы нечеткого вывода в MatLab используется приложение «Редактор систем нечеткого вывода», которое позволяет определить необходимое количество входных и выходных лингвистических переменных (ЛП), определить тип нечеткого вывода, используемые методы фаззификации, агрегирования, аккумуляции и т.д. [14, 15].

После формирования списка переменных следует этап построения функций принадлежности (ФП) для всех факторов и показателя в выбранной шкале. Будем считать, что универсальное множество находится в интервале $[0; 100]$. Для реализации этого этапа используется приложение «Редактор функций принадлежности», которое дает возможность для каждой лингвистической переменной определить количество его значений из сформированного терм-множества, выбрать для каждого значения тип ФП (далее в работе будем использовать треугольный) и задать его

параметры. Редактирование выполняется в интерактивном режиме, поэтому сразу формируются графические образы построенных функций принадлежности.

Для построения ФП предлагается использовать метод иерархий Саати [14], в котором предполагается, что универсальное множество X состоит из n элементов. Суждение эксперта относительно принимаемых явлением A значений x_i может оказаться не транзитивным. В этом случае можно использовать метод попарного сравнения степеней принадлежности $\varphi_i = \mu_A(x_i)$ элемента x_i нечеткому множеству X . Эксперт оценивает отношения φ_i/φ_j , используя шкалу, приведенную в табл. 2.

В результате эксперт составляет матрицу

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{pmatrix}.$$

Далее ищется ее максимальное собственное значение $\lambda_{\max}$, которое является решением характеристического уравнения

$$\det \begin{pmatrix} b_{11} - \lambda & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} - \lambda & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} - \lambda \end{pmatrix} = 0.$$

После этого из условий

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_1 \\ \dots \\ \varphi_1 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_1 \\ \dots \\ \varphi_1 \end{pmatrix}_{\max}$$

Табл. 2. Сравнительная оценка условий предпочтения

Table 2. Comparative assessment of preference conditions

1	Значение φ_i равно значению φ_j The value of φ_i is equal to the value of φ_j
3	Значение φ_i чуть больше значения φ_j The value of φ_i exceeds the value of φ_j a little
5	Значение φ_i больше значения φ_j The value of φ_i exceeds the value of φ_j
7	Значение φ_i гораздо больше значения φ_j The value of φ_i exceeds the value of φ_j by far
9	Значение φ_i безусловно больше значения φ_j The value of φ_i unconditionally exceeds the value of φ_j
2, 4, 6, 8	Когда возникает сомнение при выборе между двумя соседними числами In case of doubt concerning the choice between the two adjacent numbers
Числа, обратные к данным Reciprocal figures	При сравнении φ_j с φ_i In case of comparison between φ_j and φ_i

и

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i = 1.$$

вычисляется собственный вектор. В результате предполагается, что функция принадлежности $\mu_A(x_i) = \varphi_i$. Далее подбирается наиболее близкая ФП выбранного класса из функций принадлежности, имеющихся в MatLab [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования определено 5 входных ЛП с именами «Состояние» — β_1 , «Продолжительность» — β_2 , «Инфраструктура» — β_3 , «Сроки» — β_4 , «Качество» — β_5 и одна выходная переменная с именем «План» — β_6 .

Далее построим ФП (принимающие значения от 0 до 1 в интервале [0; 100]) термов для всех входных и выходной переменных рассматриваемой системы нечеткого вывода (рис. 1).

Для формирования правил используется приложение «Редактор правил вывода». Правила также формируются в интерактивном режиме, и редактор предполагает применение служебных слов

«not», «or» и «and» для их формирования [16, 17]. Если некоторый терм не присутствует в задании некоторых правил, то в соответствующей позиции необходимо выставить значение «none». С помощью данного редактора были введены сформированные правила для разрабатываемой системы нечеткого вывода.

Этап фаззификации в методе Мамдани представляет собой процедуру введения нечеткости [18–21], т.е. числовому значению входной переменной ставится в соответствие терм. Для каждого терма по количественному значению входной переменной на основании его ФП определяется степень принадлежности этого значения переменной к каждому терму.

С целью оценки степени истинности условий T на этапе агрегирования используются парные нечеткие логические операции [22–24]. Активными считаются правила, степень истинности которых превышает нулевую, и именно они используются для дальнейших расчетов с помощью формулы average-активизации: $\mu(x) = 0,5(T + \mu(x))$.

На этапе аккумуляции для объединения нечетких множеств A_i , соответствующих одной

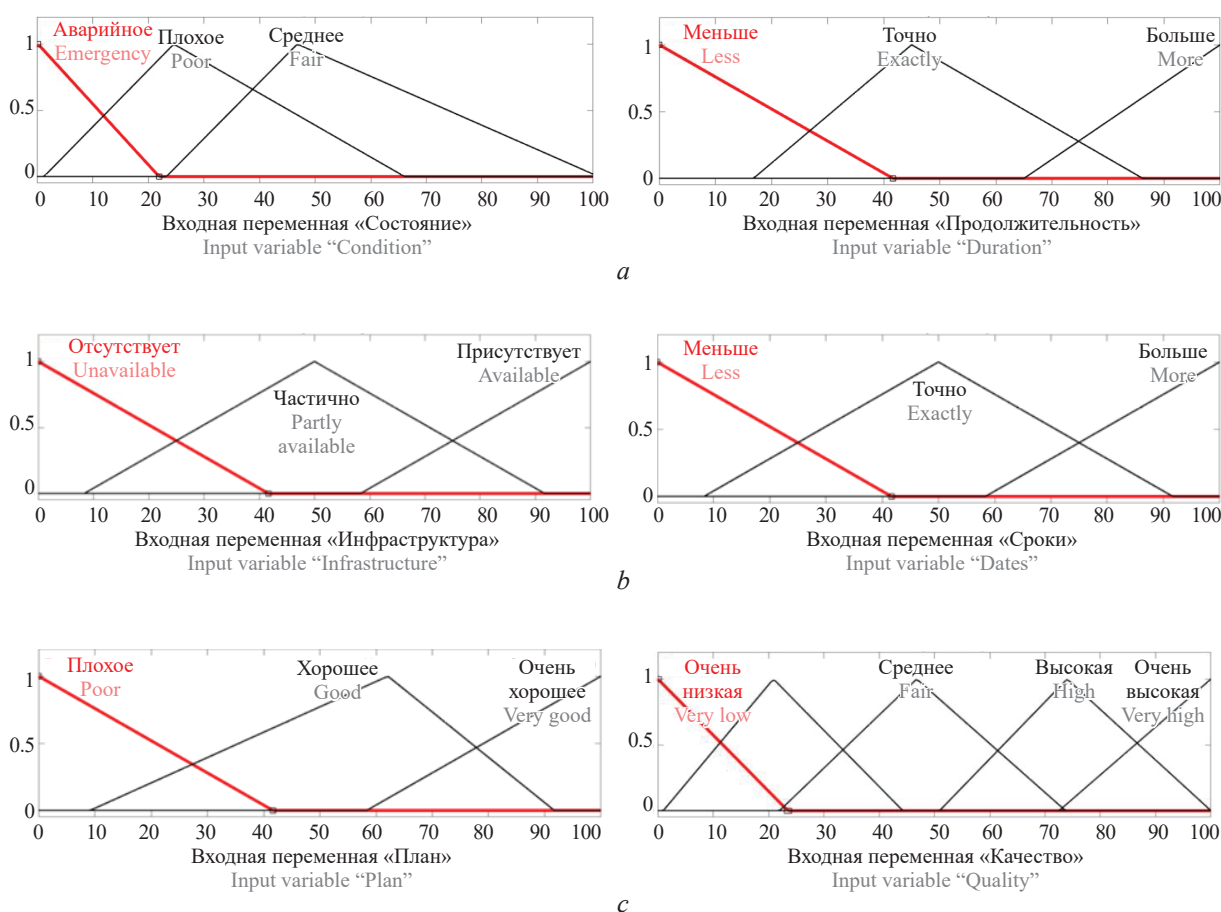


Рис. 1. Функции принадлежности входных и выходных термов: а — ФП термов «Состояние» и «Продолжительность»; б — ФП термов «Инфраструктура» и «Срок»; с — ФП термов «Качество» и «План»

Fig. 1. Membership functions of input and output terms: a — term membership function “Condition” and “Duration”; b — term membership function “Infrastructure” and “Date”; c — term membership function “Quality” and “Plan”

и той же ФП, применяется соотношение $\mu A(x) = \max(\mu A_1(x), \mu A_2(x))$.

На этапе дефаззификации используются методы центра тяжести или метод центра площади [25–28]. Метод центра тяжести предполагает расчет числового значения по соотношению

$$z = \frac{\int_{z_{\min}}^{z_{\max}} x \mu(x) dx}{\int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \mu(x) dx},$$

где z — результат дефаззификации; $\mu(x)$ — ФП соответствующей ЛП x . Метод центра площади сводится к вычислению медианы распределения по формуле

$$\int_{z_{\min}}^z \mu(x) dx = \int_z^{z_{\max}} \mu(x) dx.$$

Этап просмотра результатов реализуется с помощью приложения «Просмотра правил нечеткого вывода» (рис. 2). Просмотр и анализ результатов предусматривают формирование числовых значе-

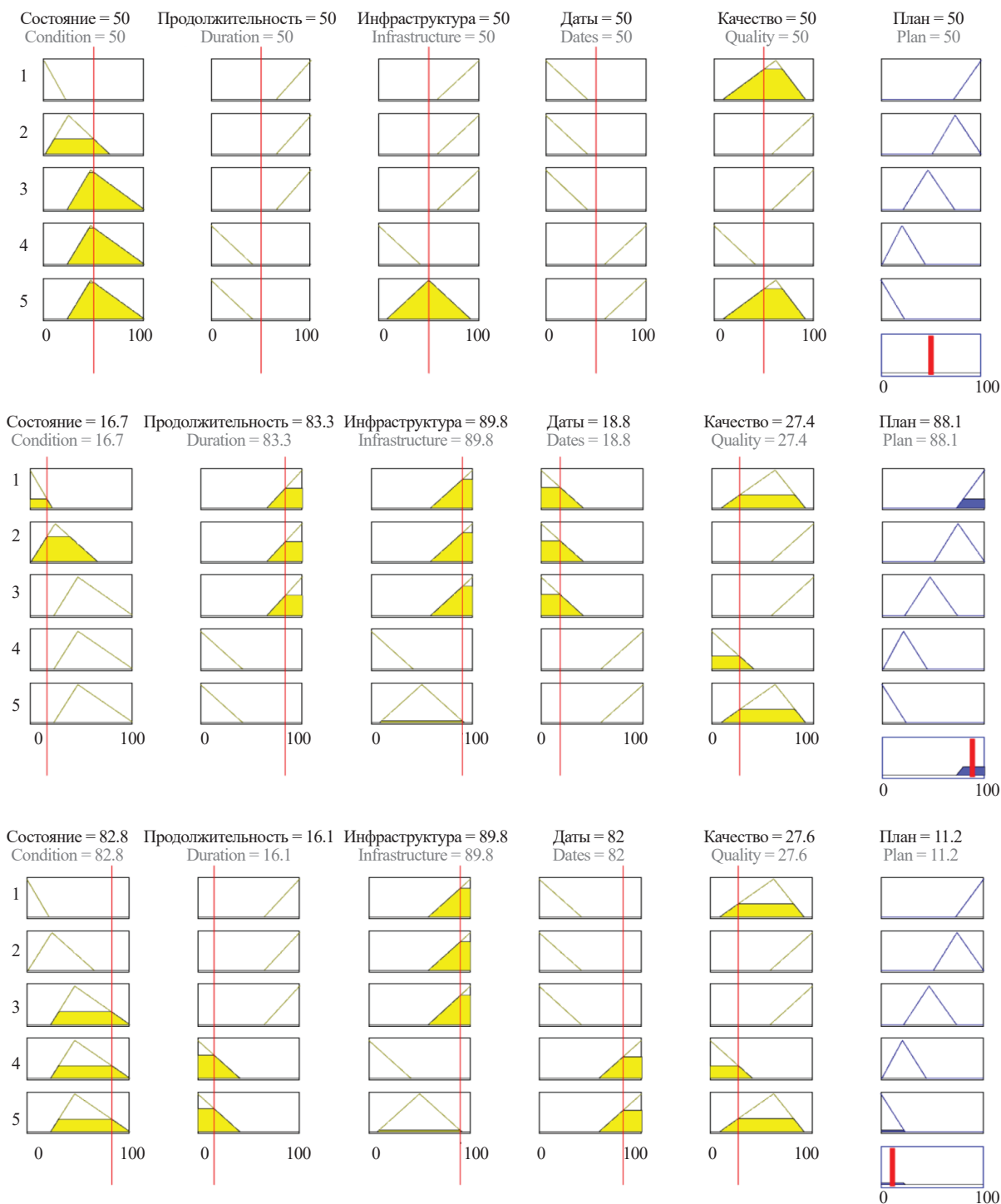


Рис. 2. Просмотр результатов вывода

Fig. 2. Viewing Output Results

ний всех входных ЛП в интерактивном режиме, перемещая шкалу в соответствующее положение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируя результаты вывода, можно сделать заключение, которое соответствует интуитивному прогнозу. Однако формальный нечеткий вывод дает конкретный числовой результат. Так, для всех средних значений факторов (рис. 2, а) результат также оказался $NI = 50$, $P_{CR} = 100 - 50 = 50$ баллов, что соответствует необходимости проведения капитального ремонта. При смещении значений ЛП «Состояние» в худшую сторону (т.е. техническое состояние объекта является «аварийным»), а «Продолжительность» в «большую» (т.е. продолжительность эффективной эксплуатации превышает нормативные значения) получили результат необходимости реконструкции: при $NI = 87$, $P_{CR} = 100 - 87 = 13$ баллов (рис. 2, б). Наоборот, при смещении значения пере-

менной «Состояние» в лучшую сторону (т.е. техническое состояние объекта является «средним»), а «Продолжительность» в меньшую (продолжительность эффективной эксплуатации меньше нормативных значений) сделан вывод об отсутствии необходимости включения объекта в план КРиР: при $NI = 10$, $P_{CR} = 100 - 10 = 90$ баллов (рис. 2, в). В итоге нечеткий вывод позволяет получить числовое значение интегрального потенциала КРиР, на основании которого можно принять обоснованное решение о включении объекта в план КРиР.

Достоинством подхода следует считать возможность наращивания количества факторов, модификации методов и расширения базы правил нечеткого вывода в ходе его практического применения. При планировании работ по КРиР это дает возможность учесть специфику каждого объекта, что обеспечивает экономию средств, сокращение сроков и повышение качества работ по КРиР общественных зданий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зозуля В.А. Словарь-справочник строительного эксперта. СПб. : Зодчий, 2016. 568 с.
2. Олейник П.П. Организация, планирование, управление и экономика строительства : терминологический словарь. М. : Изд-во АСВ, 2016. 320 с.
3. Rezvani A., Khosravi P. Identification of failure factors in large scale complex projects: an integrative framework and review of emerging themes // International Journal of Project Organization and Management. 2019. Vol. 11. Issue 1. Pp. 1–21. DOI: 10.1504/ijpom.2019.10019953
4. Ершов М.Н., Баженов И.А., Еремин Д.В., Топчий В.Д. Организационно-технологические решения при реконструкции общественных зданий, находящихся в режиме эксплуатации. М. : Изд-во АСВ, 2013. 172 с.
5. Алексанин А.В. Перспективные направления развития организации строительства // Научное обозрение. 2015. № 10–1. С. 378–381.
6. Липидус А.А. Потенциал эффективности организационно-технологических решений строительного объекта // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 175–180. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.1.175-180
7. Ершов М.Н., Липидус А.А. Современные технологии реконструкции гражданских зданий. М. : Изд-во АСВ, 2014. 496 с.
8. Липидус А.А. Формирование интегрального потенциала организационно-технологических решений посредством декомпозиции основных элементов строительного проекта // Вестник МГСУ. 2016. № 12. С. 114–123. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.114-123
9. Волков А.А., Пухтерев Д.В. К вопросу об организации информационного обеспечения строительного объекта // Вестник МГСУ. 2011. № 6. С. 460–462.
10. Ануфриев Д.П., Жолобов А.Л., Боронина Л.В., Купчикова Н.В., Золина Т.В. Новые конструкции и технологии при реконструкции и строительстве зданий и сооружений. М. : Изд-во АСВ, 2013. 208 с.
11. Юдина А.Ф., Розанцева Н.В. Реконструкция скатных кровель гражданских зданий // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 6 (35). С. 92–95.
12. Гвоздик М.И., Лабинский А.Ю. К вопросу использования нечеткого моделирования и управления // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2015. № 3 (15). С. 5–10.
13. Eshkabilov S. Beginning MATLAB and Simulink: From Novice to Professional. Apress, 2019. 524 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-5061-7
14. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. М. : ДМК пресс. 2012. 768 с.
15. Lindfield G., Penny J. Numerical methods using MATLAB. 4-th ed. Academic Press, 2019. 608 p.
16. Deng Y., Ren Z., Kong Y., Bao F., Dai Q. A hierarchical fused fuzzy deep neural network for data classification // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2017. Vol. 25 (4). Pp.1006–1012. DOI: 10.1109/TFUZZ.2016.2574915
17. Karaboga D., Kaya E. Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey // Artificial Intelligence Review. 2019. Vol. 52. Issue 4. Pp. 2263–2293. DOI: 10.007/S10462-017-9610-2
18. Magdalena L. Do hierarchical fuzzy systems really improve interpretability? Communications in Computer and Information Science. 2018. Pp. 16–26. DOI: 10.1007/978-3-319-91473-2_2
19. Hongyun Yu., Junmin Li, Jiarong S., Yang W. Adaptive fuzzy tracking control for stochastic non-

linear systems with time-varying input delays using the quadratic functions // *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018. Vol. 26. Issue 01. Pp. 109–142. DOI: 10.1142/S0218488518500071

20. Alcalá R., Nojima Yu., Ishibuchi H., Herrera F. Special issue on evolutionary fuzzy systems // *Journal of Computational Intelligence Systems*. 2012. Vol. 5 (2). Pp. 209–211. DOI: 10.1080/18756891.2012.685261

21. Cintra M.E., Camargo H.A., Monard M.C. Genetic generation of fuzzy systems with rule extraction using formal concept analysis // *Information Sciences*. 2016. Vol. 349–350. Pp. 199–215. DOI: 10.1016/j.ins.2016.02.026

22. Fazzolari M., Alcalá R., Nojima Yu., Ishibuchi H., Herrera F. A review of the application of multiobjective evolutionary fuzzy systems: current status and further directions // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2013. Vol. 21 (1). Pp. 45–65. DOI: 10.1109/TFUZZ.2012.2201338

23. Fernandez A., Lopez V., María José del Jesus, Francisco Herrera. Revisiting evolutionary fuzzy systems: Taxonomy, applications, new trends and challenges // *Knowledge-Based Systems*. 2015. Vol. 80. Pp. 109–121. DOI: 10.1016/j.knosys.2015.01.013

24. Márquez A.A., Márquez F.A., Peregrín A. A scalable evolutionary linguistic fuzzy system with adaptive defuzzification in big data // *In Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. IEEE International Conference. 2017. Pp. 1–6. DOI: 10.1007/s12559-019-09632-4

25. Palacios A.M., Palacios J.L., Sánchez L., Alcalá-Fdez J. Genetic learning of the membership functions for mining fuzzy association rules from low quality data // *Information Sciences*. 2015. Vol. 295. Pp. 358–378. DOI: 10.1016/j.ins.2014.10.027

26. Rey M.I., Galende M., Fuente M.J., Sainz-Palmero G.I. Multi-objective based Fuzzy Rule Based Systems (FRBSs) for trade-off improvement in accuracy and interpretability: A rule relevance point of view // *Knowledge-Based Systems*. 2017. Vol. 127. Pp. 67–84. DOI: 10.1016/j.knosys.2016.12.028

27. Зыкова Г.В., Пергунов В.В. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ФЛИНТА, 2017. 194 с.

28. Harish G.A. A linear programming method based on an improved score function for interval-valued pythagorean fuzzy numbers and its application to decision-making // *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018. Vol. 26 (01). Pp. 67–80. DOI: 10.1142/S0218488518500046

Поступила в редакцию 6 апреля 2021 г.

Принята в доработанном виде 20 июля 2021 г.

Одобрена для публикации 20 июля 2021 г.

ОБ АВТОРЕ: **Евгений Валерьевич Ганзен** — соискатель ученой степени кафедры технологии и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-9298-0151; Ganzen_EV@mail.ru.

REFERENCES

1. Zozulya V.A. *Construction expert reference dictionary*. Saint-Petersburg, Zodchiy Publ., 2016; 568. (rus.).
2. Oleinik P.P. *Organization, planning, management and construction economics: a terminological dictionary*. Moscow, ASV Publ., 2016; 320. (rus.).
3. Rezvani A., Khosravi P. Identification of failure factors in large scale complex projects: an integrative framework and review of emerging themes. *International Journal of Project Organization and Management*. 2019; 11(1):1-21. DOI: 10.1504/ijpom.2019.10019953
4. Ershov M.N., Bazhenov I.A., Eremin D.V., Topchiy V.D. *Organizational and technological solutions for the reconstruction of public buildings that are in operation*. Moscow, ASV Publ., 2013; 172. (rus.).
5. Alexanin A.V. Prospective directions of development of construction organization. *Scientific review*. 2015; 10-1:378-381. (rus.).
6. Lapidus A.A. Efficiency potential of management and technical solutions for a construction ob-

ject. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 1:175-180. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.1.175-180 (rus.).

7. Ershov M.N., Lapidus A.A. *Modern technologies for the reconstruction of civil buildings*. Moscow, ASV Publ., 2014; 496. (rus.).

8. Lapidus A.A. Formation of an integral potential of organizational and technological solutions through the decomposition of the main elements of a construction project. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 12:114-123. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.114-123 (rus.).

9. Volkov A.A., Pikhterev D.V. Some aspects of information support organization for construction objects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 6:460-462. (rus.).

10. Anufriev D.P., Zholobov A.L., Boronina L.V., Kupchikova N.L., Zolina T.V. *New designs and tech-*

nologies for renovation and construction of buildings and structures. Moscow, ASV Publ., 2016; 210. (rus.).

11. Yudina A.F., Rozantseva N.V. Reconstruction of pitched roofs of civil buildings. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 6(35):92-95. (rus.).

12. Gvozdk M.I., Labinskiy A.Yu. Problem of use the fuzzy modeling and control. *Natural and technogenic risks (physical, mathematical and applied aspects)*. 2015; 3(15):5-10. (rus.).

13. Eshkabilov S. *The beginning of MATLAB and Simulink: From beginner to professional*. Apress, 2019; 524. DOI: 10.1007/978-1-4842-5061-7

14. Dyakonov V.P. *MATLAB. Complete tutorial*. Moscow, DMK Press, 2012; 768. (rus.).

15. Lindfield G., Penny J. *Numerical methods using MATLAB*. 4th ed. Academic Press, 2019; 608.

16. Deng Y., Ren Z., Kong Y., Bao F., Dai Q. A hierarchical fused fuzzy deep neural network for data classification. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2017; 25(4):1006-1012. DOI: 10.1109/TFUZZ.2016.2574915 (rus.).

17. Karaboga D., Kaya E. Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey. *Artificial Intelligence Review*. 2019; 52(4):2263-2293. DOI: 10.007/S10462-017-9610-2

18. Magdalena L. Do hierarchical fuzzy systems really improve interpretability? *Communications in Computer and Information Science*. 2018; 16-26. DOI: 10.1007/978-3-319-91473-2_2

19. Hongyun Yu., Junmin Li, Jiarong S., Yang W. Adaptive fuzzy tracking control for stochastic nonlinear systems with time-varying input delays using the quadratic functions. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018; 26(01):109-142. DOI: 10.1142/s0218488518500071

20. Alcalá R., Nojima Yu., Ishibuchi H., Herrera F. Special issue on evolutionary fuzzy systems. *Journal of Computational Intelligence Systems*. 2012; 5(2):209-211. DOI: 10.1080/18756891.2012.685261

21. Cintra M.E., Camargo H.A., Monard M.C. Genetic generation of fuzzy systems with rule extraction using formal concept analysis. *Information Sciences*. 2016; 349-350:199-215. DOI: 10.1016/j.ins.2016.02.026

22. Fazzolari M., Alcalá R., Nojima Yu., Ishibuchi H., Herrera F. A review of the application of multiobjective evolutionary fuzzy systems: current status and further directions. *IEEE Transactions on Fuzzy systems*. 2013; 21(1):45-65. DOI: 10.1109/TFUZZ.2012.2201338

23. Fernandez A., Lopez V., María José del Jesus, Francisco Herrera. Revisiting evolutionary fuzzy systems: Taxonomy, applications, new trends and challenges. *Knowledge-Based Systems*. 2015; 80:109-121. DOI: 10.1016/j.knosys.2015.01.013

24. Márquez A.A., Márquez F.A., Peregrín A. A scalable evolutionary linguistic fuzzy system with adaptive defuzzification in big data. In *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). IEEE International Conference*. 2017; 1-6. DOI: 10.1007/s12559-019-09632-4

25. Palacios A.M., Palacios J.L., Sánchez L., Alcalá-Fdez J. Genetic learning of the membership functions for mining fuzzy association rules from low quality data. *Information Sciences*. 2015; 295:358-378. DOI: 10.1016/j.ins.2014.10.027

26. Rey M.I., Galende M., Fuente M.J., Sainz-Palmero G.I. Multi-objective based Fuzzy Rule Based Systems (FRBSs) for trade-off improvement in accuracy and interpretability: A rule relevance point of view. *Knowledge-Based Systems*. 2017; 127:67-84. DOI: 10.1016/j.knosys.2016.12.028

27. Zykova G.V., Pergunov V.V. *Theory of probability and mathematical statistics*. Moscow, FLINTA, 2017; 194. (rus.).

28. Harish G.A. A linear programming method based on an improved score function for interval-valued pythagorean fuzzy numbers and its application to decision-making. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 2018; 26(01):67-80. DOI: 10.1142/S0218488518500046

Received April 6, 2021.

Adopted in revised form on July 20, 2021.

Approved for publication on July 20, 2021.

BIONOTES: **Evgeny V. Ganzen** — applicant for a scientific degree from the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9298-0151; Ganzen_EV@mail.ru.

Строительная отрасль и концепция «Индустрия 4.0»: обзор

А.В. Гинзбург, Л.А. Адамцевич, А.О. Адамцевич

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Концепция «Индустрия 4.0» или четвертая промышленная революция включает собирательные понятия таких технологий, как Интернет вещей, виртуальная и дополненная реальность, 3D-печать, печатная электроника, искусственный интеллект и пр. Цель статьи — анализ публикационной активности, посвященной исследованиям в области развития технологий Индустрии 4.0 применительно к строительной отрасли в сфере развития технологий строительного производства.

Материалы и методы. Проведен библиометрический и библиографический обзор международных научных публикаций. На первом этапе принято решение использовать научные публикации, индексируемые в двух научных базах: Scopus и РИНЦ, для чего создано три выборки по ключевым словам. С учетом небольшого количества публикаций в базе данных (БД) Российского индекса научного цитирования, отвечающих поставленным требованиям, анализ публикаций осуществлен из выборки, полученной по БД Scopus. Для анализа выбрана выборка 3, как наиболее полная и подходящая. Выполнены сбор данных по научным публикациям по теме исследования, библиометрический анализ для разработки кластерной карты взаимосвязи ключевых слов и библиографический анализ для выбора научных публикаций для проведения их обзора.

Результаты. В соответствии с принятыми ограничениями работа проводилась со статьями, опубликованными в период с 2011 по 2020 гг. Всего в выборке осталась 591 публикация, данные о которых были переведены в формат .RIS с целью дальнейшего анализа и визуализации библиометрических параметров. Статей, которые содержат исследования или предложения по развитию технологий Индустрии 4.0, немного.

Выводы. Выделены две ключевые технологии Индустрии 4.0 применительно к строительной отрасли: технологии информационного моделирования и 3D-печать. Развитие технологий аддитивного строительного производства (строительная 3D-печать) является одним из наиболее динамично развивающихся направлений исследований в сфере современной строительной науки. В первую очередь, это относится к направлению «3D Concrete Printing».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Индустрия 4.0, Строитель 4.0, аддитивные технологии, Интернет вещей, строительная отрасль, технологии информационного моделирования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гинзбург А.В., Адамцевич Л.А., Адамцевич А.О. Строительная отрасль и концепция «Индустрия 4.0»: обзор // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 885–911. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.885-911

Construction industry and the Industry 4.0 concept: a review

Alexander V. Ginzburg, Liubov A. Adamtsevich, Aleksey O. Adamtsevich

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

ABSTRACT

Introduction. The concept of Industry 4.0, which is considered the fourth industrial revolution, includes collective concepts of technologies such as the Internet of Things, virtual and augmented reality, 3D printing, printed electronics, artificial intelligence, etc. It was introduced in Germany in 2011. The purpose of the article is to analyze the publication activity focused on Industry 4.0 technologies in the construction industry and the development of construction technologies.

Materials and methods. To achieve the goal set in this study, a bibliometric and bibliographic review of international scientific publications was carried out. At the first stage, the co-authors decided to use scientific publications indexed in Scopus and RSCI, for which three key word sampling were made: Keywords for the first sampling: the fourth industrial revolution; Keywords for the second sampling: The Fourth Industrial Revolution and construction industry; Keywords for the third sampling: Industry 4.0 and construction.

Given that a small number of publications in the RSCI database — the database of the Russian Science Citation Index (4) — meet the requirements, the co-authors decided to analyze the publications from the list made by the Scopus database. At the same time, sampling 3 was selected for the analysis, as the most complete and suitable for the purposes of the study. Further, the co-authors collected data on scientific publications covering the research topic, and conducted a bibliometric analysis to develop a cluster map of relationships between the key words and a bibliographic analysis to select the scientific publications to be reviewed.

Results. In accordance with the pre-set restrictions, the co-authors analyzed the articles published from 2011 to 2020. In total, 591 publications were left in the sampling. The information about these articles was converted to RIS format for its further analysis and visualization of bibliometric parameters. At the same time, few articles focus on research or development of Industry 4.0 technologies (27); hence, most of the publications represent overviews.

Conclusions. The analysis of publications made it possible to single out two key Industry 4.0 technologies applied in

the construction industry: information modeling and 3D printing. At the same time, the development of technologies for additive construction (3D printing) is one of the most dynamically developing areas of research in the field of the cutting-edge construction science. First of all, it refers to 3D Concrete Printing, which also contributed to the inception and development of a number of related research areas in the field of building materials related to the control of rheological and technological properties of dispersed building mixtures, the control of the hardening kinetics of materials that have mineral binders, dispersed reinforcement and other methods of increasing the strength characteristics of composites that feature hydration hardening, tension in bending, etc.

KEYWORDS: Industry 4.0, Builder 4.0, additive technologies, Internet of Things, construction industry, information modeling technologies

FOR CITATION: Ginzburg A.V., Adamtsevich L.A., Adamtsevich A.O. Construction industry and the Industry 4.0 concept: a review. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(7):885-911. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.885-911 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Развитие человечества неразрывно связано с прогрессом науки и техники, что подтверждается несколькими промышленными революциями. *Первая промышленная революция* или великая индустриальная революция произошла в ведущих государствах мира в XVIII–XIX вв. и обусловлена массовым переходом от ручного труда к машинному, от мануфактуры к фабрике. Инновациями этого периода стали текстильная промышленность, паровой двигатель и металлургия, где на смену древесному углю пришел каменноугольный кокс.

Вторая половина XIX – начало XX вв. считаются периодом развития *второй промышленной технологической революции*, когда происходит глобальная трансформация мировой промышленности, кульминацией которой считается внедрение поточного производства и поточных линий.

Третья промышленная революция началась в 1980-х гг. и характеризуется масштабным переходом от аналоговых технологий к цифровым. Данный процесс продолжался до середины первого десятилетия XXI в.

В 2011 г. в Германии была представлена концепция «Индустрия 4.0» [1–3], которая считается четвертой промышленной революцией и включает в себя собирательные понятия таких технологий, как Интернет вещей, виртуальная и дополненная реальность, 3D-печать, печатная электроника, искусственный интеллект и пр.

Стоит обратить внимание на то, что новые технологии развиваются с огромной скоростью: для реализации первой промышленной революции потребовались века, второй промышленной революции хватило 100 лет, переход к третьей занял 70 лет, но уже через 40 лет была объявлена концепция «Индустрия 4.0». При этом уже сегодня начинаются разработки в области Индустрии 5.0, к примеру в Японии анонсирована концепция «Общество 5.0» [4].

В то же время строительство, которое появилось еще в древние времена, также прошло несколько этапов эволюции. Сооружения возводились из глины, затем начали применять камень. С течением времени появлялись города и государства, которые нуждались в защите, что привело к возведению оборонительных

стен и сооружений. Все это послужило развитием строительства и архитектуры, появлялись новые материалы и технологии строительства. Очевидно, что постройки были, как правило, из местных материалов. К примеру, в XX в. основные сооружения Москвы были построены с использованием дерева, и только церкви возводились из камня. Начиная с XVIII в. стали появляться планы по постройке и развитию городов. Активный прогресс строительной отрасли пришелся на XX в., однако отсутствие современного строительного оборудования в ряде государств и использование ручного труда значительно увеличивали сроки возведения строительных объектов.

В нашей стране в период реализации пятилетних планов развития СССР создаются новые строительные машины, требующие только управления. В это же время наращиваются мощности производства оборудования, меняются технологии строительства зданий и сооружений. Толчком к активной разработке нового оборудования послужила необходимость восстановления и реставрации государства после Великой Отечественной войны. В этот период начинается первая индустриализация и автоматизация заводов и предприятий. На рис. 1 представлена динамика ввода в эксплуатацию жилых зданий в Российской Федерации, которая подтверждает, что строительная отрасль была и остается важной отраслью экономики страны. Аналогичным образом складывается ситуация и в других странах мира.

Ежегодно в РФ на исследования и разработки в строительной отрасли из средств федерального бюджета тратится порядка 5 млрд руб. (2010 г. — 5,5 млрд руб./год; 2017 г. — 4,5 млрд руб./год; 2018 г. — 4,6 млрд руб./год; 2019 г. — 5,0 млрд руб./год¹).

В свете развития концепции «Индустрия 4.0» появился термин «Строительство 4.0» (Construction 4.0). В работе [5] определены 4 ключевые технологии (3D-печать, Интернет вещей, виртуальная реальность, большие данные), которые необходимо контролировать для определения уровня развития данного понятия. Сегодня мы становимся свидетелями новой эпохи: внедрения принципиально новых технологий в строительной отрасли. Цель статьи — проведение анализа публикационной активности, посвященной исследованиям в области развития технологий Индустрии 4.0 применительно к строительной отрасли.

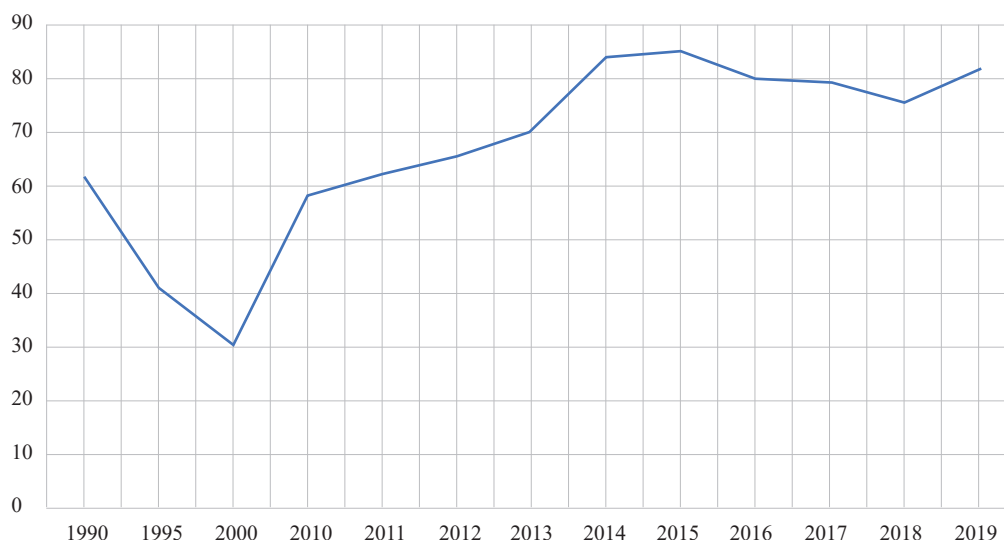


Рис. 1. Ввод в эксплуатацию жилых домов в РФ, млн кв. м²

Fig. 1. Commissioned residential housing in the Russian Federation, million m²

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для достижения поставленной цели проведен библиометрический и библиографический обзор международных научных публикаций. Первоначально было принято решение использовать научные публикации, индексируемые в двух научных базах:

- Scopus — библиографическая и реферативная база данных (БД) ученых по всему миру;
- РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) — библиографическая база данных научных

публикаций преимущественно ученых РФ и стран СНГ.

Обобщенная схема исследования/обзора представлена на рис. 2 и включает несколько этапов:

1. Сбор данных по научным публикациям по теме исследования.
2. Проведение анализа научных публикаций по теме исследования:
 - 2.1. Библиометрического анализа для разработки кластерной карты взаимосвязи ключевых слов;
 - 2.2. Библиографического анализа для выбора научных публикаций для осуществления их обзора.

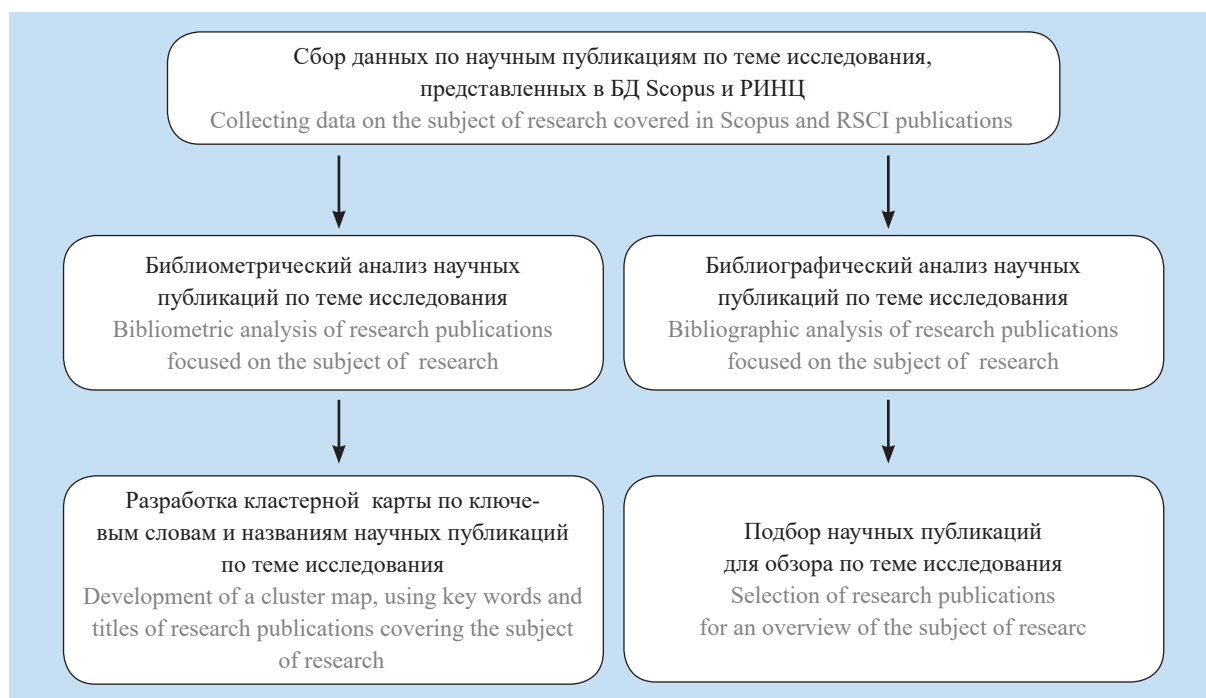


Рис. 2. Обобщенная схема проведения исследования в соответствии с поставленной целью

Fig. 2. Generalized research pattern focused on the pre-set goal

Табл. 1. Статистические данные по поиску научных публикаций по ключевым словам

Table 1. Statistical data on publication search using keyword matching

База данных Database	Выборка 1 Sampling 1		Выборка 2 Sampling 2		Выборка 3 Sampling 3	
	Четвертая промышленная революция Fourth Industrial Revolution		Четвертая промышленная революция и строительная отрасль (строительство) Fourth Industrial Revolution и construction industry		Индустрия 4.0 и строительство Industry 4.0 и construction	
Scopus Scopus	За все время: 1932–2021* For the whole period: 1932–2021*	2011–2020*	За все время: 2009–2021* For the whole period: 2009–2021*	2016–2020**	За все время: 1964–2021* For the whole period: 1964–2021	2011–2020*
	3,172	2,844	87	77	694	591
РИНЦ RSCI	За все время: 2013–2021* For the whole period: 2013–2021*	2011–2020*	2019***		2018–2020***	
	1,188	1,156	1****		4****	

Примечание: * — количество публикаций по указанному ключевому слову или сочетанию в БД за все время; ** — в период с 2011 до 2016 гг. публикаций с указанными ключевыми словами не найдено; *** — количество публикаций за все время по теме исследования; **** — в таблице представлено количество публикаций, которые относятся к теме исследования, прочие публикации в выборку не выносились.

Note: * — the number of publications in the database that contain a pre-set key word or word combination for the whole period; ** — no publications, having pre-set key words, are found from 2011 to 2016; *** — the number of publications on the subject of research for the whole period; **** — the table has publications on the subject of research, other publications are not included into the sampling.

На первом этапе были собраны данные по научным публикациям, представленным в указанных выше БД, включающих следующие ключевые слова и их сочетания: четвертая промышленная революция и строительная отрасль.

Были проведены три выборки:

- выборка 1 — четвертая промышленная революция / Fourth Industrial Revolution¹;
- выборка 2 — четвертая промышленная революция и строительная отрасль (строительство) / Fourth Industrial Revolution и construction industry;
- выборка 3 — Индустрия 4.0 и строительство / Industry 4.0 и construction.

Статистические данные по поиску научных публикаций по указанным ключевым словам приведены в табл. 1. Для дальнейшего анализа использованы публикации, опубликованные в период с 2011² по 2020 гг.

Поиск ключевых слов осуществлялся в названиях публикаций, в их аннотациях и ключевых словах в указанный период по всем отраслям знаний, представленным в Scopus. В РИНЦ поиск также

проводился в названиях публикаций, в их аннотациях и ключевых словах в статьях в журналах, книгах и материалах конференций.

Выборка 1 представлена для информации по общему количеству публикаций в рамках осуществления перехода к четвертой промышленной революции и в дальнейшем использована не будет.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ публикаций, представленных в РИНЦ

В настоящее время в РИНЦ публикаций, посвященных вопросам развития строительной отрасли в рамках развития четвертой промышленной революции, мало, что подтверждается статистическими данными, приведенными в табл. 1. Описание статей из выборки 2 и 3 показано в табл. 2. Необходимо отметить, что статьи являются обзорными и не содержат конкретных решений.

При этом публикации, которые попали в выборки 2 и 3, касаются, в первую очередь, вопросов интеллектуального управления строительной организацией и обработкой данных, полученных в результате этого управления [8, 9]. В то же время вопросам, связанным с особенностью четвертой промышленной

¹ Указан перевод ключевых слов для поиска в БД Scopus.

² 2011 г. — год публичного представления концепции «Индустрия 4.0» в Европе.

Табл. 2. Публикации в РИНЦ, отобранные в выборках 2 и 3

Table 2. RSCI Publications selected for Samplings 2 and 3

Ссылка Reference	Краткое содержание Summary
[6]	Представлен анализ внедрения технологий Индустрии 4.0 в строительную отрасль в Российской Федерации The analysis of introduction of Industry 4.0 technologies into the construction industry in the Russian Federation is presented
[7]	В статье приведена авторская модель «Умного производства» с учетом технологий Индустрии 4.0 The article addresses the author's model of a "Smart production facility" with regard for Industry 4.0 technologies
[8]	Представлен обзор применения информационных технологий в строительстве The article has an overview of information technologies applied in the construction industry
[9]	Предложен обзор использования информационных технологий в управлении строительством An overview of information technologies applied in construction management is proposed
[10]	Выполнен обзор применения информационных технологий в управлении строительными организациями An overview of information technologies, applied in the management of construction organizations, is proposed

революции (выборка 1), посвящено свыше 1000 публикаций, что подтверждает возникновение интереса к данному феномену у исследователей.

Полученные сведения не позволяют проследить тенденцию развития технологий четвертой промышленной революции или Индустрии 4.0 применительно к строительной отрасли, поэтому было принято решение дальнейшую работу проводить с публикациями, представленными в БД Scopus.

Анализ публикаций, представленных в БД Scopus

Анализ публикаций выборки 2: Fourth Industrial Revolution in construction industry

В соответствии с принятыми ограничениями работа осуществлялась со статьями, опубликованными в период с 2011 по 2020 гг., однако в выборке 2 первая опубликованная статья датирована 2016 г. Всего в выборке осталось 77 публикаций, информация о которых затем была переведена в формат .RIS для дальнейшего анализа³ и визуализации библиометрических параметров.

На рис. 3 показана взаимосвязь ключевых слов выборки 2. Минимальное количество совпадающих ключевых слов в выбранных публикациях установлено 10. Пороговому значению соответствовало

³ VOSviewerTM — Visualizing Scientific Landscapes. URL: <https://www.vosviewer.com>

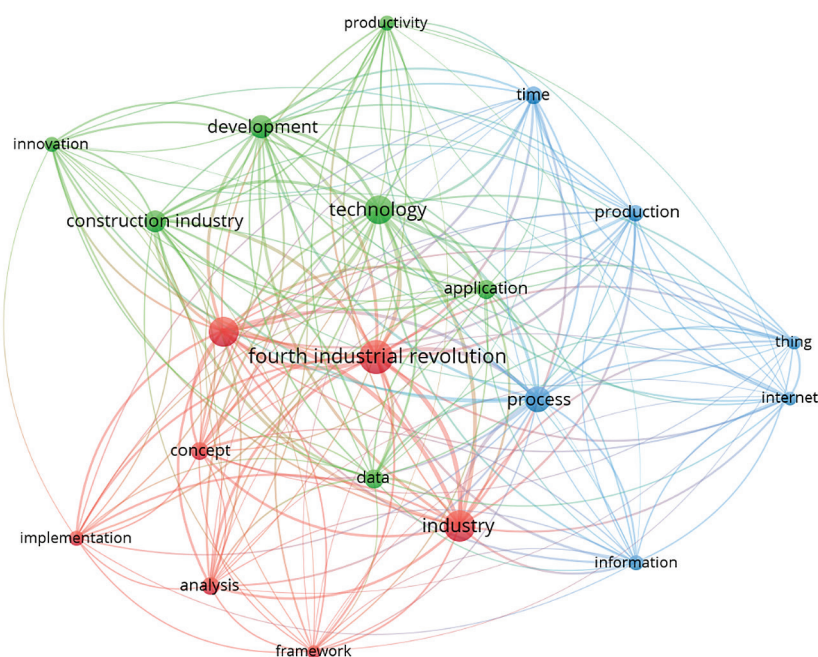
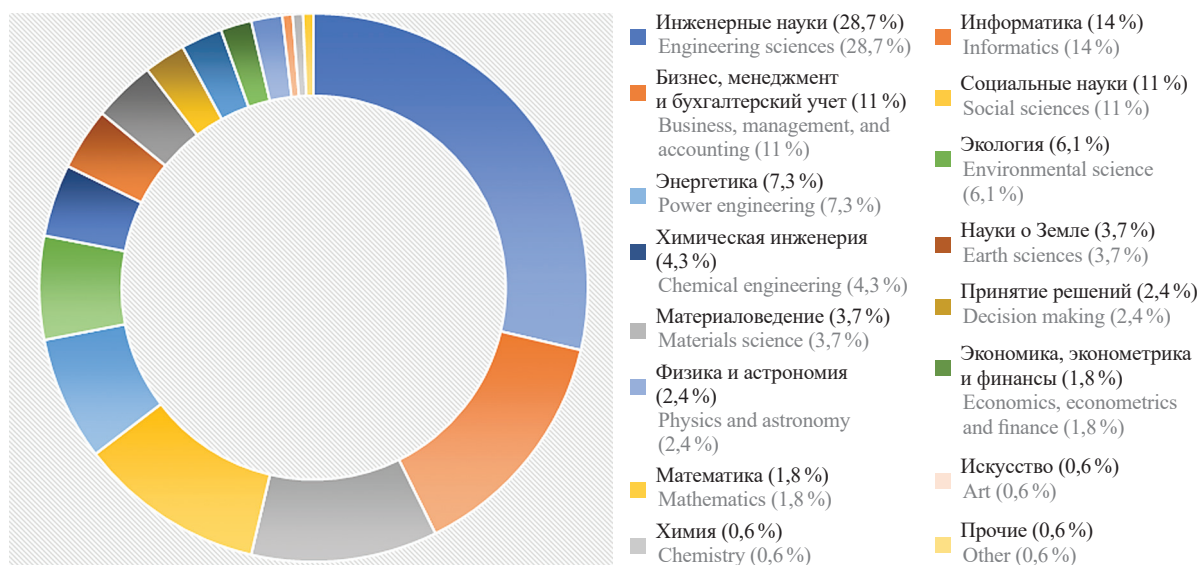
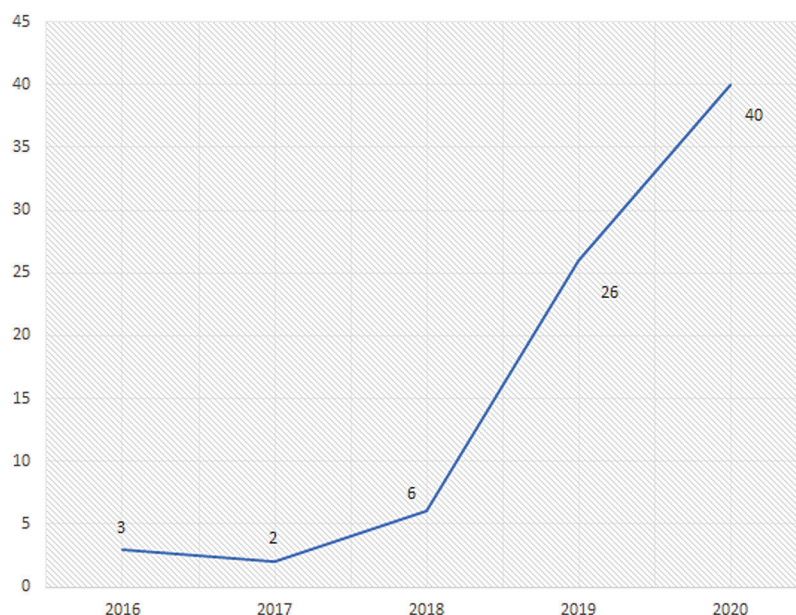


Рис. 3. Взаимосвязь ключевых слов выборки 2 в виде кластерной карты

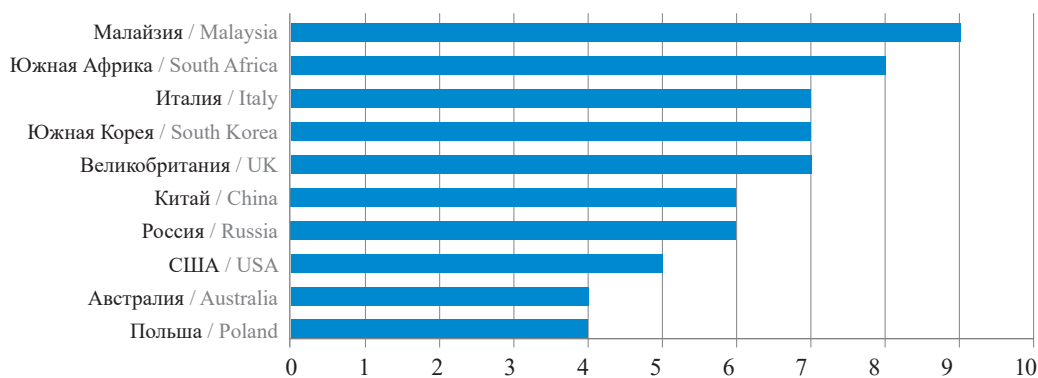
Fig. 3. Interrelation between key words from Sampling 2, presented as a cluster map



a



b



c

Рис. 4. Статистические данные по публикациям: a — распределение научных публикаций по отраслям знаний; b — распределение публикаций по годам; c — распределение публикаций по странам (топ-15 стран)

Fig. 4. Publication statistics: a — breakdown of research publications by areas of knowledge; b — breakdown of publications by years; c — breakdown of publications by countries (top 15 countries)

29 слов из 2394. Для каждого из 29 ключевых слов программой рассчитана общая сила одновременных ссылок с другими ключевыми словами. После проверки предложенных ключевых слов выбрано 20 наиболее релевантных вариантов в рамках темы исследования.

Распределение научных публикаций по отраслям знаний представлено на рис. 4, а и свидетельствует о том, что наибольшее количество публикаций относится к инженерным наукам и информатике, что подчеркивает важность информационных систем и технологий.

Кроме того, динамика изменения количества публикаций по годам (рис. 4, б) показывает, что рост публикаций начался с 2019 г. К марту 2021 г. в БД Scopus по ключевым словам выборки 2 представлено уже 10 статей. Наиболее релевантные из которых в рамках представленного исследования приведены в табл. 3.

Распределение публикаций по странам представлено на рис. 4, с, из которого видно, что на первом месте по количеству публикаций в рамках изучаемого направления расположились авторы из Малайзии, второе место принадлежит авторам из Южной Америки, а замыкают тройку лидеров публикации авторов из Италии.

Анализ публикаций по выборке 3: Industry 4.0 и construction

В соответствии с принятыми ограничениями работа проводилась со статьями, опубликованными в период с 2011 по 2020 гг. Всего в выборке осталось 591 публикация, информация о которых

затем была переведена в формат .RIS для дальнейшего анализа⁴ и визуализации библиометрических параметров.

На рис. 5 показана взаимосвязь ключевых слов выборки 3. Минимальное количество совпадающих ключевых слов в выбранных публикациях было установлено равным 10. Пороговому значению соответствовало 343 слова из 14 925. Для каждого из 343 ключевых слов программой рассчитана частота одновременных ссылок с другими ключевыми словами, используемыми в публикациях. Отобраны ключевые слова с наибольшей частотой и соответствующие теме исследования. После проверки предложенных ключевых слов выбрано 119 наиболее релевантных вариантов в рамках поставленной темы исследования.

Из рис. 5 можно выделить 5 кластеров. В рамках исследования рассмотрим подробнее кластер № 1, выделенный красным цветом. Как видно из рис. 6, концепция «Индустрия 4.0» неразрывно связана со строительством, ключевым фактором здесь является «умное производство», при этом можно проследить сильную связь с кластером № 2 (отмечен синим цветом), который относится к аддитивным технологиям и описывает сильные стороны 3D-печати в строительстве.

Распределение научных публикаций по отраслям знаний представлено на рис. 7, а и свидетельствует о том, что наибольшее количество публикаций относится к инженерным наукам и информатике. Динамика изменения количества публикаций по годам (рис. 7, б) свидетельствует о том, что рост публикаций начался с 2016 г. Наиболее

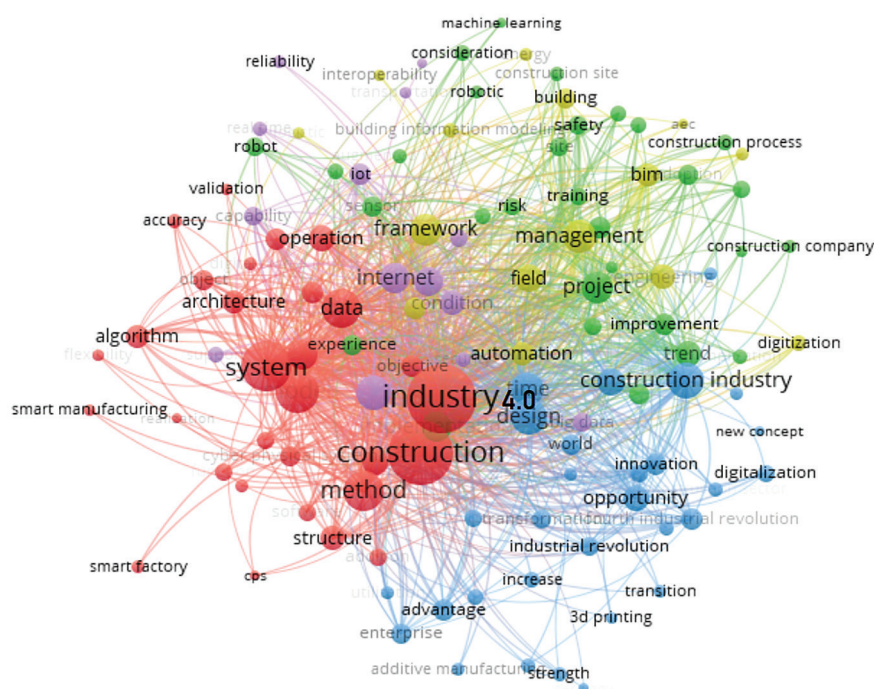


Рис. 5. Кластерная карта, образованная по ключевым словам: Industry 4.0 и Construction
Fig. 5. Cluster map, made on the basis of key words “Industry 4.0” and “Construction”

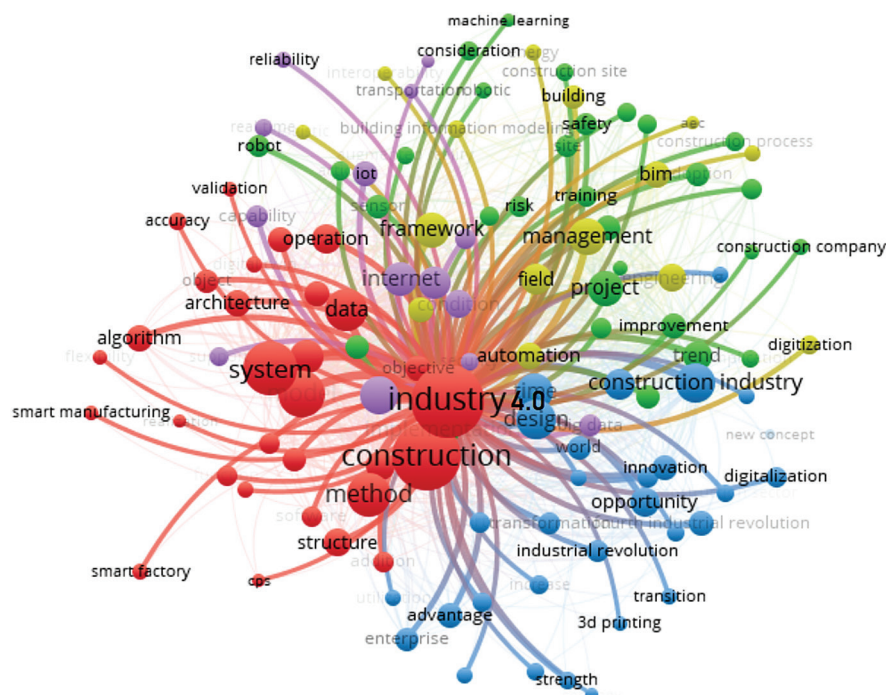


Рис. 6. Взаимосвязь ключевых слов Industry 4.0 и Construction

Fig. 6. Interrelation between key words "Industry 4.0" and "Construction"

интересные публикации в рамках представленного исследования рассмотрены в табл. 3.

На рис. 7, с приведено распределение публикаций по странам. На первом месте Германия (62 публикации), Италия занимает второе место с 53 публикациями, Китай — третье место (52 публикации). Далее с помощью функции ВПР MS Excel было определено, что массив статей из выборки 2 полностью входит в выборку 3. В этой связи дальнейшие исследования проводились с выборкой 3, как наиболее полной.

Ключевые технологии Индустрии 4.0 и их применение

В табл. 3 представлено описание основных публикаций, отобранных в рамках проведенного исследования с указанием описываемой в статье технологии Индустрии 4.0, для выявления основных тенденций развития в рассматриваемой области.

В табл. 4 вынесены результаты анализа публикаций, представленных в выборке 3 по ключевым технологиям Индустрии 4.0, а также статьи, опубликованные в 2021 г., соответствующие ключевым словам выборки 3. Статьи, которые содержат исследования или предложения по развитию технологий Индустрии 4.0, в табл. 3 выделены серым цветом. Таким образом, необходимо отметить, что в соответствии с табл. 3 большинство публикаций являются обзорными.

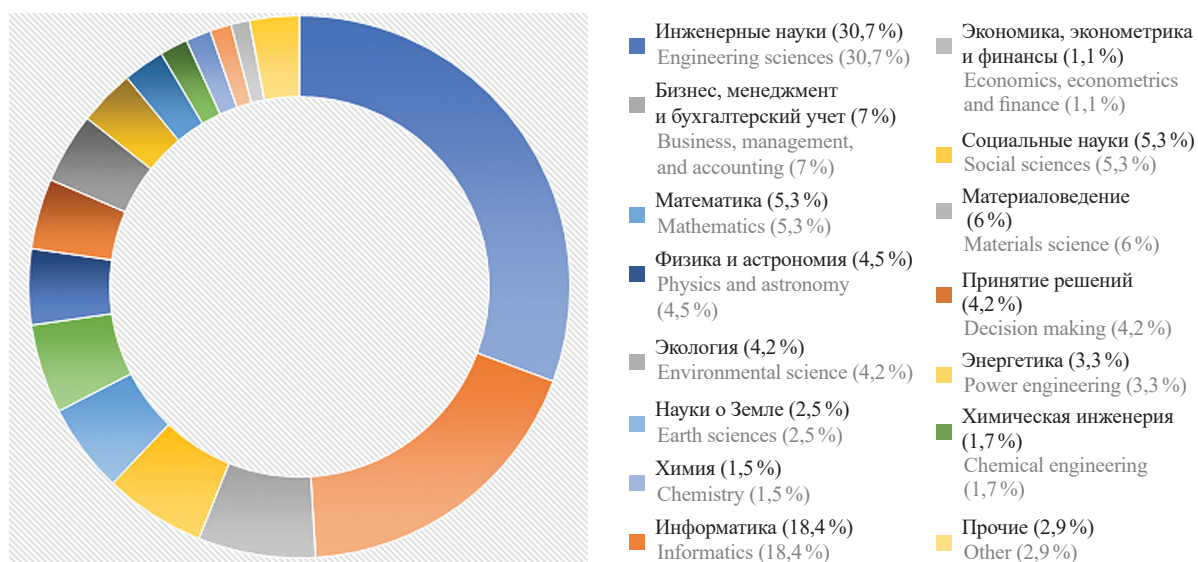
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ публикаций позволил выделить ключевые технологии Индустрии 4.0 применительно к строительной отрасли (см. табл. 4): технологии информационного моделирования и 3D-печать.

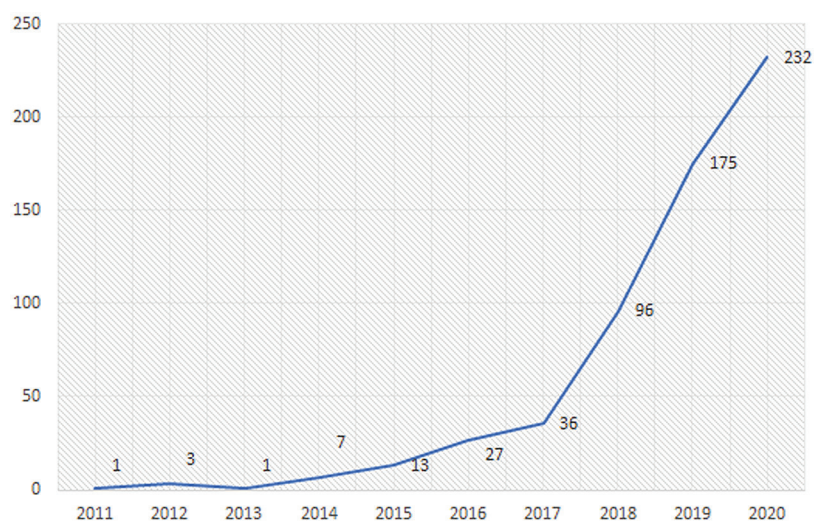
Технологиям информационного моделирования посвящено значительное число публикаций [12, 13, 19, 20, 25, 26, 30–33, 36, 48, 50–53, 58, 61, 62, 71, 73, 77, 79, 81], авторами также опубликованы статьи по анализу развития технологий информационного моделирования [85, 86], предложены подходы к осуществлению 5D BIM и пр. [87–91].

Однако одним из наиболее динамично развивающихся направлений исследований в сфере современной строительной науки является развитие технологий аддитивного строительного производства (строительная 3D-печать). В первую очередь, это относится к направлению «3D Concrete Printing», для которого в последнем десятилетии сформирован устойчивый тренд ежегодного увеличения числа новых научных публикаций (рис. 8), что также способствовало созданию и развитию ряда смежных направлений исследований в области строительного материаловедения, связанных с управлением реологическими и технологическими свойствами дисперсных строительных смесей, управлением кинетикой твердения материалов на основе минеральных вяжущих, дисперсным армированием и другими способами повышения прочностных характеристик композитов гидратационного твердения на растяжение при изгибе и т.д.

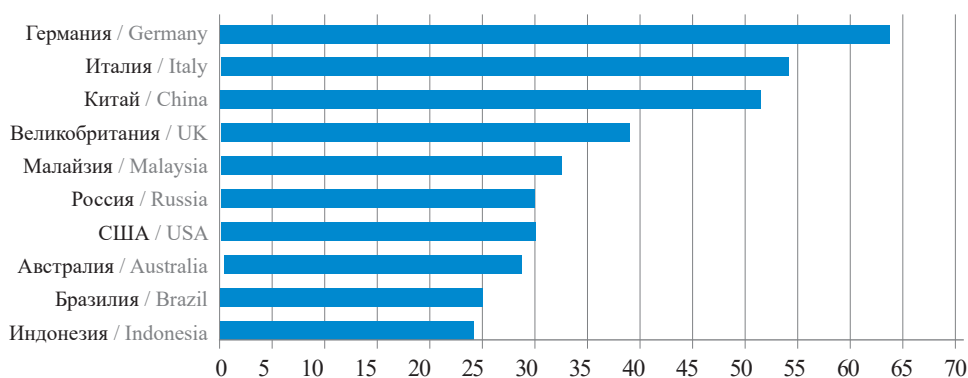
Рост интереса мирового научного сообщества к технологиям строительной 3D-печати, вероятно,



a



b



c

Рис. 7. Статистические данные по публикациям: *a* — распределение научных публикаций по отраслям знаний; *b* — распределение публикаций по годам; *c* — распределение публикаций по странам (топ-15 стран)

Fig. 7. Publication statistics: *a* — breakdown of research publications by areas of knowledge; *b* — breakdown of publications by years; *c* — breakdown of publications by countries (top 15 countries)

Табл. 3. Наиболее релевантные в рамках представленного исследования публикации из выборки 2

Table 3. Sampling 2 publications that are the most relevant for this research

Ссылка Reference	Краткое содержание статьи Article summary	Технология Индустрии 4.0. Industry 4.0 technology
<i>2017/2017</i>		
[11]	Предложена новая производственная модель индустриализации строительства, основанная на технологии BIM BIM-based construction process model is proposed	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[12]	Представлено описание возможностей технологий информационного моделирования для Индустрии 4.0 Capacities of information modeling technologies for Industry 4.0 are presented	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[13]	Рассмотрены потенциальные возможности применения 3D бетонной печати Potential applicability of 3D concrete printing is considered	3D-печать 3D printing
<i>2018/2018</i>		
[14]	Описаны возможности и перспективы использования технологии Интернета вещей в строительной отрасли Малайзии The capacity and prospects of application of the Internet of Things technology in the construction industry of Malaysia are described	Интернет вещей Internet of Things
[15]	Описано цифровое строительство: от точечных решений к экосистеме Интернета вещей Digital construction: from point solutions to the eco-system of the Internet of Things	Интернет вещей Internet of Things
[16]	Представлена структура, в которой киберфизические системы в строительной отрасли основаны на виртуальных моделях строительных процессов, реализованных через сети Петри и подключенных к BIM-моделям и аппаратным средствам (датчикам и исполнительным механизмам), работающим на объекте The article presents the structure, in which cyberphysical systems, used in the construction industry, are designed on the basis of virtual models of construction processes implemented in Petri networks and connected to BIM models and hardware (sensors and actuating units)	Киберфизические системы Cyberphysical systems
[17]	Описано актуальное состояние 3D-печати бетоном Current status of 3D concrete printing is described	3D-печать 3D printing
[18]	Представлена динамическая модель эффективности внедрения информационного моделирования зданий в зависимости от сложности и уровня их безопасности The dynamic model of BIM efficiency is presented depending on building complexity and safety	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[19]	Приведен процесс разработки цифровой платформы, которая использует дополненную реальность в сочетании с BIM для предоставления работникам актуальной информации в режиме реального времени, исходя из их текущего положения на строительной площадке The process of development of a digital platform that uses augmented reality in combination with BIM to provide relevant on-site information in the real time mode	Технологии информационного моделирования / Дополненная реальность Information modeling technologies / Augmented reality
<i>2019/2019</i>		
[20]	Показаны результаты разработки веб-помощника по построению киберфизических систем The results of development of a web assistant, that helps to design cyberphysical systems, are presented	Киберфизические системы Cyberphysical systems

Продолжение табл. 3 / Continuation of the Table 3

[21]	Представлен подход к обслуживанию строительной техники в бетонной промышленности на основе Интернета вещей An approach to the maintenance of construction machinery in the concreting sector industry is presented	Интернет вещей Internet of Things
[22]	Представлен обзор использования киберфизических систем, основные проблемы на пути их активного внедрения на строительной площадке An overview of application of cyberphysical systems, problems preventing their on-site use are addressed	Киберфизические системы Cyberphysical systems
[23]	Проанализированы интеграция и взаимодействие между новой урбанизацией и развитием новых технологий Индустрии 4.0, в первую очередь, технологий умного города Integration and interaction between new urbanization and development of new technologies, primarily, smart city technologies, within Industry 4.0, are analyzed	Умный город Smart city
[24]	Приведен обзор использования технологий информационного моделирования в Чехии An overview of application of information modeling technologies in the Czech Republic is provided	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[25]	Приведено исследование возможностей технологий информационного моделирования с использованием базовой цифровой платформы iTWO — технологии, которая позволяет использовать интерактивные 3D, 5D и 4D BIM в одном программном обеспечении A study of capacities of information modeling technologies, that take advantage of iTWO digital platform, enabling the co-use of 3D, 5D and 4D BIM within one software package	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[26]	Представлен обзор возможностей дополненной реальности применительно к строительной отрасли The capacity of augmented reality in the construction industry is addressed	Дополненная реальность Augmented reality
[27]	Выполнен обзор развития цифрового производства с использованием цифровых двойников An overview of digital production that takes advantage of digital twins	Цифровые двойники Digital twins
[28]	Презентованы всесторонний обзор актуальной литературы и критический анализ существующих исследований приложений технологии цифровых двойников с целью определения их возможностей для строительной отрасли The article addresses the development of digital production, using digital twins, to assess its applicability in the construction industry	Цифровые двойники / Киберфизические системы Cyberphysical systems
[29]	Показаны научные основы для оценки жизненного цикла (ЖЦ) строительных материалов с помощью информационного моделирования зданий The article demonstrates research fundamentals needed to assess lifecycles of construction materials using BIM	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[30]	Представлен пример использования технологий информационного моделирования при реконструкции железнодорожных путей A case of using information modeling technologies to reconstruct railroad tracks is presented	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[31]	Приведены результаты исследования, подтверждающие возможность интеграции BIM и дополнительной реальности Research findings that confirm the integrability of BIM and augmented reality are provided	Технологии информационного моделирования / Дополненная реальность Information modeling technologies/Augmented reality
[32]	Продемонстрирован подход по повышению уровня автоматизации при производстве строительного оборудования за счет внедрения технологий информационного моделирования The article describes an approach to enhancing construction machine automation by information modeling technologies	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies

Продолжение табл. 3 / Continuation of the Table 3

[33]	Рассмотрен процесс 3D-печати архитектурных элементов произвольной формы The process of 3D printing of architectural elements having arbitrary shapes is considered	3D-печать 3D printing
2020/2020		
[34]	Представлен обзор нескольких практических примеров внедрения 3D-печати за последнее десятилетие и предложены направления для будущих исследований An overview of several practical 3D printing cases that date back to the past decade is made and areas of potential research are outlined	3D-печать 3D printing
[35]	Исследование направлено на проведение критического обзора модульных интегрированных конструкций на основе BIM, также представлены рекомендации по дальнейшим исследованиям в указанной области The research is focused on a critical review of BIM-based integrated modular constructions; recommendations concerning further research are provided	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[36]	Приведены результаты исследования и анализа потенциала колаборативных роботов (CoBots) для строительной отрасли The article has research findings and the potential analysis of CoBots for benefit of the construction industry	Робототехника Robotics
[37]	Исследованы две ситуации реализации применения технологии в строительной отрасли: привязка производительности к генерации производственных данных (KnitCone) и интеграция возможности адаптации производственных данных в реальном времени в ответ на производственные процессы (нейросетевое управление робототехникой) The article addresses two cases of application of the technology in the construction industry: binding capacity to ensure data generation (KnitCone) and integration of adaptability of production data in the real time in response to production processes (using neural networks to control robots)	Машинное обучение / Робототехника Machine learning / Robotics
[38]	Представлен прототип автономного мобильного робота для использования, в том числе, в строительной отрасли, например, для картографирования окружающей среды The article describes a prototype of an autonomous mobile robot applicable in the construction industry for environmental mapping purposes	Робототехника Robotics
[39]	Представлен обзор основных достоинств и недостатков применения технологии Интернета вещей в строительной отрасли The article has an overview of principal strengths and weaknesses of the Internet of Things in the construction industry	Интернет вещей Internet of Things
[40]	Описаны возможности использования виртуальной реальности при проектировании безопасной строительной площадки и ее последующего применения в обучении студентов инженерно-строительного факультета The article describes the capacity of virtual reality used to design a safe construction site and its further application in the process of teaching students of a civil engineering faculty	Дополненная реальность Augmented reality
[41]	Приведено исследование перспектив технологий машинного обучения в строительной отрасли The article addresses a study on the prospects of machine learning in the construction industry	Машинное обучение Machine learning
[42]	Выполнен обзор основных технологий Индустрии 4.0, используемых с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Разработано руководство по развитию знаний и навыков их использования The article is an overview of principal Industry 4.0 technologies used by drones. The guide focused on the development of drone piloting skills is developed	БПЛА Drones

Продолжение табл. 3 / Continuation of the Table 3

[43]	Показана облачная платформа для системы моделирования процесса разложения цементного сырья A cloud platform designated for the system capable of modeling the process of decomposition of cement raw materials	Облачные технологии Cloud technologies
[44]	Выполнен анализ возможности использования 3D-принтеров применительно к транспортному строительству The article addresses the applicability of 3D printers in construction of traffic facilities	3D-печать 3D printing
[45]	Представлен процесс создания интегрированной среды проектирования и производства, поддерживающей 3D-печать, как часть структуры Индустрии 4.0 The article describes the process of creation of an integrated environment for design and production that supports 3D printing as part of Industry 4.0	3D-печать 3D printing
[46]	Статья направлена на определение основных областей исследований, связанных с Интернетом вещей применительно к строительной отрасли The article identifies the main areas of research on the Internet of Things applicable to the construction industry	Интернет вещей Internet of Things
[47]	Приведено исследование, направленное на определение возможностей использования технологий информационного моделирования применительно к умному дому на протяжении всего его ЖЦ The article addresses a study focused on the usability of information modeling technologies in a smart house throughout its lifecycle	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[48]	Показан подход к обоснованию расчета стоимости 3D-печати. Определены основные достоинства 3D-печати относительно традиционного подхода The article addresses the substantiation of 3D printing costs and identifies the main strengths of 3D printing in comparison with a traditional approach	3D-печать 3D printing
[49]	Представлен подход по преобразованию архитектурной геометрии с использованием технологий информационного моделирования в расширенную трехмерную модель, способную связать топологию пластиковой конструкции с технологическими, функциональными и экономическими особенностями The article addresses an approach to the application of information modeling in the transformation of architectural geometry into an expanded 3D model capable of binding the topology of a plastic construction with technological, functional and economic features	Новые строительные материалы / Технологии информационного моделирования New construction materials / Information modeling technologies
[50]	Описаны основные положения по использованию информационного моделирования зданий (BIM) для повышения безопасности труда в строительстве The article describes basic BIM provisions applied to improve occupational safety in the construction industry	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[51]	В целях повышения эффективности управления экологическим мониторингом гаражей в умных городах предложен подход к интеграции технологий WSN и BIM, а также система мониторинга и управления для контроля окружающей среды подземных гаражей The article offers an approach to WSN and BIM technologies integration to improve the management efficiency of the environmental monitoring of garages	Технологии информационного моделирования / Интернет вещей Information modeling technologies / Internet of Things
[52]	Исследование направлено на определение потенциального применения BIM в управлении цепочкой поставок в строительстве The article addresses potential application of BIM to supply chain management in the construction industry	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[53]	Представлено всестороннее наукометрическое исследование, оценивающее состояние современных исследований в области развития технологий искусственного интеллекта The article presents a comprehensive scientometric research that assesses contemporary studies on artificial intelligence technologies	Искусственный интеллект Artificial intelligence

Продолжение табл. 3 / Continuation of the Table 3

[54]	Приведено исследование по определению критериев оценки устойчивости строительства в процессе перехода к Индустрии 4.0 с использованием технологии 3D-печати The article addresses a research on the identification of construction sustainability assessment criteria in transition to Industry 4.0	3D-печать 3D printing
[55]	Обсуждены потенциальные опасности, которые следует учитывать при оценке пригодности БПЛА в качестве робота для применения в строительной отрасли, и даны рекомендации по использованию инструментов распознавания возможных опасностей The article discusses potential hazards to be considered in the assessment of usability of drones as robots applicable in the construction industry and gives recommendations about the use of hazard recognition instruments	БПЛА / Робототехника Drones / Robotics
[56]	Описано использование технологий искусственного интеллекта для определения прочности бетона The article addresses artificial intelligence technologies used to identify the strength of concrete	Искусственный интеллект Artificial intelligence
[57]	Представлен подход к автоматизации производственных процессов строительства с использованием цифровых объектов, созданных с применением технологий информационного моделирования The article presents an approach to automation of construction processes with the help of digital items, produced using information modeling technologies	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[58]	Описано использование технологий Индустрии 4.0 применительно к дорожному строительству в Индии The article describes the application of Industry 4.0 technologies in roadbuilding	Машинное обучение Machine learning
[59]	Показан опыт использования технологии Интернета вещей применительно к строительной отрасли на примере Малайзии The articles addresses the experience of using Internet of Things technologies in the construction industry in Malaysia	Интернет вещей Internet of Things
[60]	Приведен опыт внедрения технологий информационного моделирования с учетом «зеленых» стандартов на примере опыта строительной отрасли Малайзии The article addresses the introduction of information modeling technologies with regard to “green” standards using the case of the construction industry of Malaysia	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[61]	Описано применение технологий информационного моделирования и 3D-сканеров для мониторинга качества строительных конструкций The article describes the application of information modeling and 3D scanning technologies in the monitoring of the quality of building structures	Технологии информационного моделирования 3D-сканер Information modeling technologies/3D scanner
[62]	Показано использование технологий цифровых двойников в производстве строительных материалов и обрабатывающем производстве The article demonstrates the use of digital twin technologies in the production of construction materials and construction processes	Цифровые двойники Digital twins
[63]	Представлены преимущества использования больших данных в строительной отрасли на примере строительных компаний Австралии The article addresses the advantages of big data used in the construction industry exemplified by the construction companies of Australia	Большие данные Big data
[64]	Выполнен анализ возможностей технологии дополненной реальности применительно к строительной отрасли The article analyzes the applicability of augmented reality technologies in the construction industry	Дополненная реальность Augmented reality
[65]	Представлен обзор использования технологии цифровых двойников в строительстве The article has an overview of the digital twin technology used in the construction industry	Цифровые двойники Digital twins

Продолжение табл. 3 / Continuation of the Table 3

[66]	Выполнен обзор текущего состояния внедрения роботов в строительстве и предоставлен список рекомендаций для строительных предприятий The article has an overview of robots that are being introduced into the construction industry and offers a list of recommendations designated for construction companies	Робототехника Robotics
[67]	Представлен подход к моделированию и изготовлению сложных архитектурных элементов из бетона с использованием промышленных роботов при изготовлении опалубки The article presents an approach to the modeling and production of complex architectural elements made of concrete with the help of industrial robots that make the formwork	Робототехника Robotics
[68]	Приведен обобщенный анализ технологий Индустрии 4.0, используемых в строительной отрасли. Представлена структура киберфизической системы для интеграции этих технологий и улучшения общих возможностей организации строительства и управления The article has a generalized analysis of Industry 4.0 technologies used in the construction industry. It offers a structure of a cyberphysical system aimed at the integration of these technologies and enhancement of construction organization and management	Киберфизические системы Cyberphysical systems
[69]	Представлен опыт проектирования и строительства антисейсмического дома на 3D-принтере, на основе которого разработана методология проектирования и производства подобных зданий The article addresses the use of a 3D printer to design and construct an earthquake-resistant building. This case served as the basis for a design and construction methodology	3D-печать 3D printing
[70]	Показана платформа для обеспечения совместной работы роботов с учетом стохастического характера протекания процессов на строительной площадке. Платформа следует за оператором, который несет тяжелые грузы, такие как материалы и оборудование, и останавливается, когда находится рядом с помощником. Система не только избегает препятствия, обнаруживаемые датчиками, но и перемещается благодаря знанию геометрической и семантической информации о строительной площадке. Это достигается за счет перехода между операционной системой робота и данными проекта, содержащимися в информационной модели здания. Предлагаемая система была разработана и протестирована в лаборатории The article describes a platform for the joint operation of robots with regard for the stochastic nature of on-site processes. The platform follows the operator, that carries heavy loads, such as materials and machinery, and stops next to the assistant. Not only does the system bypass obstacles, detected by the sensors; its motion is backed by the awareness of geometric and semantic information about the construction site. This is attainable due to transition between the robot operating system and the project data in the information model of a building	Робототехника / Технологии информационного моделирования Robotics / Information modeling technologies
[71]	Проанализировано совместное использование Интернета вещей и аддитивного производства для создания интеллектуальных производственных систем в Индустрии 4.0 The article addresses the analysis of the co-use of the Internet of Things and additive production aimed at the generation of intelligent production systems within Industry 4.0	Интернет вещей 3D-печать Internet of Things / 3D printing
[72]	Описан процесс совместной работы в среде BIM, который учитывает новый подход к производству и использованию продуктов и включает объекты, субъекты и процессы, интегрированные друг с другом посредством генерации общей информации в непрерывном развитии The article has a description of the process of joint operation in the BIM environment that takes account of the new approach to production and product use, and encompasses items, subjects and processes co-integrated by means of generation of joint information in the course of continuous development	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies

Продолжение табл. 3 / Continuation of the Table 3

[73]	Продемонстрирована на реальном объекте экономия затрат на опалубку за счет использования новых технологий — Интернета вещей The article addresses the reduction of formwork costs due to the application of new technologies, including the Internet of Things	Интернет вещей Internet of Things
2021/2021		
[74]	Представлены особенности разработки производственного оборудования для 3D-печати и проблемы при его внедрении The article addresses features of design of process equipment and problems of its assimilation	3D-печать 3D printing
[75]	Предложена новая многоуровневая модель инкапсуляции знаний, позволяющая с низкими затратами разрабатывать самые разнообразные приложения для управления роботами в рамках парадигмы Индустрии 4.0 The article offers a new multi-level knowledge encapsulation model, enabling the design of varied robot control applications at minimal costs within the framework of the Industry 4.0 paradigm	Робототехника Robotics
[76]	Представлен обзор исследований в области использования цифровых двойников для создания умных городов The article has an overview of studies on digital twins for smart cities	Цифровые двойники Digital twins
[77]	Приведен обзор исследований в области использования технологий информационного моделирования и Интернета вещей. Представлен анализ интеграции BIM-IoT для улучшения процессов управления зданиями (Facility Management). Предложены основные направления в области управления финансовыми ресурсами с учетом сбора актуальных данных The article has an overview of research on the use of information modeling and Internet of Things technologies. It has BIM-IoT integration analysis that serves to improve Facility Management. The article offers financial management techniques based on relevant data collections	Интернет вещей / Технологии информационного моделирования Internet of Things / Information modeling technologies
[78]	Представлено исследование механических свойств нового строительного материала, изготовленного на 3D-принтере The article addresses a study on mechanical properties of a new construction material made using a 3D printer	3D печать / Новые строительные материалы 3D printing / New construction materials
[79]	Представлен анализ взаимосвязи между целями устойчивого развития и потенциалом цифровой революции, в частности технологии информационного моделирования The article analyzes interrelation between sustainable development objectives and the digital revolution potential, in particular, information modeling technologies	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[80]	Показаны результаты исследования взаимодействия между информационным моделированием здания (BIM) и энергетической моделью здания (BEM) The article offers the results of a study on interaction between BIM and BEM	Технологии информационного моделирования Information modeling technologies
[81]	Представлена технология, основанная на концепции Интернета вещей, применение которой возможно на всех этапах ЖЦ модульного строительства для эффективного использования технологий информационного моделирования The article addresses a technology based on the concept of the Internet of Things, whose application is feasible at each stage of the lifecycle of a modular building aimed at the efficient use of information modeling technologies	Интернет вещей / Технологии информационного моделирования Internet of Things Information modeling technologies
[82]	Представлен обзор использования технологии Интернета вещей в различных отраслях, в том числе в строительстве The article has an overview of Internet of Things technologies applied in various industries, including the construction industry	Интернет вещей Internet of Things

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

[83]	Выполнен обзор возможности применения технологии дополненной реальности в строительной отрасли The article offers an overview of the applicability of the augmented reality technology in the construction industry	Дополненная реальность Augmented reality
[84]	Представлен обзор технологии 3D-печати, виды оборудования, которое было разработано и протестировано для демонстрации и коммерческого внедрения и которое может быть использовано в будущем. Показаны преимущества и будущие возможности 3D-печати в строительстве The article addresses a 3D printing technology, types of equipment, designed and tested for the purposes of demonstration and future commercial use	3D-печать 3D printing

Табл. 4. Количество упоминаний технологии в рассматриваемых публикациях

Table 4. Number of references to a technology in the publications under discussion

Технология Technology	Год публикации Publication year					Всего / Total
	2017	2018	2019	2020	2021	
Технологии информационного моделирования Information modeling technologies	2	2	6	11	4	21*/25
3D-печать 3D printing	1	1	1	7	3	10*/13
Интернет вещей Internet of things		2	1	6	3	9*/12
Робототехника Robotics				7	1	7*/8
Дополненная реальность Augmented reality		1	2	2	1	5*/6
Киберфизические системы Cyberphysical systems		1	3	1		5
Цифровые двойники Digital twins			2	2	1	4*/5
Машинное обучение Machine learning				3		3
Искусственный интеллект Artificial intelligence				2		2
БПЛА Drones				2		2
Новые строительные материалы New construction materials				1	1	1*/2
Большие данные Big data				1		1
3D-сканер 3D scanner				1		1
Облачные технологии Cloud technologies				1		1
Умный город Smart city			1			1

Примечание: * — без учета публикаций 2021 года.

Note: * — 2021 publications are disregarded.

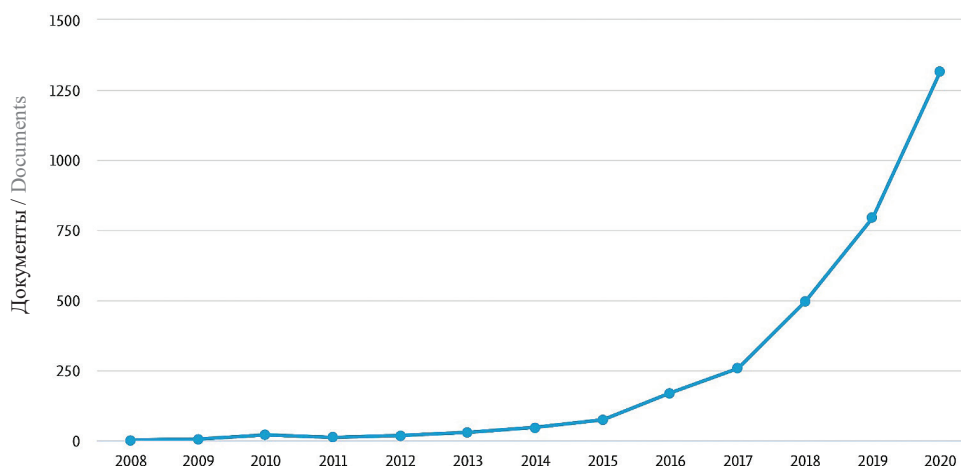


Рис. 8. Ежегодное количество публикаций по ключевому запросу «3D Concrete Printing» в базе Scopus

Fig. 8. Annually published articles listed by the Scopus database in response to the key search query “3D Concrete Printing”

обусловлен тем, что, с одной стороны, данная технология в перспективе позволит решить насущную проблему сокращения доли тяжелого ручного труда в строительстве, а с другой стороны — она способна стать тем драйвером развития, который сегодня необходим ряду других перспективных направлений, обеспечивающих возможность перехода строительного сегмента мировой экономики к модели Индустрии 4.0.

Технология и организация аддитивного строительства описывается в работе [92]. Помимо этого, технология строительной 3D-печати всерьез рассматривается как перспективное направление полной автоматизации строительного производства в таких перспективных сферах человеческой деятельности, как колонизация других планет и спутников Солнечной системы, а в более отдаленной перспективе — и экзопланет. Так, например, в период с 2017 по 2019 гг. NASA проводил конкурс 3D-Printed Habitat Challenge, в рамках которого были отобраны наиболее перспективные технологии автономной строительной 3D-печати для будущих проектов колонизации Марса. В 2019 г. о своих намерениях по использованию технологий строительной 3D-печати при освоении Луны также заявляли в Роскосмосе.

Вместе с тем эффективное внедрение 3D-печати неразрывно связано с технологиями информационного моделирования. Так, например, если на сегодняшний день идея использования BIM для управления ЖЦ объектов на всех его этапах зачастую оказывается сложно реализуема на практике по причине влияния человеческого фактора на этапе строительства, приводящего к возникновению множества отклонений реального объекта от исходной модели, разработанной на стадии проектирования, то возведение здания или сооружения с использованием технологии строительной 3D-печати исключает возможность подобных несоответствий уже по той причине, что принтер способен печатать лишь те конструкции с их геометрическими характеристиками, которые были переданы ему непосредственно из информационной модели будущего объекта.

В настоящее время методология информационного моделирования — наиболее эффективный путь для перехода строительной отрасли на современные промышленные технологии в рамках концепции «Индустрия 4.0». Ключевым специалистом в рамках этой концепции становится профессионал, которого можно назвать «Строитель 4.0», т.е. профессионал, обладающий технологиями уровня четвертой промышленной революции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bahrin M.A.K., Othman M.F., Azli N.H.N., Talib M.F. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic // Science Engineering. 2016. Vol. 78. Pp. 137–143. DOI: 10.11113/jt.v78.9285
2. Nowotarski P., Paslawski J. Industry 4.0 concept introduction into construction SMEs // IOP Conference Series Materials Science and Engineer-

ing. 2017. Vol. 245. P. 052043. DOI: 10.1088/1757-899X/245/5/052043

3. Zabidin N.S., Belayutham S., Ibrahim K.I. A Bibliometric and scientometric mapping of Industry 4.0 in construction // Journal of Information Technology in Construction. 2020. Vol. 25. Pp. 287–307. DOI: 10.36680/jitcon.2020.017

4. Polat L., Erkollar A. Industry 4.0 vs. Society 5.0 // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. Pp. 333–345. DOI 10.1007/978-3-030-62784-3_28
5. Forcael E., Ferrari I., Opazo-Vega A., Pulido-Arcas J.A. Construction 4.0: A literature review // Sustainability. 2020. Vol. 12. P. 9755. DOI: 10.3390/su12229755
6. Иванов Н.А., Веденеев Д.А., Шилова Л.А. Анализ внедрения технологий Индустрии 4.0 в строительную отрасль в РФ // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы : сб. мат. Всеросс. науч. конф. 2019. С. 203–208.
7. Сергеева О.Ю. Индустрия 4.0 как механизм формирования «умного производства» // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2018. Т. 10. № 2. С. 100–113.
8. Жданова Д.Н. Информационные технологии в современном строительстве // Европейские научные исследования : сб. ст. V Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 61–63.
9. Гринюк К.П., Филиппенко Д.А. Перспективы интеллектуального анализа и обработки данных в управлении строительством // Нейро прожект менеджмент: мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 57–59.
10. Халгаева Б.В. Компьютерные технологии в управлении строительными организациями // Сб. мат. I Республиканского фестиваля науки. 2012. С. 83–85.
11. Li J., Yang H. A research on development of construction industrialization based on BIM technology under the background of industry 4.0 // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 100. P. 10002046. DOI: 10.1051/matecconf/201710002046
12. King M. How industry 4.0 and BIM are shaping the future of the construction environment // GIM International. 2017. Vol. 31. Issue 3. Pp. 24–25.
13. Mechtcherine V., Nerella V.N. 3D concrete printing: Potential applications in structural engineering // Concrete Plant and Precast Technology. 2017. Vol. 83. Issue 2. Pp. 44–45.
14. Mahmud S.H., Assan L., Islam R. Potentials of internet of things (IoT) in Malaysian construction industry // Annals of Emerging Technologies in Computing. 2018. Vol. 2. Issue 4. Pp. 44–52.
15. Woodhead R., Stephenson P., Morrey D. Digital construction: From point solutions to IoT ecosystem // Automation in Construction 2018. Vol. 93. Pp. 35–46. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.05.004
16. Correa F.R. Cyber-physical systems for construction industry // Proceedings-2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems, ICPS 2018. Pp. 392–397. DOI: 10.1109/ICPHYS.2018.8387690
17. Mechtcherine V., Nerella V.N. 3D Printing with concrete: State-of-the art, trends, challenges // Bautechnik. 2018. Vol. 95. Issue 4. Pp. 275–287. DOI: 10.1002/bate.201800001
18. Hotový M. Dynamic model of implementation efficiency of Building Information Modelling (BIM) in relation to the complexity of buildings and the level of their safety // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 146. P. 01010. DOI: 10.1051/matecconf/201814601010
19. Schweigkofler A., Monizza G.P., Domi E., Popescu A., Ratajczak J., Marcher C. et al. Development of a digital platform based on the integration of augmented reality and BIM for the management of information in construction processes // Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0. 2018. Pp. 46–55. DOI: 10.1007/978-3-030-01614-2_5
20. Yang Y.-C., Jiang J.-R. Web-based machine learning modeling in a cyber-physical system construction assistant // 2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering, ECICE. 2019. Pp. 478–481. DOI: 10.1109/ECICE47484.2019.8942689
21. Rasmussen N.V., Beliatas M.J. IoT based digitalization and servitization of construction equipment in concrete industry // Global IoT Summit, GIoTTS 2019 – Proceedings. 2019. P. 8766421. DOI: 10.1109/GIoTTS.2019.8766421
22. Yu W., Dillon T., Mostafa F., Rahayu W., Liu Y. Implementation of industrial cyber physical system: Challenges and solutions // 2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems, ICPS 2019. 2019. Pp. 173–178. DOI: 10.1109/ICPHYS.2019.8780271
23. Safiullin A., Krasnyuk L., Kapelyuk Z. Integration of Industry 4.0 technologies for “smart cities” development // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 497. Issue 1. P. 012089. DOI: 10.1088/1757-899X/497/1/012089
24. Pruskova K. Beginning of real wide use of BIM technology in Czech Republic // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 471. Issue 10. P. 102010. DOI: 10.1088/1757-899X/471/10/102010
25. Marton J., Alfaro P.H.G., Harty J. Exploring BIM intelligence further with itwo // WIT Transactions on the Built Environment. 2019. Vol. 192. Pp. 255–267. DOI: 10.2495/BIM190221
26. Nassereddine H., Hanna A., Veeramani D. Exploring the current and future states of augmented reality in the construction industry // International Conference on Construction in the 21st Century. 2019. P. 167077. DOI: 10.1007/978-3-030-48465-1_31
27. Krüger S., Borsato M. Developing knowledge on digital manufacturing to digital twin: A bibliometric and systemic analysis // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 38. Pp. 1174–1180. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.207
28. Kan C., Anumba C.J. Digital twins as the next phase of cyber-physical systems in construction // Computing in Civil Engineering 2019. 2019. DOI: 10.1061/9780784482438.033

29. Zainon N., Lun G.W., Zaid N.S.M., Myeda N.E., Aziz N.M. Developing a framework for life cycle assessment of construction materials through building information modelling (BIM) // *International Journal of Innovation, Creativity and Change*. 2019. Vol. 10. Issue 7. Pp. 253–276.
30. Neves J., Sampaio Z., Vilela M. A case study of BIM implementation in rail track rehabilitation // *Infrastructures*. 2019. Vol. 4. Issue 1. P. 8. DOI: 10.3390/infrastructures4010008
31. Chai C., Mustafa K., Kuppusamy S., Yusof A., Lim C.S., Wai S.H. BIM integration in augmented reality model // *International Journal of Technology*. 2019. Vol. 10. Issue 7. P. 1266. DOI: 10.14716/ijtech.v10i7.3278
32. Schimanski C.P., Marcher C., Toller G., Pasetti Monizza G., Matt D.T. Enhancing automation in the construction equipment industry through implementation of BIM // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2019. Pp. 64–73. DOI 10.1007/978-3-030-30949-7_8
33. Niemelä M., Shi A., Shirowzhan S., Sepasgozar S.M.E., Liu C. 3D printing architectural freeform elements: Challenges and opportunities in manufacturing for industry 4.0 // *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2019*. 2019. Pp. 1298–1304. DOI: 10.22260/isarc2019/0174
34. Sepasgozar S.M.E., Shi A., Yang L., Shirowzhan S., Edwards D.J. Additive manufacturing applications for industry 4.0: A systematic critical review // *Buildings*. 2020. Vol. 10. Issue 12. Pp. 1–35. DOI: 10.3390/buildings10120231
35. Darko A., Chan A.P.C., Yang Y., Tetteh M.O. Building information modeling (BIM)-based modular integrated construction risk management — Critical survey and future needs // *Computers in Industry*. 2020. Vol. 123. P. 103327. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103327
36. Reinhardt D., Haeusler M.H., London K., Locke L., Feng Y., Barata E.D.O. et al. CoBuilt 4.0: Investigating the potential of collaborative robotics for subject matter experts // *International Journal of Architectural Computing*. 2020. Vol. 18. Issue 4. Pp. 353–370. DOI: 10.1177/1478077120948742
37. Thomsen M.R., Nicholas P., Tamke M., Gatz S., Sinke Y., Rossi G. Towards machine learning for architectural fabrication in the age of industry 4.0 // *International Journal of Architectural Computing*. 2020. Vol. 18. Issue 4. Pp. 335–352. DOI: 10.1177/1478077120948000
38. Hajdu C., Hollosi J., Krecht R., Ballagi A., Pozna C.R. Economical mobile robot design prototype and simulation for industry 4.0 applications // 2020 IEEE 3rd International Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE). 2020. DOI: 10.1109/CANDO-EPE51100.2020.9337786.
39. Paul S., Naik B., Kumar Bagal D. Enabling technologies of IoT and challenges in various field of construction industry in the 5G era: A review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 970. Issue 1. P. 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/970/1/012019
40. Spisakova M., Mesaros P., Kaleja P., Mandicak T. Virtual reality as a tool for increasing safety of construction sites // 2020 18th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA). 2020. DOI: 10.1109/ICE-TA51985.2020.9379202
41. Qureshi A.H., Alaloul W.S., Manzoor B., Musarat M.A., Saad S., Ammad S. Implications of machine learning integrated technologies for construction progress detection under industry 4.0 (IR 4.0) // 2020 Second International Sustainability and Resilience Conference: Technology and Innovation in Building Designs (51154). 2020. DOI: 10.1109/IEEECONF51154.2020.9319974
42. Vega L.F.L., Lopez-Neri E., Arellano-Muro C.A., Gonzalez-Jimenez L.E., Ghommam J., Carrasco-Navarro R. UAV Flight instructional design for industry 4.0 based on the framework of educational mechatronics // *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2020. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9255295
43. Ma Z., Yu H., Lu S., Wang X., Liu H. Design and research of simulation system for pre-decomposition process of cement raw materials based on cloud platform // 2020 35th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). 2020. DOI: 10.1109/YAC51587.2020.9337585
44. Krupik P. 3D printers as part of Construction 4.0 with a focus on transport constructions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 867. Issue 1. P. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/867/1/012025
45. Paszkiewicz A., Bolanowski M., Budzik G., Przeszlowski Ł., Oleksy M. Process of creating an integrated design and manufacturing environment as part of the structure of industry 4.0 // *Processes*. 2020. Vol. 8. Issue 9. P. 1019. DOI: 10.3390/PR8091019
46. Ghosh A., Edwards D.J., Hosseini M.R. Patterns and trends in Internet of Things (IoT) research: future applications in the construction industry // *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2020. Vol. 28. Issue 2. Pp. 457–481. DOI: 10.1108/ECAM-04-2020-0271
47. Panteli C., Kylili A., Fokaides P.A. Building information modelling applications in smart buildings: From design to commissioning and beyond A critical review // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 265. P. 121766. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121766
48. Otto J., Kortmann J., Krause M. Cost calculation of concrete 3D printing // *Beton- und Stahlbetonbau*.

2020. Vol. 115. Issue 8. Pp. 586–597. DOI: 10.1002/best.201900087

49. *Diaz-Perete D., Mercado-Colmenero J.M., Valderrama-Zafra J.M., Martin-Doñate C.* New procedure for BIM characterization of architectural models manufactured using fused deposition modeling and plastic materials in 4.0 advanced construction environments // *Polymers*. 2020. Vol. 12. Issue 7. Pp. 1–29. DOI: 10.3390/polym12071498

50. *Fargnoli M., Lombardi M.* Building information modelling (BIM) to enhance occupational safety in construction activities: Research trends emerging from one decade of studie // *Buildings*. 2020. Vol. 10. Issue 6. P. 98. DOI: 10.3390/buildings10060098

51. *Lin Y.-C., Cheung W.-F.* Developing WSN/BIM-Based Environmental monitoring management system for parking garages in smart cities // *Journal of Management in Engineering*. 2020. Vol. 36. Issue 3. P. 04020012. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000760

52. *Sholeh M.N., Nurdiana A., Setiabudi B., Suharjono.* Identification of potential uses of Building Information Modeling (BIM) for construction supply chain management: Preliminary studies // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 448. Issue 1. P. 012064. DOI: 10.1088/1755-1315/448/1/012064

53. *Darko A., Chan A.P.C., Adabre M.A., Edwards D.J., Hosseini M.R., Ameyaw E.E.* Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 112. P. 103081. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103081

54. *Tahmasebinia F., Sepasgozar S.M.E., Shirowzhan S., Niemela M., Tripp A., Nagabhyrava S. et al.* Criteria development for sustainable construction manufacturing in Construction Industry 4.0 // *Construction Innovation*. 2020. Vol. 20. Issue 3. Pp. 379–400. DOI: 10.1108/CI-10-2019-0103

55. *Kas K.A., Johnson G.K.* Using unmanned aerial vehicles and robotics in hazardous locations safely // *Process Safety Progress*. 2020. Vol. 39. Issue 1. P. e12066. DOI: 10.1002/prs.12066

56. *Silva D.L., De Jesus K.L.M., Villaverde B.S., Adina E.M.* Hybrid artificial neural network and genetic algorithm model for multi-objective strength optimization of concrete with Surkhi and buntal fiber // *ACM International Conference Proceeding Series*. 2020. P. 3384617. DOI: 10.1145/3384613.3384617

57. *Al-Saeed Y., Edwards D.J., Scaysbrook S.* Automating construction manufacturing procedures using BIM digital objects (BDOs): Case study of knowledge transfer partnership project in UK // *Construction Innovation*. 2020. Vol. 20. Issue 3. Pp. 345–377. DOI: 10.1109/I4Tech48345.2020.9102669

58. *Shinde R., Nilakhe O., Pondkule P., Karche D., Shendage P.* Enhanced road construction process with ma-

chine learning and blockchain technology // 2020 International Conference on Industry 4.0 Technology (I4Tech). 2020. DOI: 10.1109/I4Tech48345.2020.9102669

59. *Gamil Y., Abdullah A.M., Abd Rahman I., Asad M.M.* Internet of things in construction industry revolution 4.0: Recent trends and challenges in the Malaysian context // *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2020. Vol. 18. Issue 5. Pp. 1091–1102. DOI: 10.1108/JEDT-06-2019-0164

60. *Zulkefli N.S., Mohd-Rahim F.A., Zainon N.* Integrating building information modelling (Bim) and sustainability to greening existing building: Potentials in malaysian construction industry // *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*. 2020. Vol. 11. Issue 3. Pp. 76–83. DOI: 10.30880/ijscet.2020.11.03.008

61. *Nguyen T.A., Nguyen P.T., Do S.T.* Application of BIM and 3D Laser Scanning for Quantity Management in Construction Projects // *Advances in Civil Engineering*. 2020. P. 8839923. DOI: 10.1155/2020/8839923

62. *Gerhard D., Wolf M., Huxoll J., Vogt O.* Digital twin representations of concrete modules in an interdisciplinary context of construction and manufacturing industry // *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. 2020. Vol. 594. Pp. 101–115.

63. *Atuahene B.T., Kanjanabootra S., Gajendran T.* Benefits of big data application experienced in the construction industry: A case of an Australian construction company // *ARCOM 2020 — Association of Researchers in Construction Management, 36th Annual Conference 2020 — Proceedings*. 2020. Pp. 346–355.

64. *Nassereddine H., Hanna A.S., Veeramani D.* Augmented reality in the construction industry: an industry's perspective of its users, phases, and future trends // *Construction Research Congress 2020: Computer Applications — Selected Papers from the Construction Research Congress*. 2020. Pp. 743–752.

65. *El Jazzar M., Piskernik M., Nassereddine H.* Digital twin in construction: An empirical analysis // *EG-ICE 2020 Workshop on Intelligent Computing in Engineering, Proceedings*. 2020. Pp. 501–510.

66. *Hatoum M.B., Nassereddine H.* Developing a framework for the implementation of robotics in construction enterprises // *EG-ICE 2020 Workshop on Intelligent Computing in Engineering, Proceedings*. 2020. Pp. 453–462.

67. *Usmanov V., Fakhri D., Jogl M., Kolář K.* Modelling and manufacturing of complex architectural elements of concrete using industrial robots in formwork fabrication // *Solid State Phenomena*. 2020. Vol. 309 SSP. Pp. 252–260. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.309.252

68. *You Z., Feng L.* Integration of Industry 4.0 Related technologies in construction industry: a framework of cyber-physical system // *IEEE Access*. 2020.

Vol. 8. Pp. 122908–122922. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007206

69. *Cascone P., Laddaga M., Forestiero F.* Digital construction: 3D Printing for Performative Houses // RILEM Bookseries. 2020. Vol. 28. Pp. 804–813. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_79

70. *Follini C., Terzer M., Marcher C., Giusti A., Matt D.T.* Combining the robot operating system with building information modeling for robotic applications in construction logistics // Mechanisms and Machine Science. 2020. Vol. 84. Pp. 245–253. DOI: 10.1007/978-3-030-48989-2_27

71. *Suresh A., Udendhran R., Yamini G.* Internet of things and additive manufacturing: Toward intelligent production systems in industry 4.0 // 2020 EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. 2020. Pp. 73–89. DOI: 10.1007/978-3-030-32530-5_5

72. *Daniotti B., Pavan A., Spagnolo S.L., Caffi V., Pasini D., Mirarchi C.* Collaborative working in a BIM environment (BIM platform) // Springer Tracts in Civil Engineering. 2020. Pp. 71–102. DOI: 10.1007/978-3-030-32889-4_4

73. *Bašková R., Struková Z., Kozlovská M.* Construction cost saving through adoption of IoT applications in concrete works // Proceedings of CEE. 2019. Pp. 452–459. DOI: 10.1007/978-3-030-27011-7_57

74. *Ji-Yeong Y., Kyeong-Tae J., Donghoon L.* Development of 3D concrete extrusion nozzle for producing free-form concrete panels // Turkish Journal of Computer and Mathematics Education. 2021. Vol. 12. Issue 6. Pp. 427–436.

75. *Neythalath N., Søndergaard A., Bærentzen J.A.* Adaptive robotic manufacturing using higher order knowledge systems // Automation in Construction. 2021. Vol. 127. P. 103702. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103702

76. *Sepasgozar S.M.E.* Differentiating digital twin from digital shadow: Elucidating a paradigm shift to expedite a smart, sustainable built environment // Buildings. 2021. Vol. 11. Issue 4. P. 151. DOI: 10.3390/buildings11040151

77. *Mannino A., Dejacco M.C., Re Cecconi F.* Building information modelling and internet of things integration for facility management-literature review and future needs // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 7. P. 3062. DOI: 10.3390/app11073062

78. *Panneerselvam T., Raghuraman S., Vamsi Krishnan N.* Investigating mechanical properties of 3D-printed polyethylene terephthalate glycol material under fused deposition modeling // Journal of the Institution of Engineers (India): Series. 2021. Vol. 102. Issue 2. Pp. 375–387. DOI: 10.1007/s40032-020-00646-8

79. *Vite C., Morbiducci R.* Optimizing the sustainable aspects of the design process through building information modeling // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 6. P. 3041. DOI: 10.3390/su13063041

80. *Porsani G.B., de Lersundi K.D.V., Gutiérrez A.S.-O., Bandera C.F.* Interoperability between building information modelling (Bim) and building energy model (Bem) // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 5. P. 2167. DOI: 10.3390/app11052167

81. *Turner C., Oyekan J., Stergioula L.K.* Distributed manufacturing: A new digital framework for sustainable modular construction // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 3. P. 1515. DOI: 10.3390/su13031515

82. *Malik P.K., Sharma R., Singh R., Gehlot A., Satapathy S.C., Alnumay W.S. et al.* Industrial internet of things and its applications in industry 4.0: State of the art // Computer Communications. 2021. Vol. 166. Pp. 125–139. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.11.016

83. *Nassereddine H., Veeramani A., Veeramani D.* Exploring the current and future states of augmented reality in the construction industry // Advances in Science, Technology and Innovation. 2021. Pp. 185–189. DOI: 10.1007/978-3-030-48465-1_31

84. *Freire T., Brun F., Mateus A., Gaspar F.* 3D Printing technology in the construction industry // Advances in Science, Technology and Innovation. 2021. Pp. 157–167. DOI: 10.1007/978-3-030-35533-3_19

85. *Ginzburg A., Shilov L., Shilova L.* The main trends of computer-aided design systems development // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 050012. DOI: 10.1051/mateconf/201825105001

86. *Ginzburg A., Shilova L., Adamtsevich A., Shilov L.* Implementation of BIM-technologies in Russian construction industry according to the international experience // Journal of Applied Engineering Science. 2016. Vol. 14. Issue 4. Pp. 457–460. DOI: 10.5937/jaes14-12567

87. *Shilova L.A., Sorokina E.A.* The efficiency of using building energy modeling in the construction of high-rise buildings // Materials Science Forum. 2018. Vol. 931. MSF. Pp. 455–460. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.455

88. *Shilov L., Shilova L.* Information modelling of engineering systems as an improvement factor for the energy efficiency of building // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00154. DOI: 10.1051/mateconf/201711700154

89. *Ginzburg A., Shilov L., Shilova L.* The methodology of storing the information model of building structures at various stages of the life cycle // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1425. Issue 1. P. 012156. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012156

90. *Konyagin A., Shilova L.* Development of the software application for the building information models in augmented reality mode visualization // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 698. Issue 6. P. 066010. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066010

91. *Pilyay A., Shilova L.* The use of normative basis for the construction cost for introduction

of 5D BIM in Russia // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Issue 6. P. 062009. DOI: 10.1088/1757-899X/365/6/062009

92. Пустовзар А.П., Адамцевич А.О., Волков А.А. Технология и организация аддитивного строительства // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 9. С. 12–20.

Поступила в редакцию 14 мая 2021 г.

Принята в доработанном виде 21 июня 2021 г.

Одобрена для публикации 2 июля 2021 г.

Об авторах: **Александр Витальевич Гинзбург** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 297453, Scopus: 55910239800, ResearcherID: J-1769-2016, ORCID: 0000-0002-3898-942X; GinAV@mgsu.ru;

Любовь Андреевна Адамцевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; AdamtsevichLA@mgsu.ru;

Алексей Олегович Адамцевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института строительных материалов и технологий; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 645561; AdamtsevichAO@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Bahrin M.A.K., Othman M.F., Azli N.H.N., Talib M.F. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Science Engineering*. 2016; 78:137-143. DOI: 10.11113/jt.v78.9285
2. Nowotarski P., Paslawski J. Industry 4.0 concept introduction into construction SMEs. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2017; 245:052043. DOI: 10.1088/1757-899X/245/5/052043
3. Zabidin N.S., Belayutham S., Ibrahim K.I. A Bibliometric and scientometric mapping of Industry 4.0 in construction. *Journal of Information Technology in Construction*. 2020; 25:287-307. DOI: 10.36680/j.itcon.2020.017
4. Polat L., Erkollar A. Industry 4.0 vs. Society 5.0. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021; 333-345. DOI: 10.1007/978-3-030-62784-3_28
5. Forcael E., Ferrari I., Opazo-Vega A., Pulido-Arcas J.A. Construction 4.0: A literature review. *Sustainability*. 2020; 12:9755.
6. Ivanov N.A., Vedenev D.A., Shilova L.A. Implementation of Industry 4.0 technologies in the construction industry in the Russian Federation. *System engineering in construction. Cyber-physical building systems — 2019: collection of materials of the All-Russian scientific conference*. 2019; 203-208. (rus.).
7. Sergeeva O.Yu. Industry 4.0 As a mechanism for the formation of “smart production”. *Nanotechnology in construction: scientific online journal*. 2018; 10(2):100-113. (rus.).
8. Zhdanova D.N. Information technologies in modern construction. *European scientific research: col-*

- lection of articles of the V International Scientific and Practical Conference. 2020; 61-63. (rus.).
9. Grinyuk K.P., Filippenko D.A. Prospects for data mining and data processing in construction management. *Neuro project management: Materials of the International scientific and practical conference*. 2020; 57-59. (rus.).
10. Khalgaeva B.V. Computer technologies in the management of construction organizations. *Collection of materials of the I Republican festival of science*. 2012; 83-85. (rus.).
11. Li J., Yang H. A research on development of construction industrialization based on BIM technology under the background of industry 4.0. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 100:10002046. DOI: 10.1051/mateconf/201710002046
12. King M. How industry 4.0 and BIM are shaping the future of the construction environment. *GIM International*. 2017; 31(3):24-25.
13. Mechtcherine V., Nerella V.N. 3D concrete printing: Potential applications in structural engineering. *Concrete Plant and Precast Technology*. 2017; 83(2):44-45.
14. Mahmud S.H., Assan L., Islam R. Potentials of internet of things (IoT) in Malaysian construction industry. *Annals of Emerging Technologies in Computing*. 2018; 2(4):44-52.
15. Woodhead R., Stephenson P., Morrey D. Digital construction: From point solutions to IoT ecosystem. *Automation in Construction* 2018. 2018; 93:35-46.
16. Correa F.R. Cyber-physical systems for construction industry. *Proceedings — 2018 IEEE Industrial*

Cyber-Physical Systems, ICPS 2018. 2018; 392-397. DOI: 10.1109/ICPHYS.2018.8387690

17. Mechtcherine V., Nerella V.N. 3D Printing with concrete: State-of-the art, trends, challenges. *Bautechnik*. 2018; 95(4):275-287. DOI: 10.1002/bate.201800001

18. Hotový M. Dynamic model of implementation efficiency of Building Information Modelling (BIM) in relation to the complexity of buildings and the level of their safety. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 146:01010. DOI: 10.1051/mateconf/201814601010

19. Schweigkofler A., Monizza G.P., Domi E., Popescu A., Ratajczak J., Marcher C. et al. Development of a digital platform based on the integration of augmented reality and BIM for the management of information in construction processes. *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0*. 2018; 46-55. DOI: 10.1007/978-3-030-01614-2_5

20. Yang Y.-C., Jiang J.-R. Web-based Machine Learning Modeling in a Cyber-Physical System Construction Assistant. *2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering, ECICE*. 2019; 478-481. DOI: 10.1109/ECICE47484.2019.8942689

21. Rasmussen N.V., Beliatas M.J. IoT based digitalization and servitization of construction equipment in concrete industry. *Global IoT Summit, GIOTS 2019 – Proceedings*. 2019; 8766421. DOI: 10.1109/GIOTS.2019.8766421

22. Yu W., Dillon T., Mostafa F., Rahayu W., Liu Y. Implementation of industrial cyber physical system: Challenges and solutions. *2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems, ICPS 2019*. 2019; 173-178. DOI: 10.1109/ICPHYS.2019.8780271

23. Safiullin A., Krasnyuk L., Kapelyuk Z. Integration of Industry 4.0 technologies for “smart cities” development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 497(1):012089. DOI: 10.1088/1757-899X/497/1/012089

24. Pruskova K. Beginning of Real Wide use of BIM Technology in Czech Republic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 471(10):102010. DOI: 10.1088/1757-899X/471/10/102010

25. Marton J., Alfaro P.H.G., Harty J. Exploring BIM intelligence further with itwo. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2019; 192:255-267. DOI: 10.2495/BIM190221

26. Nassereddine H., Hanna A., Veeramani D. Exploring the current and future states of augmented reality in the construction industry. *International Conference on Construction in the 21st Century*. 2019; 167077. DOI: 10.1007/978-3-030-48465-1_31

27. Krüger S., Borsato M. Developing knowledge on digital manufacturing to digital twin: a bibliometric and systemic analysis. *Procedia Manufacturing*. 2019; 38:1174-1180. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.207

28. Kan C., Anumba C.J. Digital twins as the next phase of cyber-physical systems in construction. *Computing in Civil Engineering 2019*. 2019. DOI: 10.1061/9780784482438.033

29. Zainon N., Lun G.W., Zaid N.S.M., Myeda N.E., Aziz N.M. Developing a framework for life cycle assessment of construction materials through Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Innovation, Creativity and Change*. 2019; 10(7):253-276.

30. Neves J., Sampaio Z., Vilela M. A case study of BIM implementation in rail track rehabilitation. *Infrastructures*. 2019; 4(1):8. DOI: 10.3390/infrastructures4010008

31. Chai C., Mustafa K., Kuppusamy S., Yusof A., Lim C.S., Wai S.H. BIM integration in augmented reality model. *International Journal of Technology*. 2019; 10(7):1266. DOI: 10.14716/ijtech.v10i7.3278

32. Schimanski C.P., Marcher C., Toller G., Pasetti Monizza G., Matt D.T. Enhancing automation in the construction equipment industry through implementation of BIM. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2019; 64-73. DOI: 10.1007/978-3-030-30949-7_8

33. Niemelä M., Shi A., Shirowzhan S., Sepasgozar S.M.E., Liu C. 3D printing architectural freeform elements: Challenges and opportunities in manufacturing for industry 4.0. *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2019*. 2019; 1298-1304. DOI: 10.22260/isarc2019/0174

34. Sepasgozar S.M.E., Shi A., Yang L., Shirowzhan S., Edwards D.J. Additive manufacturing applications for industry 4.0: A systematic critical review. *Buildings*. 2020; 10(12):1-35. DOI: 10.3390/buildings10120231

35. Darko A., Chan A.P.C., Yang Y., Tetteh M.O. Building information modeling (BIM)-based modular integrated construction risk management — Critical survey and future needs. *Computers in Industry*. 2020; 123:103327. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103327

36. Reinhardt D., Haeusler M.H., London K., Loke L., Feng Y., Barata E.D.O. et al. CoBuilt 4.0: Investigating the potential of collaborative robotics for subject matter experts. *International Journal of Architectural Computing*. 2020; 18(4):353-370. DOI: 10.1177/1478077120948742

37. Thomsen M.R., Nicholas P., Tamke M., Gatz S., Sinke Y., Rossi G. Towards machine learning for architectural fabrication in the age of industry 4.0. *International Journal of Architectural Computing*. 2020; 18(4):335-352. DOI: 10.1177/1478077120948000

38. Hajdu C., Hollosi J., Krecht R., Ballagi A., Pozna C.R. Economical mobile robot design prototype and simulation for Industry 4.0 applications. *2020 IEEE 3rd International Conference and Work-*

shop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE). 2020. DOI: 10.1109/CANDO-EPE51100.2020.9337786.

39. Paul S., Naik B., Kumar Bagal D. Enabling technologies of IoT and challenges in various field of construction industry in the 5G Era: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 970(1):012019. DOI: 10.1088/1757-899X/970/1/012019

40. Spisakova M., Mesaros P., Kaleja P., Mandicak T. Virtual reality as a tool for increasing safety of construction sites. *18th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*. 2020. DOI: 10.1109/ICETA51985.2020.9379202

41. Qureshi A.H., Alaloul W.S., Manzoor B., Musarat M.A., Saad S., Ammad S. Implications of machine learning integrated technologies for construction progress detection under industry 4.0 (IR 4.0). *2020 Second International Sustainability and Resilience Conference: Technology and Innovation in Building Designs (51154)*. 2020. DOI: 10.1109/IEEECONF51154.2020.9319974

42. Vega L.F.L., Lopez-Neri E., Arellano-Muro C.A., Gonzalez-Jimenez L.E., Ghommam J., Carrasco-Navarro R. UAV flight instructional design for industry 4.0 based on the framework of educational mechatronics. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2020. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9255295

43. Ma Z., Yu H., Lu S., Wang X., Liu H. Design and research of simulation system for pre-decomposition process of cement raw materials based on cloud platform. *35th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)*. 2020. DOI: 10.1109/YAC51587.2020.9337585

44. Krupik P. 3D printers as part of Construction 4.0 with a focus on transport constructions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 867(1):012025. DOI: 10.1088/1757-899X/867/1/012025

45. Paszkiewicz A., Bolanowski M., Budzik G., Przeszlowski Ł., Oleksy M. Process of creating an integrated design and manufacturing environment as part of the structure of industry 4.0. *Processes*. 2020; 8(9):1019. DOI: 10.3390/PR8091019

46. Ghosh A., Edwards D.J., Hosseini M.R. Patterns and trends in Internet of Things (IoT) research: future applications in the construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2020; 28(2):457-481. DOI: 10.1108/ECAM-04-2020-0271

47. Panteli C., Kylili A., Fokaides P.A. Building information modelling applications in smart buildings: From design to commissioning and beyond A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 265:121766. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121766

48. Otto J., Kortmann J., Krause M. Cost calculation of concrete 3D printing. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2020; 115(8):586-597. DOI: 10.1002/best.201900087

49. Diaz-Perete D., Mercado-Colmenero J.M., Valderrama-Zafra J.M., Martin-Doñate C. New procedure for BIM characterization of architectural models manufactured using fused deposition modeling and plastic materials in 4.0 advanced construction environments. *Polymers*. 2020; 12(7):1-29. DOI: 10.3390/polym12071498

50. Fagnoli M., Lombardi M. Building Information Modelling (BIM) to enhance occupational safety in construction activities: Research trends emerging from one decade of studie. *Buildings*. 2020; 10(6):98. DOI: 10.3390/buildings10060098

51. Lin Y.-C., Cheung W.-F. Developing WSN/BIM-Based environmental monitoring management system for parking garages in smart cities. *Journal of Management in Engineering*. 2020; 36(3):04020012. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000760

52. Sholeh M.N., Nurdiana A., Setiabudi B., Suharjono. Identification of Potential Uses of Building Information Modeling (BIM) for Construction Supply Chain Management: Preliminary Studies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 448(1):012064. DOI: 10.1088/1755-1315/448/1/012064

53. Darko A., Chan A.P.C., Adabre M.A., Edwards D.J., Hosseini M.R., Ameyaw E.E. Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities. *Automation in Construction*. 2020; 112:103081. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103081

54. Tahmasebinia F., Sepasgozar S.M.E., Shirowzhan S., Niemela M., Tripp A., Nagabhyrava S. et al. Criteria development for sustainable construction manufacturing in Construction Industry 4.0. *Construction Innovation*. 2020; 20(3):379-400. DOI: 10.1108/CI-10-2019-0103

55. Kas K.A., Johnson G.K. Using unmanned aerial vehicles and robotics in hazardous locations safely. *Process Safety Progress*. 2020; 39(1):e12066. DOI: 10.1002/prs.12066

56. Silva D.L., De Jesus K.L.M., Villaverde B.S., Adina E.M. Hybrid artificial neural network and genetic algorithm model for multi-objective strength optimization of concrete with Surkhi and Buntal Fiber. *ACM International Conference Proceeding Series*. 2020; 3384617. DOI: 10.1145/3384613.3384617

57. Al-Saeed Y., Edwards D.J., Scaysbrook S. Automating construction manufacturing procedures using BIM digital objects (BDOs): Case study of knowledge transfer partnership project in UK. *Construction Innovation*. 2020; 20(3):345-377. DOI: 10.1109/I4Tech48345.2020.9102669

58. Shinde R., Nilakhe O., Pondkule P., Karche D., Shendage P. Enhanced road construction process with machine learning and blockchain technology. *2020 International Conference on Industry 4.0 Technology (I4Tech)*. 2020. DOI: 10.1109/I4Tech48345.2020.9102669

59. Gamil Y., Abdullah A.M., Abd Rahman I., Asad M.M. Internet of things in construction industry revolution 4.0: Recent trends and challenges in the Malaysian context. *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2020; 18(5):1091-1102. DOI: 10.1108/JEDT-06-2019-0164
60. Zulkefli N.S., Mohd-Rahim F.A., Zainon N. Integrating building information modelling (Bim) and sustainability to greening existing building: Potentials in Malaysian construction industry. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*. 2020; 11(3):76-83. DOI: 10.30880/ijscet.2020.11.03.008
61. Nguyen T.A., Nguyen P.T., Do S.T. Application of BIM and 3D laser scanning for quantity management in construction projects. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 8839923. DOI: 10.1155/2020/8839923
62. Gerhard D., Wolf M., Huxoll J., Vogt O. Digital twin representations of concrete modules in an interdisciplinary context of construction and manufacturing industry. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. 2020; 594:101-115.
63. Atuahene B.T., Kanjanabootra S., Gajendran T. Benefits of big data application experienced in the construction industry: A case of an Australian construction company. *ARCOM 2020 – Association of Researchers in Construction Management, 36th Annual Conference 2020 – Proceedings*. 2020; 346-355.
64. Nassereddine H., Hanna A.S., Veeramani D. Augmented reality in the construction industry: an industry's perspective of its users, phases, and future trends. *Construction Research Congress 2020: Computer Applications — Selected Papers from the Construction Research Congress*. 2020; 743-752.
65. El Jazzer M., Piskernik M., Nassereddine H. Digital twin in construction: An empirical analysis. *EG-ICE 2020 Workshop on Intelligent Computing in Engineering, Proceedings*. 2020; 501-510.
66. Hatoum M.B., Nassereddine H. Developing a framework for the implementation of robotics in construction enterprises. *EG-ICE 2020 Workshop on Intelligent Computing in Engineering, Proceedings*. 2020; 453-462.
67. Usmanov V., Fakhri D., Jogi M., Kolář K. Modelling and manufacturing of complex architectural elements of concrete using industrial robots in formwork fabrication. *Solid State Phenomena*. 2020; 309 SSP:252-260. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.309.252
68. You Z., Feng L. Integration of industry 4.0 related technologies in construction industry: a framework of cyber-physical system. *IEEE Access*. 2020; 8:122908-122922. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007206
69. Cascone P., Laddaga M., Forestiero F. Digital construction: 3D Printing for Performative Houses. *RILEM Bookseries*. 2020; 28:804-813. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_79
70. Follini C., Terzer M., Marcher C., Giusti A., Matt D.T. Combining the robot operating system with building information modeling for robotic applications in construction logistics. *Mechanisms and Machine Science*. 2020; 84:245-253. DOI: 10.1007/978-3-030-48989-2_27
71. Suresh A., Udendhran R., Yamini G. Internet of things and additive manufacturing: Toward intelligent production systems in industry 4.0. *2020 EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*. 2020; 73-89. DOI: 10.1007/978-3-030-32530-5_5
72. Daniotti B., Pavan A., Spagnolo S.L., Caffi V., Pasini D., Mirarchi C. Collaborative working in a BIM Environment (BIM Platform). *Springer Tracts in Civil Engineering*. 2020; 71-102. DOI: 10.1007/978-3-030-32889-4_4
73. Bašková R., Struková Z., Kozlovská M. Construction cost saving through adoption of IoT applications in concrete works. *Proceedings of CEE*. 2019; 452-459. DOI: 10.1007/978-3-030-27011-7_57
74. Ji-Yeong Y., Kyeong-Tae J., Donghoon L. Development of 3D concrete extrusion nozzle for producing free-form concrete panels. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*. 2021; 12(6):427-436.
75. Neythalath N., Søndergaard A., Bærentzen J.A. Adaptive robotic manufacturing using higher order knowledge systems. *Automation in Construction*. 2021; 127:103702. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103702
76. Sepasgozar S.M.E. Differentiating digital twin from digital shadow: Elucidating a paradigm shift to expedite a smart, sustainable built environment. *Buildings*. 2021; 11(4):151. DOI: 10.3390/buildings11040151
77. Mannino A., Dejacco M.C., Re Cecconi F. Building information modelling and internet of things integration for facility management-literature review and future needs. *Applied Sciences*. 2021; 11(7):3062. DOI: 10.3390/app11073062
78. Panneerselvam T., Raghuraman S., Vamsi Krishnan N. Investigating mechanical properties of 3D-Printed polyethylene terephthalate glycol material under fused deposition modeling. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series*. 2021; 102(2):375-387. DOI: 10.1007/s40032-020-00646-8
79. Vite C., Morbiducci R. Optimizing the sustainable aspects of the design process through building information modeling. *Sustainability*. 2021; 13(6):3041. DOI: 10.3390/su13063041
80. Porsani G.B., de Lersundi K.D.V., Gutierrez A.S.-O., Bandera C.F. Interoperability between Building Information Modelling (BIM) and Building Energy Model (BEM). *Applied Sciences*. 2021; 11(5):2167. DOI: 10.3390/app11052167
81. Turner C., Oyekan J., Stergioula L.K. Distributed manufacturing: A new digital framework for sustainable modular construction. *Sustainability*. 2021; 13(3):1515. DOI: 10.3390/su13031515
82. Malik P.K., Sharma R., Singh R., Gehlot A., Satapathy S.C., Alnumay W.S. et al. Industrial internet of things and its applications in industry 4.0: state

of the art. *Computer Communications*. 2021; 166:125-139. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.11.016

83. Nassereddine H., Veeramani A., Veeramani D. Exploring the current and future states of augmented reality in the construction industry. *Advances in Science, Technology and Innovation*. 2021; 185-189. DOI: 10.1007/978-3-030-48465-1_31

84. Freire T., Brun F., Mateus A., Gaspar F. 3D Printing technology in the construction industry. *Advances in Science, Technology and Innovation*. 2021; 157-167. DOI: 10.1007/978-3-030-35533-3_19

85. Ginzburg A., Shilov L., Shilova L. The main trends of computer-aided design systems development. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:050012. DOI: 10.1051/mateconf/201825105001

86. Ginzburg A., Shilova L., Adamtsevich A., Shilov L. Implementation of BIM-technologies in Russian construction industry according to the international experience. *Journal of Applied Engineering Science*. 2016; 14(4):457-460. DOI: 10.5937/jaes14-12567

87. Shilova L.A., Sorokina E.A. The efficiency of using building energy modeling in the construction of high-rise buildings. *Materials Science Forum*. 2018; 931 MSF:455-460. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.455

88. Shilov L., Shilova L. Information modelling of engineering systems as an improvement factor for the energy efficiency of building. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00154. DOI: 10.1051/mateconf/201711700154

89. Ginzburg A., Shilov L., Shilova L. The methodology of storing the information model of building structures at various stages of the life cycle. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1425(1):012156. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012156

90. Konyagin A., Shilova L. Development of the software application for the building information models in augmented reality mode visualization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 698(6):066010. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066010

91. Pilyay A., Shilova L. The use of normative basis for the construction cost for introduction of 5D BIM in Russia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365(6):062009. DOI: 10.1088/1757-899X/365/6/062009

92. Pustovgar A.P., Adamtsevich A.O., Volkov A.A. Technology and organization of additive construction. *Industrial and Civil Construction*. 2018; 9:12-20. (rus.).

Received May 14, 2021.

Adopted in revised form on June 21, 2021.

Approved for publication on July 2, 2021.

BIONOTES: **Alexander V. Ginzburg** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 297453, Scopus: 55910239800, ResearcherID: J-1769-2016, ORCID: 0000-0002-3898-942X; GinAV@mgsu.ru;

Liubov A. Adamtsevich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; AdamtsevichLA@mgsu.ru;

Aleksey O. Adamtsevich — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Research Institute of Building Materials and Technologies; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 645561; AdamtsevichLA@mgsu.ru.

Использование инновационных технологий устройства стеновых покрытий с модульными системами озеленения

Е.А. Король, Н.С. Шушунова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Современными задачами строительства являются минимизация воздействия строительных процессов на окружающую среду, рациональное потребление природных ресурсов для строительства и использование новых «зеленых» технологий. Рассмотрены конструктивно-технологические параметры устройства стеновых покрытий с различными системами озеленения. В настоящее время недостаточно изучены проблемы, связанные с исследованием конструктивно-технологических параметров при устройстве нетрадиционных энергосберегающих инженерных систем. Цель исследования состоит в разработке новых конструктивно-технологических технологий стеновых покрытий с системами озеленения, позволяющих выполнить систематизацию различных конструктивно-технологических решений.

Материалы и методы. Применены методы сравнительного анализа вариантов вертикальных систем озеленения и методы графического моделирования различных систем озеленения. По результатам сравнения этих систем произведен выбор наилучшей из них по следующим параметрам: доступность в организации, удобство в эксплуатации и снижение шумового воздействия. Проведен анализ научно-технических исследований отечественных и зарубежных ученых в области технологий «зеленого» строительства применительно к устройству стеновых покрытий с системами озеленения, конструктивно-технологических параметров при устройстве таких покрытий.

Результаты. В результате анализа конструктивно-технологических параметров при устройстве стеновых покрытий с различными системами озеленения выявлены наиболее экологичные и эффективные варианты систем вертикального озеленения. Предложено инновационное решение устройства покрытий с модульными системами озеленения.

Выводы. В области технологий «зеленого» строительства имеется необходимость в разработке новых стандартов, которые охватывают процессы проектирования и строительства с подробным описанием конструктивно-технических характеристик. Установлено, что по основным показателям эффективности технологических решений инновационная система стеновых покрытий с модульными системами озеленения из биопластика является лучшим техническим решением.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вертикальное озеленение, конструктивно-технологические параметры, технологии «зеленого» строительства, устойчивое развитие, модули «зеленых» стен, системы озеленения, «зеленые» покрытия, инновационные технологические решения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Король Е.А., Шушунова Н.С. Использование инновационных технологий устройства стеновых покрытий с модульными системами озеленения // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 912–925. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.912-925

Use of innovative technologies of wall covering devices with modular greening systems

Elena A. Korol, Natalia S. Shushunova

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

ABSTRACT

Introduction. The study provides design and technological parameters for wall coverings with various landscaping systems. At present, the problems associated with the study of design and technological parameters in the construction of non-traditional energy-saving engineering systems have not been sufficiently studied. The purpose of the study is to develop new constructive and technological technologies for wall coverings with landscaping systems, which make it possible to systematize various constructive and technological solutions. In accordance with this goal, the following tasks have been formulated: analysis of scientific and technical research of domestic and foreign scientists in the field of green building technologies in relation to the device of wall coverings with landscaping systems; analysis of design and technological parameters for the construction of such coatings.

Materials and methods. The study used methods of comparative analysis and methods of graphic modeling.

Results. On the basis of the study carried out, an analysis of the design and technological parameters for the installation of wall coverings with various landscaping systems was carried out, and the most environmentally friendly and effective options for vertical gardening systems were identified.

Conclusions. Based on the results of the study, it can be concluded that in the field of green building technologies, there is a need to develop new standards that cover the design and construction processes with a detailed description of the design and technical characteristics. On the basis of the analysis of the design and technological parameters for the installation of wall coverings with various greening systems, it was found that, according to the main indicators of the effectiveness of technological solutions, an innovative system of wall coverings with modular greening systems made of bioplastic is the best technical solution.

KEYWORDS: vertical gardening, design and technological parameters, green building technologies, sustainable development, green wall modules, landscaping systems, green coatings, innovative technological solutions

FOR CITATION: Korol E.A., Shushunova N.S. Use of innovative technologies of wall covering devices with modular greening systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(7):912-925. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.912-925 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования определяется тем, что в настоящее время в практике современного строительства увеличиваются объемы применения новых «зеленых» технологий, в том числе на фасадах зданий с использованием систем озеленения. Системы озеленения зданий — один из методов «зеленого» строительства, позволяющих эффективно использовать доступное для озеленения пространство.

В современном мире важна проблема сохранения экологически благоприятной среды из-за ускоренной урбанизации. Последствия глобального роста населения и застроенных территорий становятся критичными: нехватка зеленых насаждений в крупных городах, глобальное потепление, увеличение шумового загрязнения, ухудшение качества воздуха, чрезмерное потребление электроэнергии и водных ресурсов — все это негативно сказывается на физическом и психологическом здоровье городского населения. Так, по данным ВОЗ, чрезмерное шумовое воздействие ухудшает слух, способствует развитию заболеваний сердечно-сосудистой системы, снижает работоспособность человека и даже уровень жизни на 10–12 лет; грязный воздух провоцирует возникновение рака легких, острых респираторных заболеваний. Исследования показывают, что строительный сектор экономики на всех этапах жизненного цикла строительства и эксплуатации зданий оказывает мощное негативное влияние на окружающую среду: является причиной появления 50 % парниковых газов, вызывая глобальное потепление; 40 % загрязнений питьевой воды; 24 % загрязнений воздуха и 50 % вредных газовых выбросов, включая соединения диоксида, хлорфторуглерода и парниковых газов [1]. В мировом масштабе для строительства и использования зданий потребляется 40 % ресурсов, 12 % запасов питьевой воды, 55 % продукции лесного хозяйства, 40 % сырья и производится 45–65 % мировых отходов [2]. Причем во всем мире, особенно в развивающихся странах, необходимость в строительстве нового жилья постоянно растет пропорционально росту численности населения, включая более широкое применение отопления, охлаждения и вентиляции. В ходе стро-

ительства уничтожаются леса, зеленые насаждения, повреждаются экосистемы, и окружающая среда становится все менее пригодной для проживания. С другой стороны, рост благосостояния населения требует обеспечения комфортных условий проживания и высокого качества жизни на основе экологически чистой и здоровой окружающей среды. Таким образом, решение описанной дилеммы невозможно без учета концепции «зеленого» строительства. Создание экономической модели позволяет оценить риски в системах управления строительным производством в условиях развития биоэкономики [3].

Вследствие выявленных проблем, современными задачами строительства являются минимизация воздействия строительных процессов на окружающую среду, рациональное потребление природных ресурсов для строительства и использование новых «зеленых» технологий. Многие страны ЕС взяли курс на экологичное строительство, принимаются национальные проекты (Национальный проект «Экология» в России, программа действий Европейского сообщества в области окружающей среды), в Германии ввели пользование экосистемными услугами — «зелеными» урбанистическими пространствами, благодаря которым городские жители получают большие выгоды с точки зрения общественного здоровья [4]. Преимущества для городских жителей, имеющих доступ к «зеленым» урбанистическим пространствам, включают снятие стресса, психологическое расслабление, уменьшение психических расстройств и улучшение физической активности, что способствует оздоровлению, предоставляя возможность для различных форм отдыха. Кроме того, «зеленые» урбанистические пространства снижают шумовое загрязнение от дорожного движения и другой деятельности человека за счет поглощения растениями различных видов загрязнений, отражения и преломления звуковых волн.

В Норвегии в результате действий природоохранных организаций «Природа и молодежь» и «Зеленые войны Норвегии» удалось достичь значительного сокращения использования химических добавок и сброса отходов на 70 % до 1,2 млн т в год. Положительные изменения заметны и в других странах — вносятся поправки на законодательном уровне. Так, в 2017 г. в Сан-Франциско (Калифор-

ния) был принят закон, согласно которому, в объектах нового строительства должны быть запроектированы «зеленые» крыши; годом ранее, в 2016 г., аналогичный закон ввели во Франции — все здания, построенные в коммерческих зонах, должны быть частично покрыты растениями или солнечными панелями [5].

Известные международные компании уделяют особое внимание вопросам охраны окружающей среды, в основе их глобальной экологической политики лежит принцип: «Мы должны вести бизнес так, чтобы сохранить и защитить окружающую среду», заботясь об эффективном использовании пресной воды, вторичной переработке отходов упаковки и энергосбережении. К примеру, компания Coca-Cola осуществляет ряд природоохранных проектов в России, среди которых — проект «Зеленые вузы» по развитию экологических инициатив в российских вузах. Интерес к новым технологиям, формирующим пространство урбанистической среды с устройством «зеленых» покрытий, оказывающим влияние на эффект глобального потепления, растет во многих развитых странах высокими темпами, принципы моральной ответственности «зеленых» зданий создают благоприятную среду для здоровья и благополучия населения [6–8]. Однако следует заметить, что исследований по применению современных систем стеновых покрытий с системами озеленения не так много, в основном такие исследования связаны с изучением параметров микроклимата вблизи зданий [9–12]. В ситуации острой нехватки зеленых пространств в городах количество парниковых газов, поступающих в атмосферу, превосходит количество преобразованных растениями. Ежегодно потребность в кислороде для одного человека может быть выработана за счет одного дерева с кроной диаметром 5 м, что аналогично 40 м² «зеленых» покрытий стен, при этом значительно улучшается качество воздуха — снижается количество летучих органических соединений, происходит ионизация воздуха вблизи здания [13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для внедрения технологий «зеленого» строительства требуется комплексный подход в оценке исследовательских проектов [14–23]. В данном исследовании были применены методы сравнительного анализа вариантов вертикальных систем озеленения и методы графического моделирования различных систем озеленения. По результатам сравнения этих систем произведен выбор наилучшей из них по следующим параметрам: доступность в организации, удобство в эксплуатации и снижение шумового воздействия. С целью оценки экологической эффективности новых и существующих зданий по различным критериям используются системы «зеленых стандартов» [24–28]. В настоящей работе

также подробно представлен анализ конструктивных систем озеленения стен.

В зависимости от системы озеленения основными составляющими «зеленых» стен могут являться: растения; субстрат; опорные элементы, вокруг которых разрастаются растения; система полива, доставляющая воду и удобрения.

По принципу устройства современные системы озеленения стен бывают:

- войлочные (гидропонные системы);
- модульные (с использованием субстрата);
- контейнерные (высадка в горшки).

Системы гидропонных «зеленых» стен устанавливаются с помощью кронштейнов, которые выходят из несущей стены (или отдельно стоящей конструкции), чтобы создать воздушный зазор между стенами (или другой конструкцией) и опорный лист системы зеленых стен. В гидропонной системе предусмотрена инертная среда для выращивания растений: садовая пена, минеральное волокно или войлочный мат. Эти материалы могут действовать как влагоудерживающая губка, хотя, чем больше они впитывают, тем тяжелее становится система. Преимущество гидропонной системы состоит в том, что отсутствует структурный распад среды для выращивания, нет накопления солей из удобрений, присутствует контролируемая система подачи питательных веществ. Примером такой системы гидропонных «зеленых» стен является One PNC Plaza в Питтсбурге, Trio Apartments в Сиднее, Athenaeum Hotel в Лондоне и B3 Hotel Virrey в Боготе (рис. 1).

В модульных системах «зеленых» стен используются контейнеры для субстрата из пластика или металла. Субстрат упаковывается непосредственно в пустой контейнер или помещается в водопроницаемый мешок из синтетического волокна. Контейнеры соединяются вместе и крепятся к стене или к независимой, конструктивно надежной металлической стойке или каркасу. Как вариант, пластиковые или металлические контейнеры для выращивания можно повесить на металлическую решетку, прикрепленную к стене. Отдельные модули возможно снимать для пересадки растений в процессе эксплуатации стен. Большинство модульных систем предназначены для автоматического полива, как и системы гидропонных «зеленых» стен.

Среда для выращивания растений в этих системах обеспечивает структурную поддержку растений и облегчает доступ к воде, воздуху и питательным веществам, уменьшая потребность в постоянном управлении, связанном с гидропонными системами. Однако со временем запас питательных веществ будет исчерпан, и в питательной среде может образоваться накопление солей. Традиционная почвенная смесь не является подходящим субстратом для таких систем «зеленых» стен. Среди наиболее известных зданий с применением модульных систем «зе-

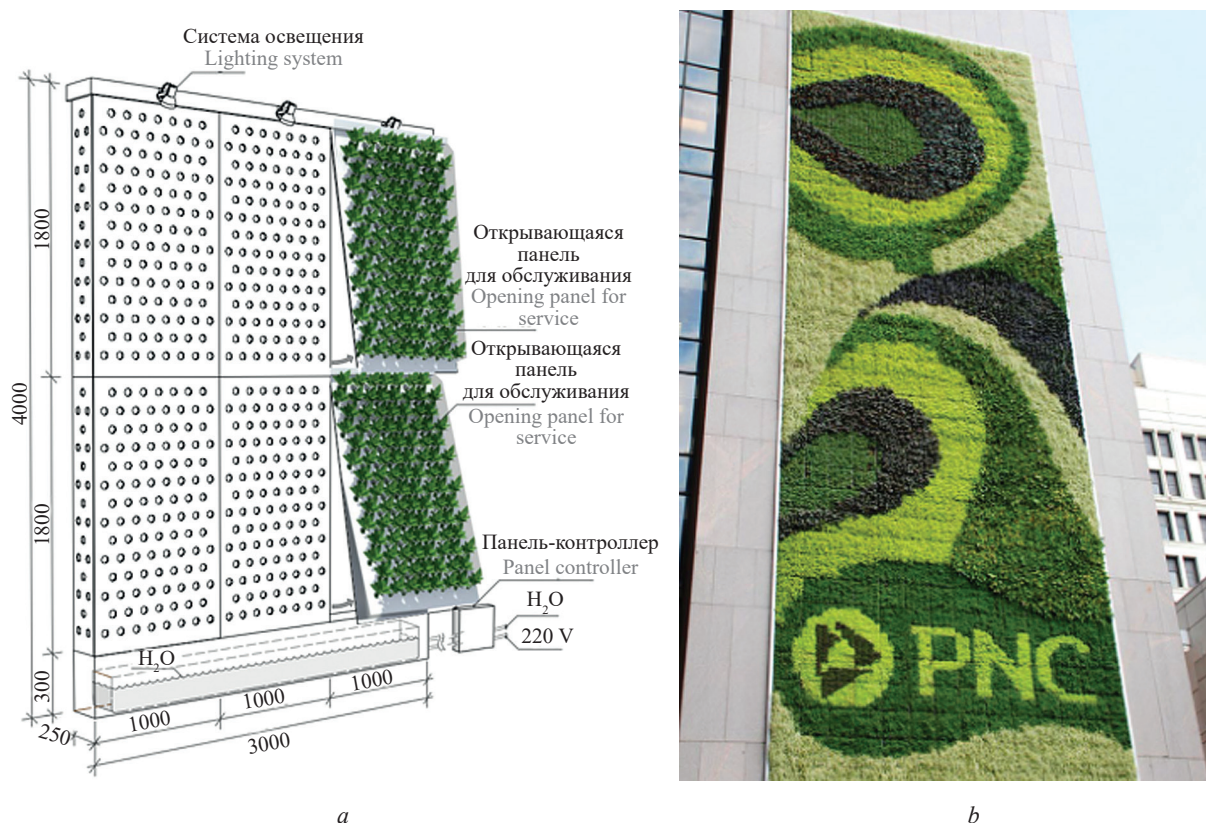


Рис. 1. Конструктивно-технологическое решение гидропонных «зеленых» стен: *a* — устройство панелей гидропонных «зеленых» стен; *b* — арт-объект из панелей гидропонных «зеленых» стен в Питтсбурге

Fig. 1. Constructive and technological solution of hydroponic green walls: *a* — installation of panels of hydroponic green walls; *b* — an art object from panels of hydroponic green walls in Pittsburgh

ленных» стен — здание Acros в г. Фукуока в Японии, Solaris и Parkroyal в Сингапуре (рис. 2).

Основа конструкции в контейнерной системе «зеленых» стен — несущий гидроизолированный металлический каркас, который подразделяется на три вида: каркасная сетка, встроенный каркасный стеллаж, переносной каркасный стеллаж с направляющими горшков с почвенным субстратом, которые способствуют высаживанию растения. Для каждого горшка проводится личная оросительная трубка для подачи воды и удобрений. Как правило, система полива подключается к системе водоснабжения и канализации. Конструктивно-технологические особенности устройства всех перечисленных выше конструктивных систем «зеленых» стен представлены на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе анализа различных систем вертикального озеленения составили таблицу, характеризующую основные ее структурные элементы (табл.).

Таким образом, самой удобной в устройстве и доступной в организации системой вертикального озеленения служит контейнерная система. На ее установку потребуется меньше всего подготовительных работ, она состоит из доступных компонентов; горшки хорошо перемещаются для смены

по архитектурно-дизайнерскому решению; каркасную сетку можно убрать в любой момент в случае необходимости. Самый большой недостаток этой системы — высокие трудозатраты на эксплуатационный уход, необходимо постоянно следить за питательными свойствами грунта, удобрять его и проверять на наличие насекомых.

С точки зрения экономической эффективности наиболее целесообразный вариант — войлочная (гидропонная) технология. Такая система удобна при эксплуатации, она включает в себя автоматическую систему полива и подвода удобрений, что облегчает уход за растениями. Недостаток этой системы состоит в том, что она не подвергается изменениям, соответственно, невозможно изменить вид стены или фасада, нужно производить полный демонтаж системы.

Наиболее эргономичной и удобной в эксплуатации является модульная система «зеленых» стен, она, так же как и войлочная система, основана на гидропонном методе полива, что дает ей превосходство над контейнерной технологией озеленения. К тому же модульная система «зеленых» стен очень хорошо подвержена структурным преобразованиям и различным модификациям — модули можно легко менять местами, заполнять другими растениями или демонтировать с фасада. Нет проблем с грун-

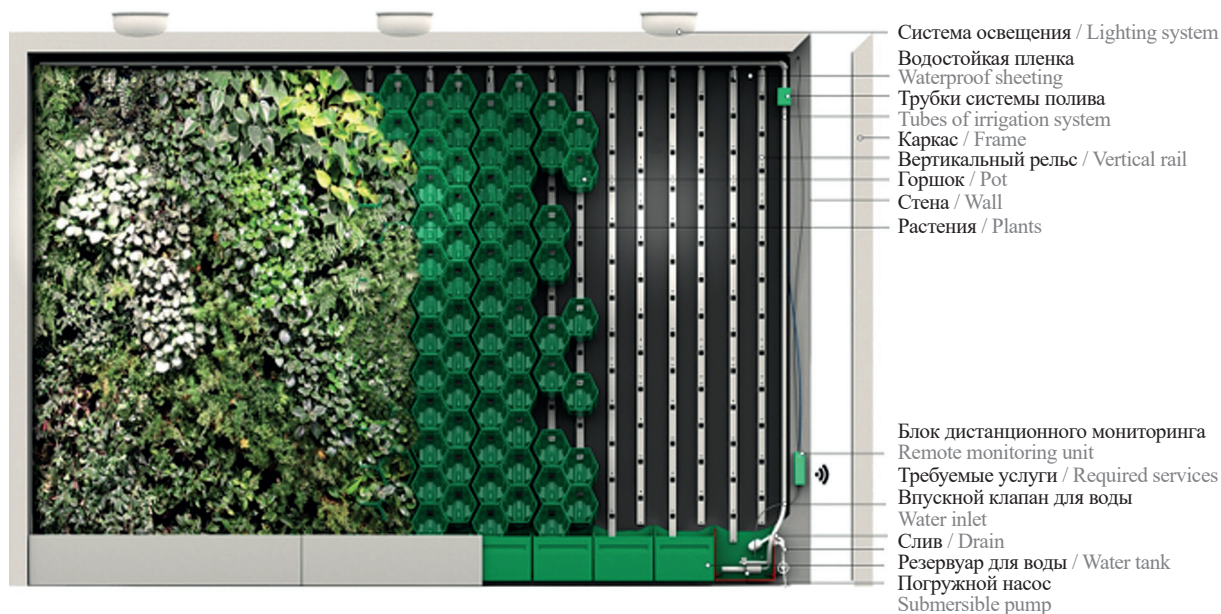


Рис. 2. Конструктивно-технологическое решение модульных «зеленых» стен

Fig. 2. Constructive and technological solution of modular green walls

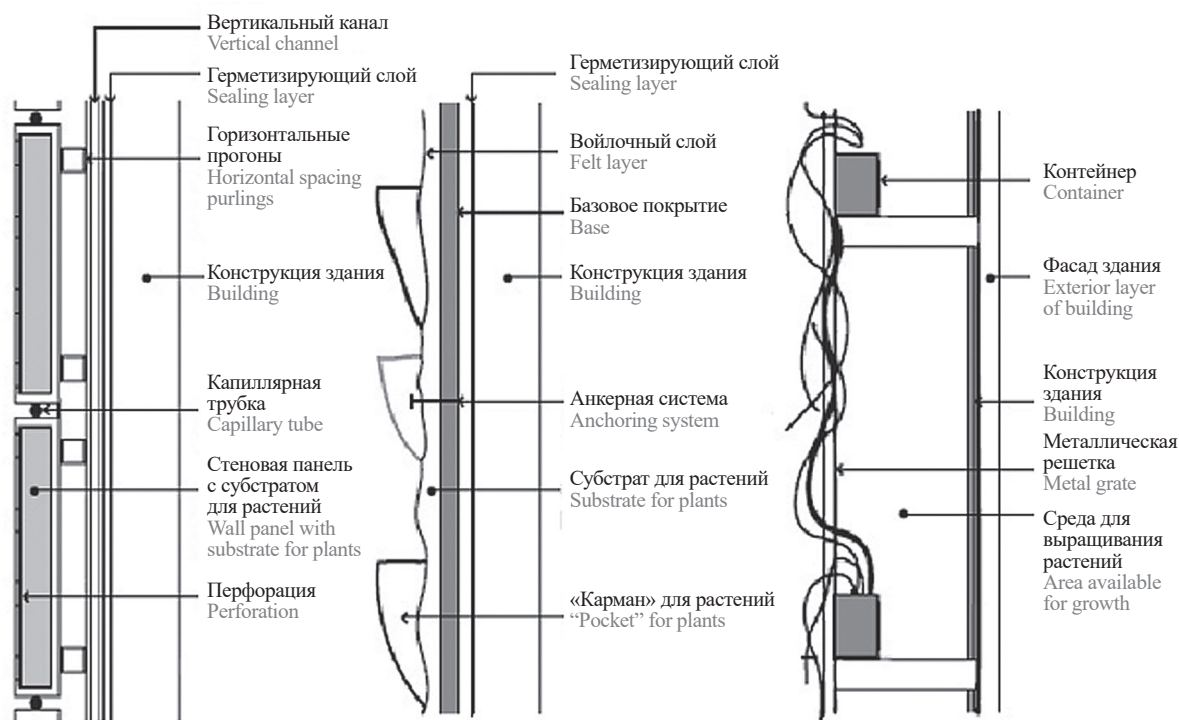


Рис. 3. Конструктивно-технологические особенности устройства «зеленых» стен: а — модульные (с использованием субстрата); б — войлочные (гидропонные системы); в — контейнерные (высадка в горшки)

Fig. 3. Constructive and technological features of the device “green” walls: а — modular (using a substrate); б — felt (hydroponic systems); в — container (planting in pots)

том, так как в модулях находится специальный субстрат. Единственный недостаток данной технологии — высокая стоимость всей системы. Авторами разработана инновационная технология устройства стеновых покрытий с модульными системами озеленения, которая не только удобна в процессе монтажа и эксплуатации, но и лучше по показателям эконо-

мической эффективности и экологичности, так как модули выполнены из экологичного вида пластика (рис. 4). Применяемые для полива резервуары изготовлены из переработанного пластика, а модули стеновых покрытий — из биопластика. Этот новый материал для облицовки фасадов — термоформованный, производят в основном из возобновляе-

Сравнительная характеристика устройства различных систем «зеленых» стен

Comparative characteristics of the device of various systems of the green walls

Критерий сравнения/Система «зеленых» стен Comparison Criterion/ Green Wall System	Войлочная система Felt system	Модульная система Modular system	Контейнерная система Container system
Способ монтажа Mounting method	Войлочные карманы Felt pockets	Заготовленные модули Prepared modules	Контейнеры Containers
Система дренажа Drainage system	Гидропонная Hydroponic	Гидропонная Hydroponic	Система труб, приведенная к системе водоснабжения Pipe system connected to the water supply system
Система полива Irrigation system	Полив осуществляется Watering is carried out	Автоматическая система полива Automatic watering system	Полив не осуществляется Watering isn't carried out
Возможность изменения конструкции Possibility of changing the design	Конструкцию невозможно изменить, нужно производить демонтаж The design cannot be changed, you need to dismantle	Изменение конструкции посредством перестановки модулей Modification of design by rearranging modules	Изменение конструкции посредством перемещения контейнеров Modifying design by moving containers
Эксплуатационный уход Operational care	Легкий Easy	Легкий Easy	Сложный Difficult
Субстрат (растительная среда) Substrate (growing medium)	Инертная растительная среда, например садовая пена, минеральное волокно или войлочная подстилка Inert growing media such as garden foam, mineral wool or felt mat	Гидропонный или на основе субстрата, который упаковывается непосредственно в пустую емкость Hydroponic or substrate based which is packed directly into an empty container	Субстрат, который упаковывается непосредственно в пустую емкость Substrate that is packed directly into an empty container

мых источников (на 90 %). Разработанный компанией Tesnago в рамках исследовательского проекта Arboblend особый тип гранул биопластика экструдируется в листы для модулей «зеленых» стен, которые затем обрабатывают для достижения высокого качества структуры поверхности и изготавливают формованные детали. Материал пригоден для вторичной переработки и соответствует высоким стандартам прочности и воспламеняемости строительных материалов. Экологический аудит материала стен из биопластика проведен компанией ISWA (Институт водоснабжения, качества воды и управления отходами). Кроме того, была определена устойчивость материала к микробной деградации.

Опыт разработок отечественных и зарубежных ученых в области энергоэффективного строительства позволяет применять новые энергосберегающие и ресурсосберегающие конструктивные решения для общественных зданий [29–37].

Исходя из анализа научно-технических исследований отечественных и зарубежных ученых в области технологий «зеленого» строительства применительно к устройству систем вертикального озеленения,

следует заметить, что применение таких покрытий не регламентировано существующей нормативно-технической базой.

В результате проведенного исследования систем вертикального озеленения:

- рассмотрены и проанализированы различные системы устройства вертикального озеленения;
- составлена сравнительная характеристика устройства различных систем «зеленых» стен;
- определены наиболее экологичные и эффективные варианты систем вертикального озеленения;
- установлены самые эффективные по способу устройства системы «зеленых» стен.

Таким образом, выявлены наиболее экологичные и эффективные варианты систем вертикального озеленения, показано, что по основным показателям организационной эффективности технологических решений инновационная система стеновых покрытий с модульными системами озеленения из экопластика является лучшим техническим решением среди современных систем-аналогов. Авторами предложено инновационное решение устройства покрытий с модульными си-



Рис. 4. Инновационная система стеновых покрытий с модульными системами озеленения из экопластика

Fig. 4. The innovative wall covering system with modular ecoplastic landscaping systems

стемами озеленения [38–45]. Однако большинство современных решений покрытий с системами озеленения используются в странах с наиболее подходящими условиями для выращивания растений и теплым климатом: Вьетнам, Греция, Италия и др. [46–53].

Энергоэффективные технологии в качестве энергосберегающих решений в системах освещения находят применение в малоэтажном жилищном строительстве [54–60]. Исследования технологических параметров возведения эксплуатируемых покрытий с зелеными насаждениями формируют вариативную базу организационно-технологического моделирования и позволяют принимать рациональные организационно-технологические решения в данной области. Построение интегральной оценки организационно-технологических решений на основе расчета временных параметров графа и прогнозирования срока завершения моделируемого процесса дают возможность быстро и качественно провести анализ таких решений [61–65]. Этапы внедрения энергоресурсов и экологически безопасных технологий и производств рассматриваются на примере девелоперских проектов в строительстве [66–70]. Решение задач организационно-технологического моделирования строительных процессов особенно важно при имплементации инновационных проектов в строительстве. Методологические аспекты выбора оптимального организационно-технологического решения из базы имеющихся решений были рассмотрены на примере строительных процессов возведения зданий и сооружений [71–79].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Развитие современного строительного производства тесно связано с увеличивающимися темпами роста инновационных «зеленых» технологий

и экологических строительных материалов, в том числе технологий с применением стеновых покрытий с системами озеленения, направленных на создание благоприятной урбанистической среды для будущих поколений. Системы модульного озеленения имеют специфические конструктивно-технологические особенности, которые необходимо учитывать при разработке документов организационно-технологического проектирования. Для внедрения технологий «зеленого» строительства требуется комплексный подход и оценка таких инновационных проектов. Инновационные «зеленые» технологии также принесут большую пользу экологии города и помогут смягчить негативные воздействия на окружающую среду в результате изменения массовой застройки городов [80, 81]. В результате исследования удалось выявить и систематизировать различные виды «зеленых» стен и способы их устройства, а также установить, какие из них наиболее выгодны в использовании. Проанализированы и рассмотрены три различные системы озеленения: войлочные, модульные и контейнерные. По результатам анализа выяснено, что в настоящее время имеется необходимость в разработке новых усовершенствованных систем озеленения, пока не существует универсальной системы вертикального озеленения, каждая из систем имеет свои преимущества и недостатки в установке и использовании. Наиболее удобной в эксплуатации является модульная система «зеленых» стен, как и войлочная система озеленения, такая технология основана на гидропонном методе полива, что дает ей превосходство над контейнерной технологией озеленения. Таким образом, определены наиболее экологичные и энергоэффективные варианты систем вертикального озеленения, рассмотрены и выявлены самые эффективные по способу устройства системы «зеленых» стен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Guerra B., Leite F. Circular economy in the construction industry: An overview of United States stakeholders' awareness, major challenges, and enablers // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 170. P. 105617. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105617
2. Suzer O. A comparative review of environmental concern prioritization: LEED vs other major certification systems // Journal of Environmental Management. 2015. Vol. 154. Pp. 266–283. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.02.029
3. Borkovskaya V.G., Degaev E., Burkova I. Environmental economic model of risk management and costs in the framework of the quality management system // MATEC Web of Conference. 2018. Vol. 193. P. 05027. DOI: 10.1051/mateconf/201819305027
4. Barber A., Haase D., Wolff M. Permeability of the city — Physical barriers of and in urban green spaces in the city of Halle, Germany // Ecological Indicators. 2021. Vol. 125. P. 107555, DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107555
5. Kirn J.C. Mitigation of urban heat islands: greening cities with mandates versus incentives // Natural Resources & Environment Winter 2018: Cities. 2018. Vol. 1.
6. Korol E., Kagan P., Barabanova T., Bunkina I. Description of technological processes in construction using formal language // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. Issue 3. Pp. 1691–1693.
7. Catalano C., Laudicina V.A., Badalucco L., Guarino R. Some European green roof norms and guidelines through the lens of biodiversity: Do ecoregions and plant traits also matter? // Ecological Engineering. 2018. Vol. 115. Pp. 15–26. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.01.006
8. Korol E., Shushunova N. Modular green roofs in urban ecospace // Landscape Architecture — The Sense of Places, Models and Applications. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.74991
9. Khoshbakht M., Gou Z., Dupre K. Cost-benefit prediction of green buildings: SWOT analysis of research methods and recent applications // Procedia Engineering. 2017; 180:167–178. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.176
10. Moghbel M., Salim E. Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO₂ content // Urban Climate. 2017. Vol. 20. Pp. 46–58. DOI: 10.1016/j.uclim.2017.02.012
11. Xiao M., Lin Ya., Han J., Zhang G. A review of green roof research and development in China // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 40. Pp. 633–648. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.147
12. Renterghem T.V. Green roofs for acoustic insulation and noise reduction // Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability. 2018. Pp. 167–179. DOI: 10.1016/b978-0-12-812150-4.00016-1
13. Князева В.П. Экологические аспекты выбора строительных материалов в архитектурном проектировании : учеб. пособие. М. : Архитектура-С, 2006.
14. Король Е.А., Киселев И.Я., Шушунова Н.С. Реконструкция предприятий текстильной промышленности с использованием кровельных покрытий с системами озеленения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 3 (375). С. 294–300.
15. Теличенко В.И., Слесарев М.Ю. «Зеленая» стандартизация будущего — фактор экологической безопасности среды жизнедеятельности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 90–97.
16. Король О.А. Исследования и наукоемкие разработки в области энергоэффективного строительного производства // Строительные материалы. 2015. № 6. С. 13–15.
17. Strigin B.S. Domestic and foreign experience of using soft fitting structures in tent equipment // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 06008. DOI: 10.1051/mateconf/201825106008
18. Лукинов В.А., Дьяков И.Г. Рейтинговая оценка энергосберегающих проектов с использованием технологий «зеленого строительства» // Недвижимость: экономика, управление. 2015. № 2. С. 26–29.
19. Bevilacqua P., Mazzeo D., Bruno R., Arcuri R. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area // Energy and buildings. 2016. Vol. 122. Pp. 63–79. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.062
20. Ланидус А.А., Жунин А.А. Моделирование и оптимизация организационно-технологических решений при возведении энергоэффективных ограждающих конструкций в гражданском строительстве // Вестник МГСУ. 2016. № 5. С. 59–71. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.5.59-71
21. Синенко С.А., Славин А.М. К вопросу выбора оптимального организационно-технологического решения возведения зданий и сооружений // Научное обозрение. 2016. № 1. С. 98–103.
22. Шрейбер К.А. Технология производства ремонтно-строительных работ. М. : АСВ, 2014. 263 с.
23. Шушунова Н.С. Анализ технологических параметров при устройстве инверсионных кровельных покрытий с озеленением // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 3 (114). С. 349–355. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3.349-355
24. Pedro J., Silva C., Pinheiro M. Integrating GIS spatial dimension into BREEAM communities sustainability assessment to support urban plan-

ning policies, Lisbon case study // *Land Use Policy*. 2019. Vol. 83. Pp. 424–434. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.02.003

25. *Hu M.* Energy benchmarking data for LEED-certified buildings in Washington, D.C.: Simulation and reality // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 42. P. 102475. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102475

26. *Schlegl F., Gantner J., Traunspurger R., Albrecht S., Leistner P.* LCA of buildings in Germany: Proposal for a future benchmark based on existing databases // *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 194. Pp. 342–350. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.04.038

27. *Bruce-Hyrkäs T., Pasanen P., Castro R.* Overview of whole building life-cycle assessment for green building certification and ecodesign through industry surveys and interviews // *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 69. Pp. 178–183. DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.127

28. *Wei T., Jim C., Chen A., Li X.* Adjusting soil parameters to improve green roof winter energy performance based on neural-network modeling // *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. Pp. 2549–2559. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.09.012

29. *Castleton R., Stovin H.F., Beck V., Davison S.B.* Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit // *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42. Issue 10. Pp. 1582–1591. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.004

30. *Feng C.* Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs // *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42. Issue 6. Pp. 959–965. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.12.014

31. *Gaidukov P., Pugach E.* Technological aspects of lift-slab method in high-rise-building construction // *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 33. P. 02068. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302068

32. *Ginzburg A.* Sustainable building life cycle design // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 73. P. 02018. DOI: 10.1051/mateconf/20167302018

33. *Kagan P., Naumova A., Vilman Y.* The problems of project management software implementation in construction corporations // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 73. P. 07016. DOI: 10.1051/mateconf/20167307016

34. *Kagan P.* The engineering communication networks — the issues of use of standards for the information representation in design, construction and operation // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153. Pp. 261–265. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.112

35. *Kasyanov V., Chernysheva O.* Use of underground space in large cities // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 471. P. 112052. DOI: 10.1088/1757-899X/471/1/112052

36. *Kievskiy L.V., Kievskiy I.L.* Multiplier effects of the Moscow construction complex // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11. Issue 1. Pp. 304–311.

37. *Klueva N., Emelyanov S., Kolchunov V., Bukhtiyarova A.* New industrial energy and resource saving structural solutions for public buildings // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725–726. Pp. 1423–1429. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.1423

38. *Korol E., Shushunova N.* Benefits of a modular green roof technology // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 161. Pp. 1820–1826. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.673

39. *Korol E., Shushunova N.* Research and Development for the International Standardization of Green Roof Systems // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153. Pp. 287–291. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.117

40. *Macivor J.S., Lundholm J.* Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate // *Ecological Engineering*. 2011. Vol. 37. Issue 3. Pp. 407–417. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2010.10.004

41. *Loiola C., Mary W., Silva L.* Hydrological performance of modular-tray green roof systems for increasing the resilience of mega-cities to climate change // *Journal of Hydrology*. 2019. Vol. 573. Pp. 1057–1066. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.004

42. *Kiss B., Szalay Z.* Modular approach to multi-objective environmental optimization of buildings // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 111. P. 103044. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103044

43. *Thai H., Ngo T., Uy B.* A review on modular construction for high-rise buildings // *Structures*. 2020. Vol. 28. Pp. 1265–1290. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.09.070

44. *Staszczuk A., Kuczyński T.* The impact of wall and roof material on the summer thermal performance of building in a temperate climate // *Energy*. 2021. Vol. 228. P. 120482. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120482

45. *Du H., Huang P., Jones P.* Modular facade retrofit with renewable energy technologies: The definition and current status in Europe // *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 205. P. 109543. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109543

46. *Nguyen D.L.* A critical review on energy efficiency and conservation policies and programs in Vietnam // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52. Pp. 623–634. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.161

47. *Nguyen H.T.* A review on green building in Vietnam // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 142. Pp. 314–321. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.02.053

48. *Spala A.* On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece // *Renewable Energy*. 2008. Vol. 33. Issue 1. Pp. 173–177. DOI: 10.1016/j.renene.2007.03.022

49. *Coma J., Pérez G., de Gracia A., Burés S., Urrestarazu M., Cabeza L.F.* Vertical greenery systems

for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades // *Building and Environment*. 2017. Vol. 111. Pp. 228–237. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.11.014

50. *Vu L., Vu T., Korol E., Bulgakov B.* Properties and thermal insulation performance of light-weight concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. Issue 84. Pp. 173–191. DOI: 10.18720/MCE.84.17

51. *Bevilacqua P., Mazzeo D., Bruno R., Arcuri N.* Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 122. Pp. 63–79. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.062

52. *Bevilacqua P., Mazzeo D., Bruno R., Arcuri N.* Thermal inertia assessment of an experimental extensive green roof in summer conditions // *Building and Environment*. 2018. Vol. 131. Pp. 264–276. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.11.033

53. *Bevilacqua P., Mazzeo D., Bruno R., Arcuri N.* Surface temperature analysis of an extensive green roof for the mitigation of urban heat island in southern mediterranean climate // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 150. Pp. 318–327. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.05.081

54. *Prokhorenko A.V., Solovyov A.K.* Energy-effective technologies for housing and utilities using a case study of energy saving illumination in entrance halls of apartment buildings // *Light & Engineering*. 2015. Vol. 23. Issue 1. Pp. 71–78.

55. *Solovyov A.K.* Research into illumination of buildings and construction conducted in architectural and construction educational and scientific institutes: a review // *Light & Engineering*. 2017. Vol. 25. Issue 1. P. 23.

56. *Solovyov A.K.* Hollow tubular light guides: their application for natural illumination of buildings and energy saving // *Light & Engineering*. 2012. Vol. 20. Issue 1. Pp. 40–49.

57. *Telichenko V., Benuzh A., Eames G., Orenburova E., Shushunova N.* Development of green standards for construction in Russia // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153. Pp. 726–730. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.233

58. *Афанасьев А.А., Жунин А.А.* Инновационная технология возведения навесных вентилируемых фасадов в гражданском строительстве // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 9 (108). С. 981–989. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.9.981-989

59. *Афанасьев А.А., Афанасьев Г.А.* Современные технологии малоэтажного строительства // *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. № 2. С. 148–155. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-2-148-155

60. *Афанасьев А.А., Жунин А.А.* Модульные фасады в высотном строительстве // *Вестник МГСУ*. 2011. № 1–2. С. 19–23.

61. *Баркалов С.А., Курочка П.Н.* Построение интегральной оценки организационно-технологических решений на основе сингулярных разложений //

Системы управления и информационные технологии. 2016. Т. 64. № 2. С. 39–46.

62. *Баркалов С.А., Нехай Р.Г.* Алгоритм расчета временных параметров графа и прогнозирования срока завершения моделируемого процесса // *Системы управления и информационные технологии*. 2015. Т. 61. № 3–1. С. 114–118.

63. *Вильман Ю.А., Каган П.Б.* Совершенствование уровня механизации и автоматизации технологического монтажа конструкций // *Естественные и технические науки*. 2014. № 11–12 (78). С. 397–398.

64. *Волков А.А., Гроссман Я.Э., Седов А.В., Чулков Г.О., Шепелев А.Л., Шрейбер К.А.* Организация интеллектуального управления жизненными циклами безопасной, энергоэффективной, экологичной и комфортной среды жизнедеятельности // *Научное обозрение*. 2015. № 19. С. 92–96.

65. *Гинзбург А.В., Кангезова М.Х.* Применение методов оценки состояния среды жизнедеятельности в строительной практике: BREEAM и LEED // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2017. № 12. С. 33–35.

66. *Грабовый П.Г., Манухина Л.А.* Национальная стратегия внедрения энергоресурсов и экологически безопасных (зеленых) технологий и производств в строительство и ЖКХ // *Недвижимость: экономика, управление*. 2014. № 1–2. С. 6–8.

67. *Грабовый П.Г., Гусакова Е.А., Крыгина А.М.* Перспективы развития организации инновационно-технологического строительства жилья на региональном уровне // *Недвижимость: экономика, управление*. 2013. № 2. С. 14–19.

68. *Гусакова Н.В., Филюшина К.Э., Гусаков А.М.* Техничко-экономическое обоснование выбора ограждающих конструкций в малоэтажном строительстве // *Научные труды Кубанского государственного технологического университета*. 2018. № 9. С. 99–105.

69. *Гусакова Е.А., Куликова Е.Н., Ефименко А.З., Касьянов В.Ф.* Модели и подходы к управлению девелоперскими проектами // *Вестник МГСУ*. 2012. № 12. С. 253–259.

70. *Гусева Т.В., Молчанова Я.П., Панкина Г.В., Петросян Е.Р.* Зеленые стандарты: современные методы экологического менеджмента в строительстве // *Компетентность*. 2012. № 99. С. 22–28.

71. *Дегтяренко А.В., Цветков Н.А., Пестунов В.А.* Технология и организация восстановления (ремонта) мягких кровель с использованием мобильного комплекта электрооборудования // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2007. № 1 (14). С. 156–164.

72. *Жолобов А.Л., Жолобова Е.А.* Комплексная оценка конкурентоспособности строительных технологий // *Инженерный вестник Дона*. 2013. № 2 (25). С. 130.

73. Киевский Л.В. Прикладная организация строительства // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 3 (102). С. 253–259. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.253-259
74. Киевский Л.В., Тихомиров С.А., Кулешова Э.И., Щеглов В.А. Методические вопросы разработки технологических карт в строительстве для модульного дома на основе хронометражных наблюдений // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 11. С. 41–49.
75. Калюжнюк М.М., Сандан Р.Н. Структурная классификация элементов строительных процессов // Вестник гражданских инженеров. 2008. № 1 (14). С. 46–52.
76. Король Е.А., Комиссаров С.В., Казан П.Б., Арутюнов С.Г. Решение задач организационно-технологического моделирования строительных процессов // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 3. С. 43–45.
77. Олейник П.П., Григорьев В.А. Методы исследования параметров возведения жилых зда-

ний // Вестник МГСУ. 2015. № 2. С. 168–177. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.2.168-177

78. Самосудова Н.В., Манухина О.А., Шушунова Н.С. Современные пути развития экостроительства на примере реализации в г. Москве проекта «зеленого (живого) офиса» WWF // Недвижимость: экономика, управление. 2013. № 2. С. 137–140.

79. Синенко С.А., Славин А.М. К вопросу выбора оптимального организационно-технологического решения возведения зданий и сооружений // Научное обозрение. 2016. № 1. С. 98–103.

80. Bousselot J., Russell V., Tolderlund L., Celik S., Retzlaff B., Morgan S. et al. Green Roof Research in North America: A Recent History and Future Strategies // Journal of Living Architecture. 2020. Vol. 7. Issue 1. Pp. 27–64. DOI: 10.46534/jliv.2020.07.01.027

81. Sailor D.J., Hutchinson D., Bokovoy L. Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S. // Energy and Buildings. 2008. Vol. 40 (7). Pp. 1246–1251. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.11.004

Поступила в редакцию 1 июня 2021 г.

Принята в доработанном виде 20 июля 2021 г.

Одобрена для публикации 20 июля 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Анатольевна Король — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой жилищно-коммунального комплекса; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 678276, Scopus: 57197844794, ResearcherID: 2635-2019, ORCID: 0000-0002-5019-3694; professorskorol@mail.ru;

Наталья Сергеевна Шушунова — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 798734; nshushun@gmail.com.

REFERENCES

1. Guerra B., Leite F. Circular economy in the construction industry: An overview of United States stakeholders' awareness, major challenges, and enablers. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021; 170:105617. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105617
2. Suzer O. A comparative review of environmental concern prioritization: LEED vs other major certification systems. *Journal of Environmental Management*. 2015; 154:266-283. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.02.029
3. Borkovskaya V.G., Degaev E., Burkova I. Environmental economic model of risk management and costs in the framework of the quality management system. *MATEC Web of Conference*. 2018; 193:05027. DOI: 10.1051/mateconf/201819305027
4. Barber A., Haase D., Wolff M. Permeability of the city – Physical barriers of and in urban green spaces in the city of Halle, Germany. *Ecological Indicators*. 2021; 125:107555, DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107555
5. Kirn J.C. Mitigation of urban heat islands: greening cities with mandates versus incentives. *Natural Resources & Environment Winter 2018: Cities*. 2018; 1.
6. Korol E., Kagan P., Barabanova T., Bunkina I. Description of technological processes in construction using formal language. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016; 11(3):1691-1693.
7. Catalano C., Laudicina V.A., Badalucco L., Guarino R. Some European green roof norms and guidelines through the lens of biodiversity: Do ecoregions and plant traits also matter? *Ecological Engineering*. 2018; 115:15-26. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.01.006
8. Korol E., Shushunova N. Modular Green Roofs in Urban Ecospace. *Landscape Architecture — The Sense of Places, Models and Applications*. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.74991
9. Khoshbakht M., Gou Z., Dupre K. Cost-benefit prediction of green buildings: SWOT analysis of research methods and recent applications. *Procedia Engineering*. 2017; 180:167-178. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.176

10. Moghbel M., Salim E. Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO₂ content. *Urban Climate*. 2017; 20:46-58. DOI: 10.1016/j.uclim.2017.02.012
11. Xiao M., Lin Ya., Han J., Zhang G. A review of green roof research and development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 40:633-648. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.147
12. Renterghem T.V. Green roofs for acoustic insulation and noise reduction. *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*. 2018; 167-179. DOI: 10.1016/b978-0-12-812150-4.00016-1
13. Knyazeva V.P. *Environmental aspects of the choice of building materials in architectural design: textbook*. Moscow, Architecture-S, 2006. (rus.).
14. Korol E.A., Kiselev I.YA., Shushunova N.S. Reconstruction of textile industry enterprises using roofing with landscaping systems. *News of higher educational institutions*. 2018; 3(375):294-300. (rus.).
15. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. "Green" standardization of the future — a factor in the environmental safety of the living environment. *Industrial and Civil Construction*. 2018; 8:90-97. (rus.).
16. Korol O.A. Research and knowledge-intensive developments in the field of energy-efficient construction production. *Construction Materials*. 2015; 6:13-15. (rus.).
17. Strigin B.S. Domestic and foreign experience of using soft fitting structures in tent equipment. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:06008. DOI: 10.1051/mateconf/201825106008
18. Lukinov V.A., D'yakov I.G. Rating assessment of energy-saving projects using "green building" technologies. *Real Estate: Economics, Management*. 2015; 2:26-29. (rus.).
19. Bevilacqua P., Mazzeo D., Bruno R., Arcuri R. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. *Energy and buildings*. 2016; 122:63-79. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.062
20. Lapidus A.A., Zhunin A.A. Modeling and optimization of organizational and technological solutions in the construction of energy efficient fencing structures in civil engineering. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 5:59-71. (rus.).
21. Sinenko S.A., Slavin A.M. On the question of choosing the optimal organizational and technological solution for the erection of buildings and structures. *Scientific Review*. 2016; 1:98-103. (rus.).
22. Schreiber K.A. *Production technology of repair and construction works*. Moscow, ASV, 2014; 263. (rus.).
23. Shushunova N.S. Analysis of technological parameters when constructing inverted roof structures with greenery. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(3):(114):349-355. DOI: 10.22227/1997–0935.2018.3.349-355 (rus.).
24. Pedro J., Silva C., Pinheiro M. Integrating GIS spatial dimension into BREEAM communities sustainability assessment to support urban planning policies, Lisbon case study. *Land Use Policy*. 2019; 83:424-434. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.02.003
25. Hu M. Energy benchmarking data for LEED-certified buildings in Washington, D.C.: Simulation and reality. *Journal of Building Engineering*. 2021; 42:102475. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102475
26. Schlegl F., Gantner J., Traunspurger R., Albrecht S., Leistner P. LCA of buildings in Germany: Proposal for a future benchmark based on existing databases. *Energy and Buildings*. 2019; 194:342-350. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.04.038
27. Bruce-Hyrkäs T., Pasanen P., Castro R. Overview of whole building life-cycle assessment for green building certification and ecodesign through industry surveys and interviews. *Procedia CIRP*. 2018; 69:178-183. DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.127
28. Wei T., Jim C., Chen A., Li X. Adjusting soil parameters to improve green roof winter energy performance based on neural-network modeling. *Energy Reports*. 2020; 6:2549-2559. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.09.012
29. Castleton R., Stovin H.F., Beck V., Davison S.B. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*. 2010; 42(10):1582-1591. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.004
30. Feng C. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*. 2010; 42(6):959-965. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.12.014
31. Gaidukov P., Pugach E. Technological aspects of lift-slab method in high-rise-building construction. *E3S Web of Conferences*. 2018; 33:02068. DOI: 10.1051/e3s-conf/20183302068
32. Ginzburg A. Sustainable building life cycle design. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 73:02018. DOI: 10.1051/mateconf/20167302018
33. Kagan P., Naumova A., Vilman Y. The problems of project management software implementation in construction corporations. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 73:07016. DOI: 10.1051/mateconf/20167307016
34. Kagan P. The Engineering Communication Networks — The Issues of Use of Standards for the Information Representation in Design, Construction and Operation. *Procedia Engineering*. 2016; 153:261-265. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.112
35. Kasyanov V., Chernysheva O. Use of underground space in large cities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 471:112052. DOI:10.1088/1757-899X/471/11/112052
36. Kievskiy L.V., Kievskiy I.L. Multiplier effects of the Moscow construction complex. *International Jour-*

nal of Applied Engineering Research. 2016; 11(1):304-311.

37. Klueva N., Emelyanov S., Kolchunov V., Bukhtiyarova A. New industrial energy and resource saving structural solutions for public buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2015; 725-726:1423-1429. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.1423

38. Korol E., Shushunova N. Benefits of a modular green roof technology. *Procedia Engineering*. 2016; 161:1820-1826. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.673

39. Korol E., Shushunova N. Research and development for the international standardization of green roof systems. *Procedia Engineering*. 2016; 153:287-291. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.117

40. Macivor J.S., Lundholm J. Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering*. 2011; 37(3):407-417. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2010.10.004

41. Loiola C., Mary W., Silva L. Hydrological performance of modular-tray green roof systems for increasing the resilience of mega-cities to climate change. *Journal of Hydrology*. 2019; 573:1057-1066. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.004

42. Kiss B., Szalay Z. Modular approach to multi-objective environmental optimization of buildings. *Automation in Construction*. 2020; 111:103044. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103044

43. Thai H., Ngo T., Uy B. A review on modular construction for high-rise buildings. *Structures*. 2020; 28:1265-1290. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.09.070

44. Staszczuk A., Kuczyński T., The impact of wall and roof material on the summer thermal performance of building in a temperate climate. *Energy*. 2021; 228:120482. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120482

45. Du H., Huang P., Jones P. Modular facade retrofit with renewable energy technologies: The definition and current status in Europe. *Energy and Buildings*. 2019; 205:109543. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109543

46. Nguyen D.L. A critical review on Energy Efficiency and Conservation policies and programs in Vietnam. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015; 52:623-634. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.161

47. Nguyen H.T. A Review on Green Building in Vietnam. *Procedia Engineering*. 2016; 142:314-321. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.02.053

48. Spala A. On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renewable Energy*. 2008; 33(1):173-177. DOI: 10.1016/j.renene.2007.03.022

49. Coma J., Pérez G., de Gracia A., Burés S., Urrestarazu M., Cabeza L.F. Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*. 2017; 111:228-237. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.11.014

50. Vu L., Vu T., Korol E., Bulgakov B. Properties and thermal insulation performance of light-weight concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 84:173-191. DOI: 10.18720/MCE.84.17

51. Bevilacqua P., Mazzeo D., Bruno R., Arcuri N. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. *Energy and Buildings*. 2016; 122:63-79. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.062

52. Bevilacqua P., Mazzeo D., Bruno R., Arcuri N. Thermal inertia assessment of an experimental extensive green roof in summer conditions. *Building and Environment*. 2018; 131:264-276. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.11.033

53. Bevilacqua P., Mazzeo D., Bruno R., Arcuri N. Surface temperature analysis of an extensive green roof for the mitigation of urban heat island in southern mediterranean climate. *Energy and Buildings*. 2017; 150:318-327. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.05.081

54. Prokhorenko A.V., Solovyov A.K. Energy-effective technologies for housing and utilities using a case study of energy saving illumination in entrance halls of apartment buildings. *Light & Engineering*. 2015; 23(1):71-78.

55. Solovyov A.K. Research into illumination of buildings and construction conducted in architectural and construction educational and scientific institutes: a review. *Light & Engineering*. 2017; 25(1):23.

56. Solovyov A.K. Hollow tubular light guides: their application for natural illumination of buildings and energy saving. *Light & Engineering*. 2012; 20(1):40-49.

57. Telichenko V. Development of green standards for construction in Russia. *Procedia Engineering*. 2016; 153:726-730.

58. Afanasyev A.A., Zhunin A.A. Innovation technology of installation of hinged ventilated facades for civil construction. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(9):(108):981-989. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.9.981-989 (rus.).

59. Afanasyev A.A., Afanasyev G.A. Modern technologies of low-rise construction. *Academia. Architecture and construction*. 2018; 2:148-155. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-2-148-155 (rus.).

60. Afanasyev A.A., Zhunin A.A. Modular facades in high-rise construction. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 1-2:19-23. (rus.).

61. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Construction of an integral assessment of organizational and technological solutions based on singular value decompositions. *Control systems and information technologies*. 2016; 64(2):39-46. (rus.).

62. Barkalov S.A., Nekhai R.G. Algorithm for calculating the time parameters of the graph and predicting the completion date of the modeled process. *Control Sys-*

tems and Information Technologies. 2015; 61(3-1):114-118. (rus.).

63. Vilman Yu.A., Kagan P.B. Improvement of the level of mechanization and automation of technologies for assembling structures. *Natural and technical sciences*. 2014; 11-12(78):397-398. (rus.).

64. Volkov A.A., Grossman Ya.E., Sedov A.V., Chulkov G.O., Shepelev A.L., Shreiber K.A. Organization of intelligent lifecycle management of a safe, energy efficient, environmentally friendly and comfortable living environment. *Scientific Review*. 2015; 19:92-96. (rus.).

65. Ginzburg A.V., Kangezova M.Kh. Application of methods for assessing the state of the living environment in construction practice: BREEAM and LEED. *BST: Construction Equipment Bulletin*. 2017; 12:33-35. (rus.).

66. Grabovoi P.G., Manukhina L.A. National strategy for the introduction of energy resources and environmentally friendly (green) technologies and industries in construction and housing and communal services. *Real estate: economics, management*. 2014; 1-2:6-8. (rus.).

67. Grabovoi P.G., Gusakova E.A., Krygina A.M. Prospects for the development of the organization of innovative and technological housing construction at the regional level. *Real estate: economics, management*. 2013; 2:14-19. (rus.).

68. Gusakova N.V., Filyushina K.E., Gusakov A.M. Feasibility study of the choice of enclosing structures in low-rise construction. *Scientific works of the Kuban State Technological University*. 2018; 9:99-105. (rus.).

69. Gusakova E.A., Kulikova E.N., Efimenko A.Z., Kas'yanov V.F. Models and approaches to the management of development projects. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 12:253-259. (rus.).

70. Guseva T.V., Molchanova Ya.P., Pankina G.V., Petrosyan E.R. Green standards: modern methods of environmental management in construction. *Competence*. 2012; 99:22-28. (rus.).

71. Degtyarenko A.V., Tsvetkov N.A., Pestunov V.A. Technology and organization of restoration (repair) of soft roofs using a mobile set of electrical equipment. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2007; 1(14):156-164. (rus.).

72. Zholobov A.L., Zholobova E.A. Comprehensive assessment of the competitiveness of building technologies. *Don's Engineering Bulletin*. 2013; 2(25):130. (rus.).

73. Kievsky L.V. Applied construction organization. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(3):(102):253-259. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.253-259 (rus.).

74. Kievsky L.V., Tikhomirov S.A., Kuleshova E.I., Shcheglov V.A. Methodological issues of the development of technological maps in construction for a modular house based on time observations. *Industrial and civil construction*. 2016; 11:41-49. (rus.).

75. Kalyuzhnyuk M.M., Sandan R.N. Structural classification of elements of construction processes. *Bulletin of Civil Engineers*. 2008; 1(14):46-52. (rus.).

76. Korol E.A., Komissarov S.V., Kagan P.B., Arutyunov S.G. Solving the problems of organizational and technological modeling of construction processes. *Industrial and civil construction*. 2011; 3:43-45. (rus.).

77. Grigor'ev V.A., Oleynik P.P. Research methods of the parameters of residential buildings construction. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 2:168-177. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.2.168-177 (rus.).

78. Samosudova N.V., Manukhina O.A., Shushunova N.S. Modern ways of green building development on the example of the implementation of the "green (living) office" WWF project in Moscow. *Real estate: economics, management*. 2013; 2:137-140. (rus.).

79. Sinenko S.A., Slavin A.M. On the issue of choosing the optimal organizational and technological solution for the construction of buildings and structures. *Scientific Review*. 2016; 1:98-103. (rus.).

80. Bousselot J., Russell V., Tolderlund L., Celik S., Retzlaff B., Morgan S. et al. Green roof research in North America: a recent history and future strategies. *Journal of Living Architecture*. 2020; 7(1):27-64. DOI: 10.46534/jliv.2020.07.01.027

81. Sailor D.J., Hutchinson D., Bokovoy L. Thermal property measurements for Ecoroof soils common in the western U.S. *Energy and Buildings*. 2008; 40(7):1246-1251. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.11.004

Received June 1, 2021.

Adopted in revised form on July 20, 2021.

Approved for publication on July 20, 2021.

B I O N O T E S : **Elena A. Korol** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Housing and Communal Utility; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 678276, Scopus: 57197844794, ResearcherID: 2635-2019, ORCID: 0000-0002-5019-3694; professorkorol@mail.ru;

Natalia S. Shushunova — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Integrated Safety in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 798734; nshushun@gmail.com.

Разработка элементов классификатора строительной информации для создания и ведения информационных моделей объектов капитального строительства в части процессов проектирования, управления строительными процессами и строительной информации

В.С. Тимченко¹, В.А. Волкодав², И.А. Волкодав², О.В. Тимченко¹, Н.А. Осипов³

¹ Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий «АТОМПРОЕКТ» (АТОМПРОЕКТ), г. Санкт-Петербург, Россия;

² Научно-инженерный центр цифровизации и проектирования в строительстве (НИЦ ЦПС); г. Санкт-Петербург, Россия;

³ Национальный исследовательский университет ИТМО (НИУ ИТМО); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительная деятельность, включающая строительство особо сложных и уникальных объектов и типизацию проектных решений, требует применения единой системы классификации строительной информации для оптимизации сроков, затрат и повышения качества сооружаемого объекта. Разработка российского классификатора строительной информации (КСИ) стала первым шагом в этом направлении. Российский КСИ, разработанный в 2020 г., содержит множество элементов, среди которых можно выделить те группы, которые дают возможность управлять стоимостью, сроками и качеством будущего объекта капитального строительства (ОКС) как на ранних стадиях его жизненного цикла, так и на последующих: процессы управления, проектирования и информация.

Материалы и методы. Рассмотрены международные системы классификации строительной информации, нашедшие широкое практическое применение в области строительства: OmniClass (США), Uniclass 2015 (Великобритания), CCS (Дания) и CoClass (Швеция). Проведен анализ структур и состава существующих классификационных систем, а также анализ действующей в РФ нормативно-технической базы в области строительства в направлениях, связанных с управлением процессами, проектированием ОКС и его информационными сущностями.

Результаты. Разработаны адаптированные под особенности национальной базы нормативно-технической документации в строительстве части КСИ, применимые для проектирования и управления ОКС, а также для его описания. В качестве основы для классификационных таблиц (КТ) КСИ принята структура, рекомендуемая стандартом ISO 12006-2:2015. Созданы КТ КСИ по двум направлениям деятельности в строительстве (управление, проектирование) и КТ, описывающая информационные сущности ОКС.

Выводы. Классификационные таблицы «Управление процессами», «Процессы проектирования», «Информация» КСИ в разработанных структурах и составе обеспечивают формирование единой структуры управления и проектирования ОКС, позволяющей комбинировать ее части для адаптации под требования конкретного объекта и организации. Дополнительным механизмом для взаимосвязи различных направлений деятельности в строительстве (например, проектирование, эксплуатация, сооружение и пр.) является разработанная КТ «Информация», описывающая информационные сущности ОКС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: классификатор строительной информации, классификационная таблица, информационное моделирование, информационная модель объекта капитального строительства, управление, проектирование, информация в строительстве, управление жизненным циклом объекта капитального строительства, BIM, экономика в строительстве

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тимченко В.С., Волкодав В.А., Волкодав И.А., Тимченко О.В., Осипов Н.А. Разработка классификационных таблиц «Процессы управления», «Процессы проектирования» и «Информация» классификатора строительной информации для создания и ведения информационных моделей объектов капитального строительства // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 926–954. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.926-954

Development of building information classifier elements to create and maintain information models of capital construction objects in terms of design processes, construction process management and construction information

Vladimir S. Timchenko¹, Vladimir A. Volkodav², Ivan A. Volkodav², Olga V. Timchenko¹, Nikita A. Osipov³

¹ Scientific Research and Design Institute for Energy Technologies ATOMPROEKT (ATOMPROEKT); St. Petersburg, Russian Federation;

²Scientific and Engineering Center for Digitalization and Design in Construction;
St. Petersburg, Russian Federation;

³ITMO University (ITMO); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Integral approach to the application of construction information in the creation and maintenance of information models of capital construction objects is key in the constant development of construction activities. Besides, according to the global trends, the direct implementation of construction activity including construction of especially complicated and unique objects and typification of classical ones requires application of a unified system of building information classification to optimize duration, costs and improve the quality of the constructed object. Development of the Russian classifier of building information was the first step in this direction allowing to make a tool which is the unified system of building information classification generally available. The Russian building information classifier developed in 2020 contains a lot of elements among which we can distinguish those groups which allow to manage the cost, duration and quality of the future capital construction object both at the early stages of its life cycle and later: management processes, design processes and information.

Materials and methods. International systems of classification of building information that have found wide practical application in the field of construction: OmniClass (USA), Uniclass 2015 (Great Britain), CCS (Denmark) and CoClass (Sweden) are considered. The analysis of the structures and composition of existing classification systems, as well as the analysis of the current regulatory and technical framework in the Russian Federation in the field of construction in areas related to the management of processes, design of capital construction object and its information entities.

Results. Taking into account the analysis and generalization of world practice in the field of construction, and classification of building information, parts of the building information classifier adapted to the specifics of the national base of normative and technical documentation in construction, applicable to the design and management of capital construction object, as well as for its description, were developed. The structure recommended by the standard ISO 12006-2:2015 is adopted as the basis for such classification tables of the building information classifier. When developing the composition of the classifier, the requirements for unification and standardization of existing national classifiers and experience in the construction industry on domestic and foreign objects were taken into account. Classification tables of the building information classifier for the two areas of activity in construction (Management, Design) and a classification table describing the information entities of the capital construction object were developed.

Conclusions. Classification tables "Process Management", "Design Processes", "Information" of the building information classifier in the developed structures and composition provide the formation of a unified structure of management and design of capital construction object, allowing to combine its parts for adaptation to the requirements of a particular object and organization. Thus, providing an opportunity to optimize its technical and economic indicators, including the duration of construction and the cost of the object in the extent of its life cycle, to develop a tool for typing design and management processes, including planning tools and quality and cost control. An additional tool for the interrelation of various activities in construction (e.g., design, operation, construction, etc.) is the developed classification table "Information", which describes the information entities of the capital construction object.

KEYWORDS: building information classifier, classification table, information modeling, information model of the capital construction object, management, design, information in construction, life cycle management of the capital construction object, BIM, economics in construction

FOR CITATION: Timchenko V.S., Volkodav V.A., Volkodav I.A., Timchenko O.V., Osipov N.A. Development of classification tables "Process management", "Design processes" and "Information" of the classifier of construction information for creating and maintaining information models of capital construction objects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(7):926-954. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.7.926-954 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Одним из первых в жизненном цикле любого строительного объекта является создание его проекта (процессы проектирования). Корректный набор действий и соответствующий контроль качества этих процессов способствуют достижению поставленных результатов. Данный подход практикуется со времен внедрения внутренней системы стандартов в СССР и имеет свое продолжение в истории современной России. Ключевой элемент рассматриваемой системы — принцип стандартизации и унификации. Таким образом, система нормативно-технической документации (НТД) в Российской Федерации, унаследовавшая принципы, установленные в СССР, однозначно описывает последовательность действий (например, последовательность и способы прочностных расчетов для различного вида фундаментов) для достижения кон-

кретной цели в конкретных условиях и контексте. Это — особенность всех нормативно-технических документов, включая документы из перечня, зафиксированного Постановлением Правительства РФ от 04.07.2020 № 985. Другая характерная черта заключается в том, что данная последовательность носит локальный характер, т.е. привязана к конкретному контексту и уникальна в своем изложении.

По сути, разработка стандартов ISO 9000, ISO 9001 и идентичных им ГОСТ Р ИСО 9000-2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь», ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования» могла обеспечить взаимосвязь между документами нормативно-технической системы не только Российской Федерации, но и всего международного сообщества. Однако не все организации сумели оценить преимущества этого нововведения [1]. Причиной послужили су-

существующие уклады в части традиционного исполнения работ в различных организациях. При этом такие уклады были уникальными для каждой организации, а качество результатов зависело от опыта работы в конкретной сфере деятельности. Кроме того, специфичность изложения информации в ISO 9000 не стыковалась с языком ведения работы в организациях, что привело к непониманию требований стандарта и их практического применения [1].

Другая задача, помимо управления непосредственно организацией, — управление процессами организации, другими словами, восприятие организации в качестве системы — это лишь первый шаг, следующим после которого является управление организацией как системой. Как раз процессы управления и являются основным фокусом стандартов ISO 9000 и 9001, а процессы проектирования — в большей степени их производными и нуждаются в адаптации под конкретные задачи и контекст.

Необходимость пересмотра основ управления организациями в условиях становления рыночных отношений привела к тому, что многие специалисты в области менеджмента стали все чаще обращаться к вопросам качества продукции и услуг. Качество в настоящее время становится стратегией многих организаций и рассматривается как основная составляющая конкурентного преимущества¹. Подобная потребность повлекла значительное развитие ряда видов организаций. Преимущественно эти изменения затронули сферу крупного бизнеса, оставляя средний и малый бизнес позади. Высокая рыночная конкуренция требует постоянного совершенствования и развития организационных подходов, что, как следствие, приводит только к увеличению разрыва между крупными, средними и малыми предприятиями. Данную тенденцию доказывает факт существования множества организаций-консультантов, чьи услуги может позволить себе не каждая строительная компания.

В результате установленная система управления крупных организаций правомерно стала их достоянием и конкурентным преимуществом², а сложность языка «управления» — все менее доступной для малых организаций. Подобный феномен характерен практически для всех сфер деятельности, включая строительную.

Экономическое оздоровление и поощрение здоровой конкуренции на рынке строительства — одна из ключевых задач, которая в числе прочих должна привести к повышению технико-экономических параметров эффективности объектов ка-

питального строительства (ОКС), обмену опытом и технологическому прогрессу³. Эту задачу преследует и разработанный в 2020 г. по поручению Министерства строительства РФ Классификатор строительной информации³. Он состоит из четырех базовых категорий (рис. 1), его структура и состав являются предметом отдельного исследования. [2]. Настоящее исследование сосредоточено на базовых классах КСИ «Процессы проектирования» и «Управление процессами», а также на базовом классе «Информация», который дополнительно служит необходимым интерфейсным мостом для множества классов.

Изложенные проблемы (унификация, типизация, стандартизация процессов; повышение качества и эффективности работы; улучшение технико-экономических показателей ОКС и т.п.) актуальны и для крупных организаций, включая те, что представлены и осуществляют свою деятельность за рубежом, сталкиваясь с уникальными требованиями иностранного заказчика. При этом анализ такой деятельности демонстрирует фактическое отсутствие единого подхода и за рубежом, а существующие современные международные классификационные системы (КС), такие как OmniClass Construction Classification System (OCCS, США), Uniclass 2015 (Великобритания), CCS (Дания), CoClass (Швеция), MasterFormat (США), UniFormat (США), Talo 2000 (Финляндия), NS 3451&TFM (Норвегия), также не дают универсального ответа на поставленный вопрос, но формируют четкую тенденцию развития и совершенствования строительных процессов и информационных технологий.

В связи с этим и в контексте новой государственной политики по внедрению BIM⁴ в 2019 г. во исполнение поручения Президента Российской Федерации от 19.07.2018 ПР-1235⁵, установившего ряд приоритетных задач, ориентированных на модернизацию строительной отрасли и повышение качества строительства, Федеральным законом от 27.06.2019 № 151-ФЗ⁶ в Градостроительный ко-

³ Классификатор строительной информации. URL: <http://ksi.faufcc.ru>

⁴ Концепция внедрения системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием технологий информационного моделирования в Российской Федерации: URL: <https://www.faufcc.ru/cifrovoe-razvitiye/bim/kontsepciya/Концепция.pdf>

⁵ Поручение Президента Российской Федерации от 19.07.2018 № Пр-1235. URL: <http://docs.cntd.ru/document/550966183/>

⁶ Федеральный закон от 27.06.2019 № 151-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон “Об участии в долевом строительстве многоквартирных домов и иных объектов недвижимости и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации” и отдельные законодательные акты Российской Федерации».

¹ Герасимов Б.И., Быковский В.В., Пархоменко Л.В., Злобина Н.В. Управление качеством: методология и социально-экономические проблемы : сб. науч. ст. I Междунар. науч.-практ. конф., 11–13 мая 2005 г. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2005. 284 с.

² Шевчук Д.А. Управление качеством : учебное пособие для вузов. М. : ГроссМедиа, РОСБУХ, 2008. 216 с.

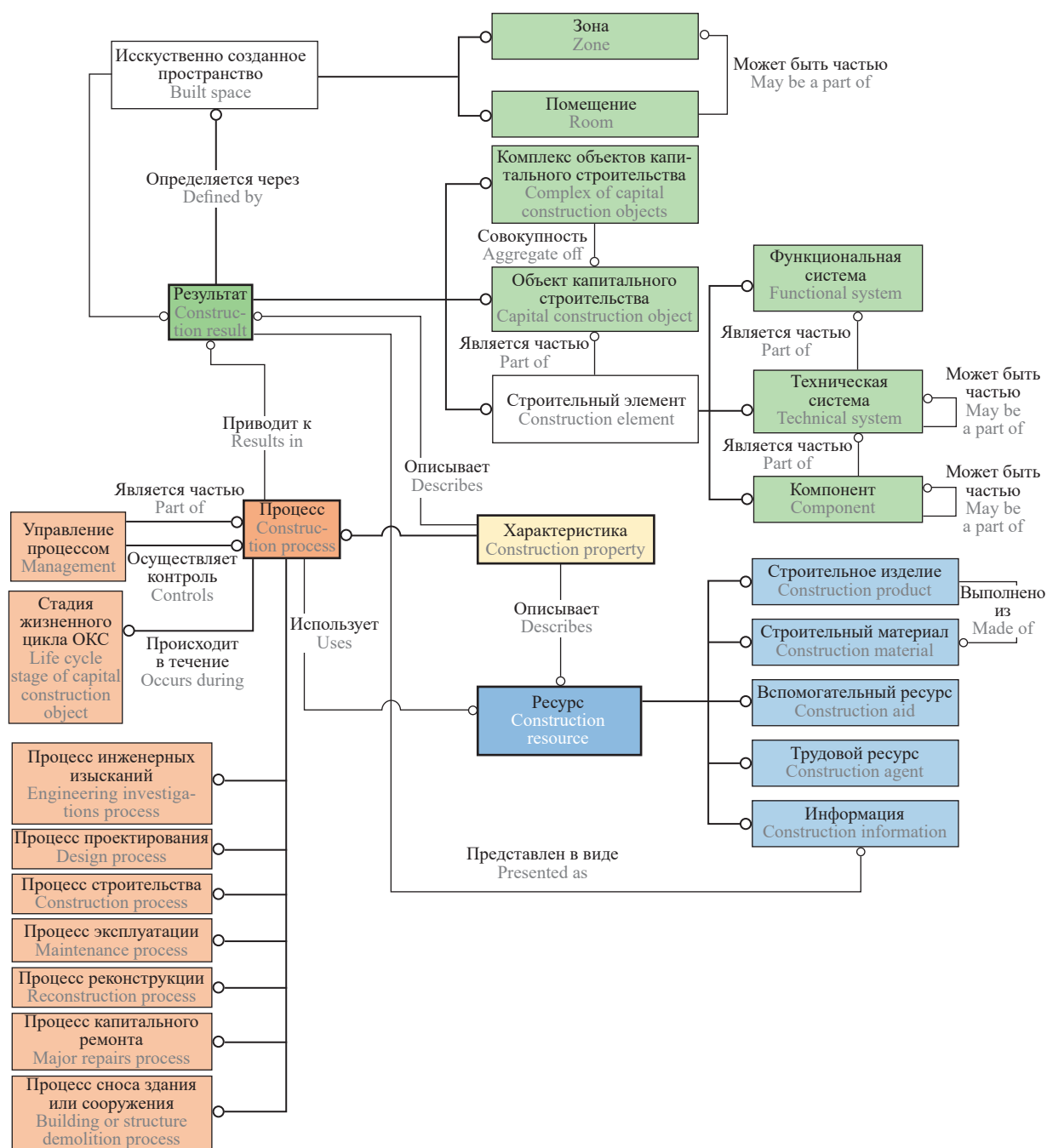


Рис. 1. Схема базовых категорий, классов строительной информации и их отношений в нотации EXPRESS-G [2]

Fig. 1. Scheme of basic categories, classes of building information and their relations in EXPRESS-G notation [2]

декс РФ⁷ был внесен ряд важных поправок, направленных на регламентирование применения технологий информационного моделирования в России. В частности, законом введены понятия информационной модели ОКС и классификатора строительной информации (КСИ) — информационного ресурса, распределяющего информацию об ОКС и ассоциированную с ними информацию в соответствии

с ее классификацией (классами, группами, видами и другими признаками) [2].

Мировая потребность в совершенствовании качества продукции по-прежнему концентрируется вокруг треугольника проектного управления: время, стоимость и объем⁸ [3]. Качество не является частью треугольника управления проектами,

⁷ Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (в редакции, актуальной с 13.08.2019).

⁸ Кобаяси И. 20 ключей к совершенствованию бизнеса. Практическая программа революционных преобразований на предприятиях / пер. с япон. А.Н. Стерляжникова. М. : РИА «Стандарты и качество», 2007. С. 248.

но служит конечной целью каждой поставки и его ядром. Значительное внимание привлекается к реинжинирингу, как к системе, которая объединяет в единое целое всю работу по совершенствованию предприятия⁹. При этом цели не меняются: выше качество, ниже затраты, меньше длительность производства⁹. Важно отметить, что применение традиционных методик совершенствования данных направлений по отдельности не позволяет добиться необходимого результата, и цели часто становятся недостижимыми, даже если первоначальные шаги были успешными⁹.

На основании социологических исследований, проведенных Институтом экономики переходного периода в 2003 г., выяснилось, что⁹:

- 83 % руководителей российских предприятий признают существование проблемы несовершенства системы управления и организационной структуры и называют ее основной проблемой бизнеса;
- 66 % компаний нуждаются во внедрении системы показателей эффективности деятельности;
- 17 % руководителей высказали намерение совершенствовать систему управления теми или иными средствами (внедрить систему оценки эф-

фективности подразделений и сотрудников, а также информационную систему, упорядочить бизнес-процессы). Таким образом, вопрос оптимизации управления компанией остается сегодня ключевым для топ-менеджеров большинства российских предприятий.

Исследования на российском рынке за 2019 год [4] показали, что 70 % опрошенных руководителей отмечают потребность в высококвалифицированном персонале, имеющем специальную подготовку в области проектного управления. Кроме того, согласно работе [4]:

- 25 % опрошенных утверждают, что строят систему проектного управления на основе свода знаний PMBoK, но с определенными изменениями, так как предлагаемая модель групп процессов является сложной и слишком ресурсоемкой;
- 57 % опрошенных компаний используют гибридные системы управления проектами;
- в целом значительная часть опрошенных нуждается в системе управления проектами, содержащей в себе простоту внедрения, легкость использования, а также включающей оптимальный набор контрольных элементов.

При этом анализ причин провалов проектов за 2014 г. [5] демонстрирует и подтверждает необходимость внедрения четкой и однозначной систематизации и структурирования процессов управления, что показано на рис. 2.

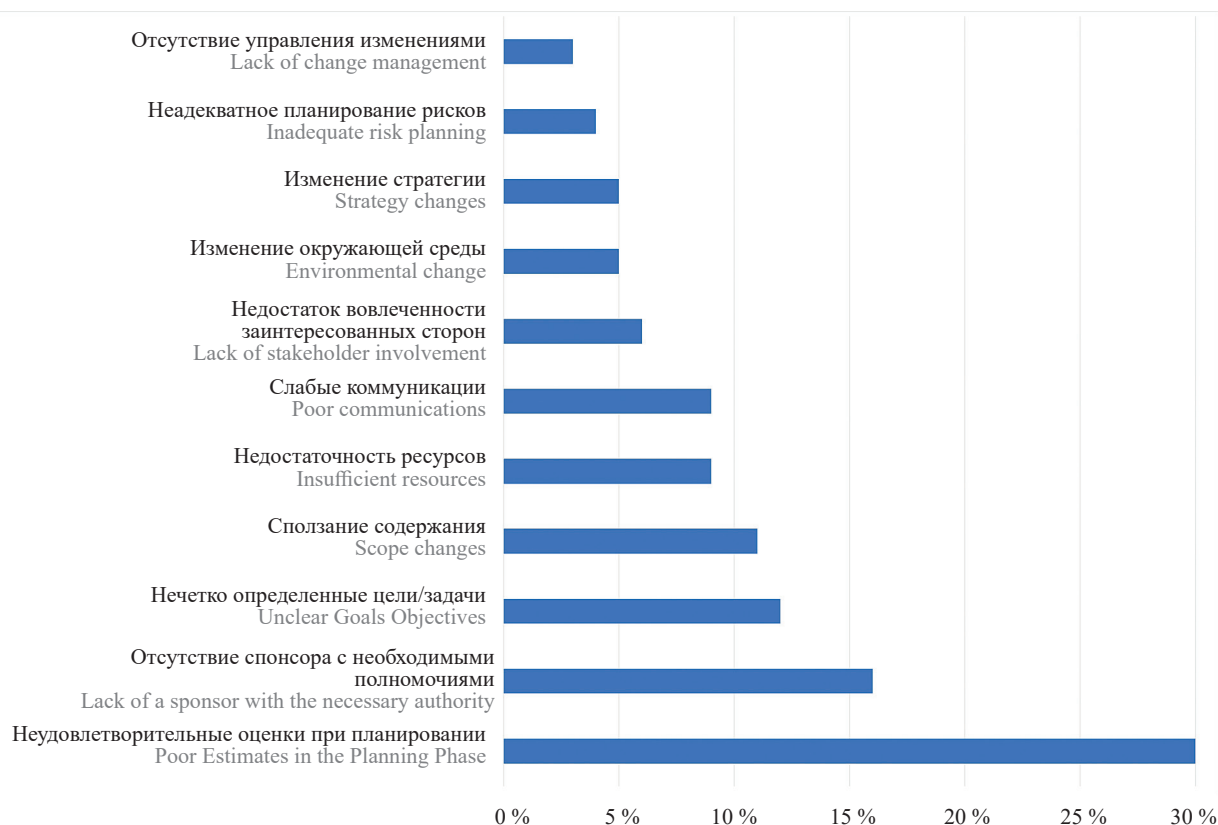


Рис. 2. Анализ причин провалов проектов

Fig. 2. Analysis of project failure causes

Зарубежный анализ за 2018 г.¹⁰ показывает:

- 56 % опрошенных не удовлетворены текущим уровнем зрелости проектного управления в организациях;
- множество проектов не ведется профессионалами в области управления проектами, а 28 % опрошенных сообщают, что их организации не вкладывают средства в обучение управлением проектами;
- приблизительно 60 % проектов в основном или всегда имеют предварительное планирование (базисные документы), определенную методологию и осуществляют управление рисками. Однако существует значительное количество проектов, которые не пользуются этими основными принципами: 28 % иногда или никогда не создают базисные документы и 35 % иногда или никогда не проводят базовую оценку.

Таким образом, анализ результатов исследований и динамики изменения данных результатов еще раз подтверждает, что управление проектом и зрелая система управления качеством, включающая в себя формирование системы создания продукта, т.е. системы процессов, являются областью, требующей внимания и улучшения. При этом удовлетворению данной потребности способствуют такие направления как цифровое развитие, изменение рабочей силы (смена поколений), высокие ожидания заказчика¹¹.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При подготовке статьи рассмотрены международные системы классификации строительной информации OmniClass (США), Uniclass 2015 (Великобритания), CCS (Дания) и CoClass (Швеция), нашедшие широкое практическое применение в области строительства. Кроме международных классификационных систем рассмотрены отечественные классификаторы: классификатор строительных ресурсов, классификатор объектов капитального строительства по их назначению и функционально-технологическим процессам и Московская строительная система классификаторов (МССК). Для разработки структуры и состава классификационных таблиц (КТ) КСИ также производился сравнительный анализ структур, составов и методологических основ рассмотренных классификационных систем.

Использованы актуальные материалы ведущих отечественных и зарубежных профильных экспертов, министерств и ведомств по данной тематике. Произведен анализ отечественной нормативно-тех-

нической базы и законодательства в области информационного моделирования в строительстве.

Представленное исследование выполнено методами системного подхода, сравнительного анализа и обобщения. Применены эмпирические (описание, сравнение) и теоретические (формализация — построение абстрактно-математических моделей, раскрывающих сущность изучаемых процессов) научно-исследовательские методы.

Разработка КТ в рамках исследования состояла из семи этапов:

1. Анализ существующих международных и национальных стандартов в области классификации строительной информации.
2. Сопоставительный анализ референтных для КТ «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация» классификационных таблиц, входящих в состав существующих зарубежных и отечественных классификаторов и систем классификации.
3. Анализ существующей базы нормативно-технической документации в строительстве на предмет выявления информационных источников и дополнительных требований для разрабатываемых КТ.
4. Анализ действующих правовых документов в сфере градостроительства на предмет выявления потенциальных информационных источников и ограничивающих требований для разрабатываемой КТ.
5. Формирование требований к структуре и составу КТ «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация» на основе результатов проведенного анализа в пп. 1–4.
6. Формирование терминологических словарей для информационных сущностей, относящихся к предметной области КТ, и соответствующих им характеристик (применимые сущности).
7. Разработка структуры, содержания и описания КТ «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация».

При разработке терминологических словарей, являющихся основой для создания КТ «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация» в качестве информационных источников для формирования базы терминов и определений были использованы:

- источники, описывающие подходы к классификации информации;
- референтные классификационные таблицы;
- источники из Постановления Правительства РФ от 04.07.2020 № 985;
- источники типа ФЗ, технические регламенты (ТР);
- источники типа СНиП, СП;
- документы типа ГОСТ и ИСО;
- литература, публикации и пр. источники.

Статистическая информация проанализированных материалов представлена в табл. 1.

¹⁰ The State of Project Management. Annual Survey 2018. Wellington. URL: <https://www.wellington.co.uk/wp-content/uploads/2018/05/The-State-of-Project-Management-Survey-2018-FINAL.pdf>

¹¹ Success Rates Rise. Transforming the High Cost of Low Performance. PMI's Pulse of the Profession. 9th Global Project Management Survey 2017. URL: <https://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2017.pdf>

Табл. 1. Результаты анализа НТД на предмет возможности применения при формировании КТ «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация»**Table 1.** Results of analysis of normative and technical documentation for the possibility of application in the formation of the classification tables “Process management”, “Design processes” and “Information”

№ п/п No.	Наименование параметра Parameter name	Количество, шт. Quantity, pcs.		
		КТ «Управление процессами» СТ “Process management”	КТ «Процессы проектирования» СТ “Design processes”	КТ «Информация» СТ “Information”
1	Проанализировано всего источников Sources analyzed	148	148	151
2	Количество источников, не входящих в перечень Постановления Правительства РФ от 04.07.2020 № 985 The number of sources not included in the list of the Decree of the Government of the Russian Federation of 04.07.2020 No. 985	70	7	78
3	Количество источников, не содержащих применимые информационные сущности The number of sources that do not contain applicable information entities	121	46	84
4	Количество источников, содержащих мало применимых информационных сущностей The number of sources containing few applicable information entities	8	80	42
5	Количество источников, содержащих применимые информационные сущности The number of sources containing applicable information entities	11	12	14
6	Количество источников, содержащих много применимых информационных сущностей Number of sources containing many applicable information entities	8	10	11

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования по итогам анализа информационных источников выявлено отсутствие в них конкретных требований к организации внутренних структур и составов КТ по таким направлениям деятельности в строительстве, как управление, проектирование и строительная информация. Вся выявленная информация носит общий и рекомендательный характер и/или требует дополнительной обработки путем анализа и синтеза.

В связи с этим на основании установленных общих (не связанных с конкретными направлениями деятельности или тематикой) требований и рекомендаций нормативной базы к типовой организации структур и составов КТ были сформированы верхнеуровневые структуры классификационных таблиц «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация». Для непосредственно самой классификации внутри КТ применен си-

стемный подход к классификации в соответствии с ISO/IEC 81346-12:2018, который заключается в выделении из общего числа объектов отдельных совокупностей взаимосвязанных объектов, отделенных от окружающей среды и рассматриваемых в определенном контексте как единое целое. Преимуществом системного подхода является возможность упорядочивания представления множества разрозненных объектов, что значительно повышает эффективность процессов управления информацией о классифицируемых объектах и служит оптимальным подходом в контексте настоящего исследования, ввиду крайне обширного объема информационных сущностей, которые тем или иным способом связаны с рассматриваемыми процессами.

Тем не менее существуют отличия в методологических основах построения структуры КТ для направлений деятельности в строительстве, таких как управление, проектирование, информация, подходы

к построению структуры которых приведены ниже для более глубокого понимания этих отличий.

Основой для создания КТ по направлениям управление, проектирование и информация также являются терминологические словари, разработанные в рамках исследования, в которые включены термины, относящиеся к информационным сущностям управления процессами, процессам проектирования и информации в строительстве. По результатам анализа существующей нормативно-технической базы в области строительства и иных источников на предмет наличия применимых к исследованию сущностей разработаны таблицы терминологических словарей с внесением выявленных информационных сущностей, их определений и атрибутов. При идентификации информационных сущностей в том числе был использован реверсивный подход, т.е. выборка терминов, фактически относящихся к классам ресурс, информация, результат, и дальнейший их анализ, экстраполяция и проецирование на процессы управления и процессы проектирования. При идентификации информационных сущностей для КТ «Информация» выборка терминов по классам ресурс, процессы, результат осуществлялась с последующим их анализом, экстраполяцией и проецированием на базовый класс «Информация». При этом формирование терминологических словарей выполнялось итерационно, что позволило сформировать более комплексную картину, достаточную и репрезентативную выборку информационных сущностей для разработки КТ «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация». Кроме того, сформированы терминологические словари характеристик информационных сущностей, относящихся к процессам управления, процессам проектирования и информации. В связи с этим в рассматриваемых информационных источниках идентификации подлежали также понятия, соответствующие характеристикам или значениям характеристик искомым информационным сущностям. Формулировки характеристик, явно не присутствующих в рассматриваемых информационных источниках, создавались на основании анализа, экстраполяции и проецирования на сущности, связанные с процессами управления, проектирования, информации.

При формировании верхнеуровневой структуры КТ «Управление процессами» применены системный и процессный подходы [1] к процессам управления, а именно использование процессного подхода как основы структуры классификатора и частичное применение системного подхода при разработке структуры КТ. Формирование структуры КТ «Управление процессами» осуществлялось от предметных областей деятельности по управлению проектами (предметных групп процессов) к управленческим группам процессов, присущих специ-

ческой области управление проектом (рис. 3–6) (или управление процессами).

Согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2015, проектом считается уникальный процесс, состоящий из совокупности скоординированных и управляемых видов деятельности с начальной и конечной датами, принятый для достижения цели, соответствующий конкретным требованиям, включая ограничения по срокам, стоимости и ресурсам. В связи с этим термин «Управление процессами» в сутевом значении приравнивается к термину «Управление проектом».

Следует отметить, что классификация процессов по управленческим группам (табл. 2) по своей сути отражает философию процессного подхода, а по предметным группам (табл. 3) — системного или функционального подхода.

Ввиду того, что предметные области управления проектом четко очерчиваются по итогам анализа информационных источников, их однозначное определение и, как следствие, формирование на их основе структуры КТ являются наиболее целесообразными.

Фрагмент классификационной таблицы «Управление процессами» приведен на рис. 7.

Описание КТ «Управление процессами» представлено в табл. 4.

При формировании верхнеуровневой структуры КТ «Процессы проектирования» также были применены системный и процессный подходы [1] к процессам управления, а именно процессный подход, как основа структуры КТ с частичным использованием системного подхода при разработке структуры (рис. 8).

При классификации базовых классов КТ «Процессы проектирования» был применен процессный подход структурирования процессов проектирования. Все процессы проектирования разделены на отдельные классы по управленческой группе (табл. 5).

При классификации подклассов КТ «Процессы проектирования» также применен процессный подход структурирования процессов проектирования. Например, процесс разработки частного технического задания, определение исходных данных и ожидаемых результатов процесса проектирования, составление карты процессов проектирования были отнесены к одному классу процесса инициализации по принадлежности к соответствующей управленческой группе. Исключением (применения комбинированного подхода) является подход для классификации подкласса «Процесс разработки проектных решений», который отражает структуру Постановления Правительства № 87, привычен и понятен ответственному проектировщику. Таким образом, подклассы, связанные с разработкой и оформлением разделов проектной документации, показаны не в виде универсального

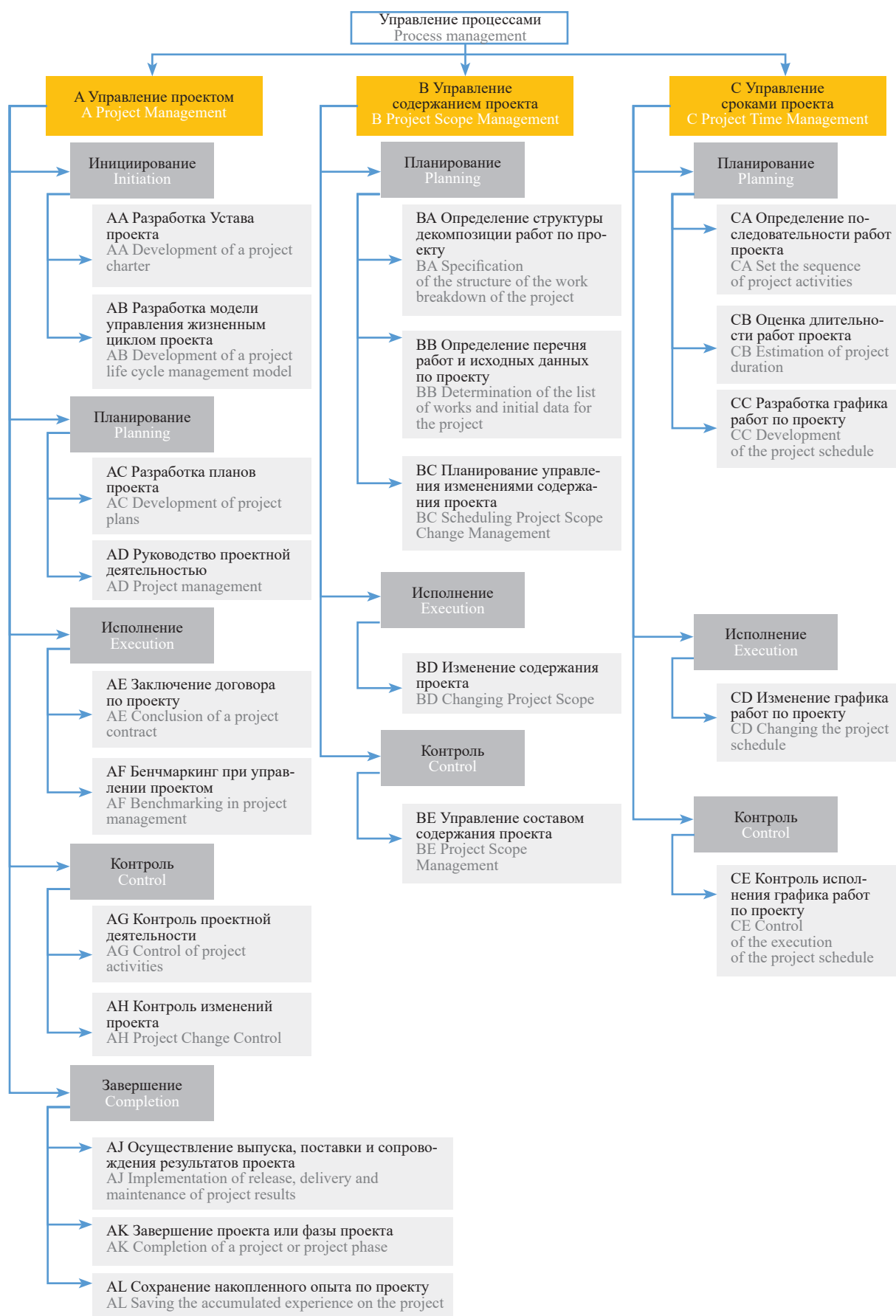


Рис. 3. Верхнеуровневая структура КТ «Управление процессами» (классы А–С)

Fig. 3. Top-level structure of classification table “Process management” (A–C classes)

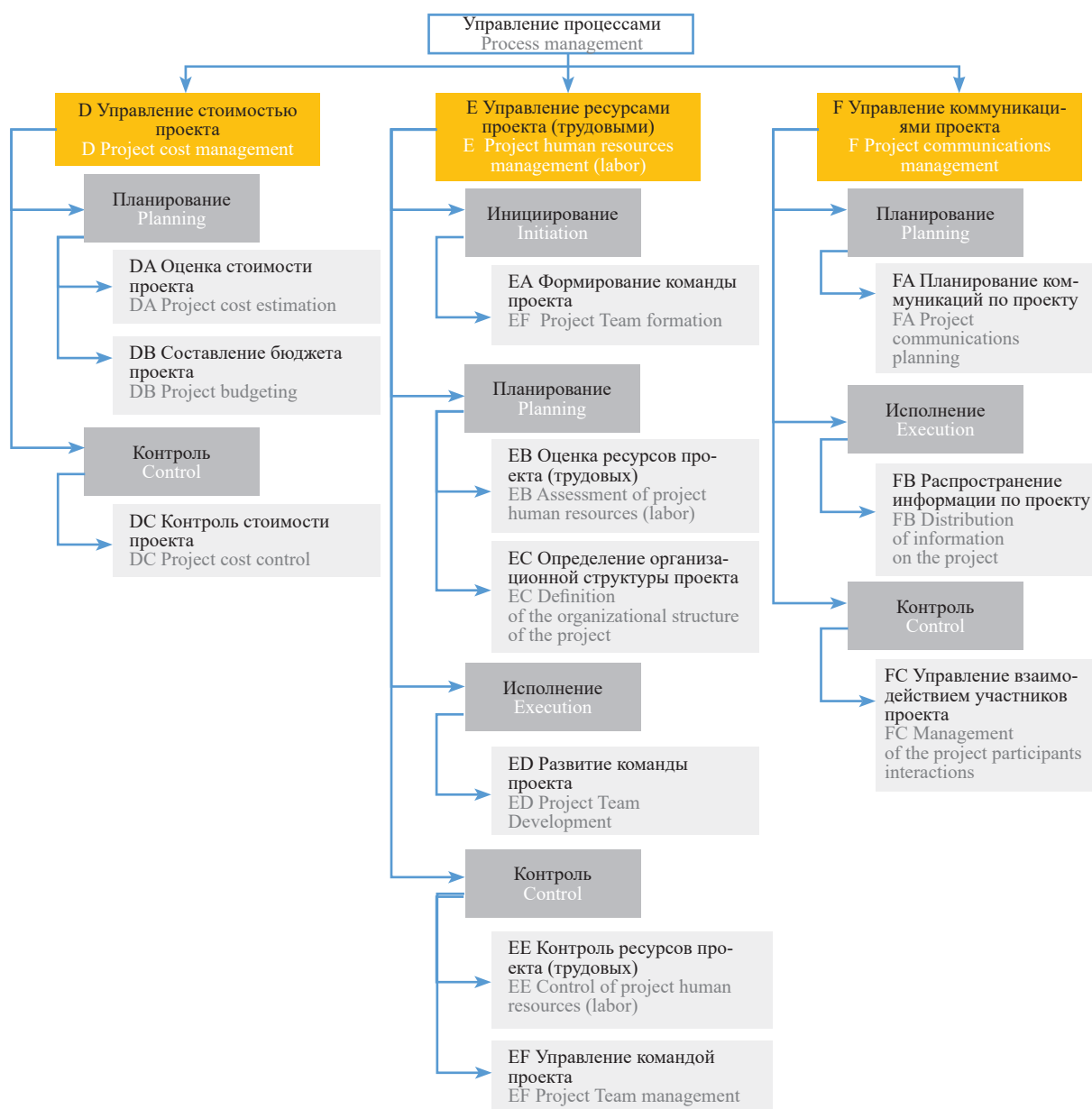


Рис. 4. Верхнеуровневая структура КТ «Управление процессами» (классы D-F)

Fig. 4. Top-level structure of classification table “Process management” (D-F classes)

процесса, а разбиты по специализациям проектной деятельности в соответствии с Постановлением Правительства № 87, при обновлении которого, возможно, потребуется и обновление КТ «Процессы проектирования», что с одной стороны неудобно, но с другой — позволит поддерживать КТ «Процессы проектирования» в актуальном состоянии.

Кроме того, в КТ «Процессы проектирования» выделяются типы подклассов процессов проектирования, что в первую очередь обусловлено принятым подходом к формированию структуры КТ, т.е. формированием структуры от управленческих групп процессов к предметным областям деятельности. При этом для КТ «Процессы про-

ектирования» деление верхнеуровневой структуры КТ по предметным областям не является оптимальным ввиду того, что предметные области в процессах проектирования строительных объектов подвержены постоянному улучшению и изменению. В связи с этим для формирования структуры КТ «Процессы проектирования» и с учетом сложившейся практики проектирования в РФ оптимальным представляется комбинированный подход.

Фрагмент КТ «Процессы проектирования» приведен на рис. 9

Описание КТ «Процессы проектирования» представлено в табл. 6.

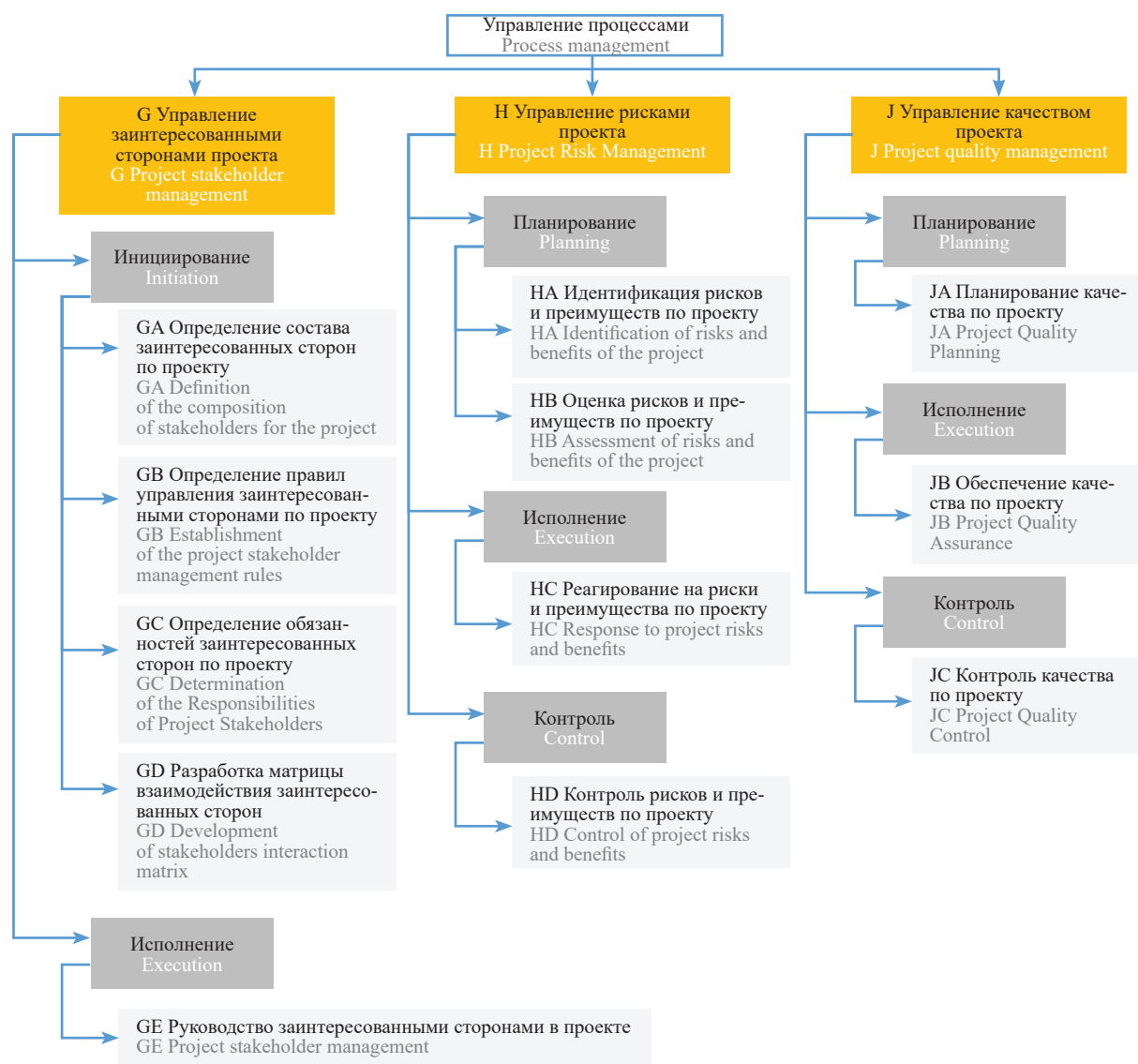


Рис. 5. Верхнеуровневая структура КТ «Управление процессами» (классы G–J)

Fig. 5. Top-level structure of classification table “Process management” (G–J classes)

По результатам анализа информационных источников выявлено, что построение КТ «Информация» рекомендуется выполнять по принадлежности к строительным объектам (компонент, технологическая система) или по принадлежности к группам процессов.

Таким образом, формирование структуры КТ «Информация» осуществлялось от предметных областей деятельности в строительстве с увеличением детализации при создании подклассов и типов элементов КТ (рис. 10–12).

При этом по результатам анализа информационных источников и практики строительства в РФ определено, что оптимальным является подход к группировке КТ «Информация» по группам процессов, т.е. с выделением основных предметных областей деятельности в строительстве, и применение их в качестве основных классов КТ «Информация».

Таким образом, были сформированы десять классов верхнего уровня (табл. 7).

Предметными группами для КТ «Информация» служат конкретные области деятельности в строительстве, включающие деятельность по управлению процессами и проектами (проектом считается уникальный процесс, состоящий из совокупности скоординированных и управляемых видов деятельности с начальной и конечной датами, предпринятый для достижения цели, соответствующий конкретным требованиям, включая ограничения по срокам, стоимости и ресурсам).

Следует отметить, что класс верхнего уровня «Простейшие элементы информации» выделен не на основании анализа предметных областей строительной деятельности, а на основании следующих заключений:

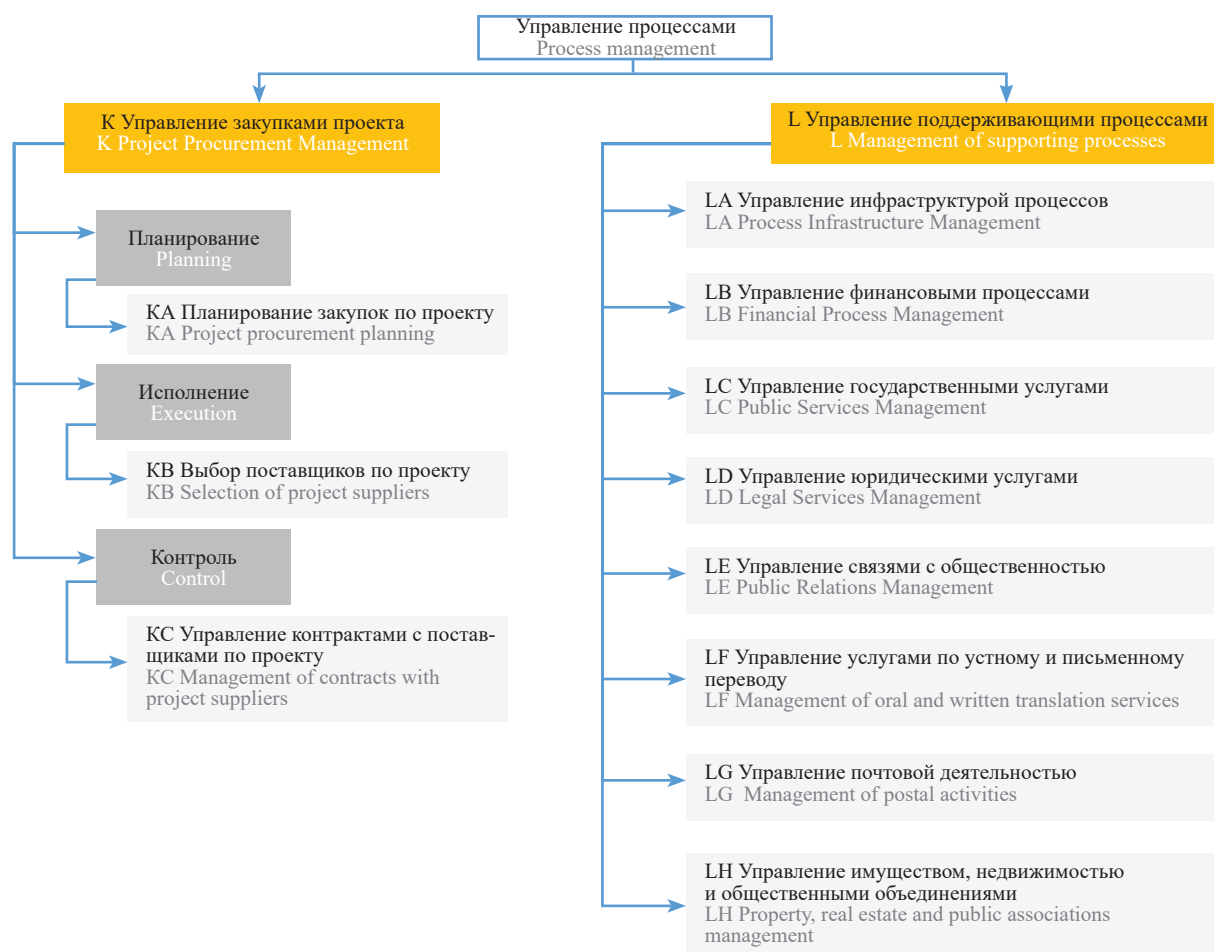


Рис. 6. Верхнеуровневая структура КТ «Управление процессами» (классы К–Л)

Fig. 6. Top-level structure of classification table “Process management” (K–L classes)

Табл. 2. Состав управленческой группы для КТ «Управление процессами»

Table 2. Structure of the management group for classification table “Process management”

Наименование управленческой группы процессов The name of the process management group	Определение управленческой группы процессов Definition of the process management group
Инициирование Initiation	Определяет/разрешает начало проекта/фазы проекта. Процессы инициирования применяют для того, чтобы начать фазу проекта или сам проект, определить назначение проекта или его фазы, сформулировать задачи и предоставить руководителю проекта полномочия продолжать работы по проекту Defines/authorizes the start of the project/project phase. Initiation processes are used to start a phase of a project or the project itself, define the purpose of a project or phase, formulate objectives, and authorize the project manager to proceed with a project
Планирование Planning	Определяет и уточняет общее содержание проекта, уточняет цели, а также последовательность действий для достижения цели. Процессы планирования применяют для детального планирования проекта и формирования базового плана, в соответствии с которым будут выполнены работы проекта и относительно которого будет проведена оценка исполнения Defines and clarifies the general scope of the project, clarifies the goals, as well as the sequence of actions to achieve the goal. Planning processes are used to plan a project in detail and form a baseline according to which project work will be performed and against which performance will be assessed

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Исполнение Execution	Координация всех ресурсов, интеграция и выполнение операций проекта в соответствии с планом управления проектом. Процессы исполнения применяют для реализации работ по управлению проектом, обеспечивающих получение результатов проекта в соответствии с планами Coordination of all resources, integration and execution of project activities in accordance with the project management plan. Execution processes are used to implement project management activities to ensure project deliverables are delivered as planned
Контроль Control	Отслеживание, анализ и регулирование хода и эффективности исполнения проекта, выявление отклонений, инициация изменений, внесение изменений. Процессы контроля применяют для отслеживания, анализа и регулирования хода выполнения проекта, а также для оценки эффективности исполнения проекта, выявления тех областей, в которых требуется применение корректирующих и предупреждающих действий, формирования запросов на изменения в проекте (при необходимости) для обеспечения достижения целей проекта Tracking, analyzing and regulating the progress and efficiency of project execution, identifying deviations, initiating changes, making changes. Control processes are used to track, analyze and regulate the progress of the project, as well as to assess the effectiveness of the project, identify those areas in which the application of corrective and preventive actions is required, and form requests for changes in the project (if necessary) to ensure the achievement of project objectives
Завершение Completion	Закрытие всех действий для формального завершения проекта, фазы или контрактных обязательств. Процессы завершения применяют для формального признания того, что фаза или проект в целом завершены, а также для анализа и соответствующего применения полученного опыта Closing all activities for the formal completion of a project, phase, or contractual obligations. Completion processes are used to formally acknowledge that a phase or project as a whole has been completed and for the analysis and appropriate application of the experience gained

Табл. 3. Состав предметной группы для КТ «Управление процессами»

Table 3. Structure of the subject group for classification table "Process management"

Наименование предметной группы процессов Name of the subject group of processes	Определение предметной группы процессов Definition of the subject group of processes
Управление проектом Project management	Предметная группа процессов управления, охватывающая процессы, необходимые для соответствующей координации между различными элементами проекта, и включающая процессы, необходимые для выявления, определения, комбинирования, объединения, координации, контроля и завершения различных процессов и работ, связанных с проектом The subject group of management processes that covers the processes necessary for appropriate coordination between the various elements of the project and includes the processes necessary for identifying, defining, combining, combining, coordinating, controlling and completing various processes and activities related to the project
Управление содержанием проекта Project Scope Management	Предметная группа процессов управления содержанием проекта, охватывающая процессы, обеспечивающие определение и включение в проект только тех работ и результатов, которые необходимы для успешного выполнения проекта The subject group of project scope management processes which covers the processes that ensure the identification and inclusion in the project that only the activities and outputs that are necessary for the successful completion of the project
Управление сроками проекта Project time management	Предметная группа процессов управления сроками проекта, охватывающая процессы, необходимые для создания календарного графика проекта, отслеживания его выполнения и обеспечения своевременного завершения работ по проекту The subject group of project time management processes, covering the processes required to create a project timeline, track progress, and ensure that project work is completed on time

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Управление стоимостью проекта Project cost management	Предметная группа процессов управления стоимостью проекта, охватывающая процессы формирования бюджета, отслеживания его выполнения и контроля затрат The subject group of project cost management processes, covering the processes of budgeting, tracking its implementation and cost control
Управление ресурсами проекта (трудовыми) Project resource management (labor)	Предметная группа процессов управления ресурсами проекта, охватывающая процессы, позволяющие обеспечить проект трудовыми ресурсами, достаточными для достижения поставленных целей и задач проекта The subject group of project resource management processes, covering the processes that allow the project to provide sufficient human resources to achieve the goals and objectives of the project
Управление коммуникациями проекта Project communications management	Предметная группа процессов управления коммуникациями проекта, охватывающая процессы, необходимые для планирования и управления коммуникациями, а также для распространения информации, относящейся к проекту The subject group of project communication management processes, covering the processes required to plan and manage communications, and to disseminate information related to the project
Управление заинтересованными сторонами проекта Project Stakeholder Management	Предметная группа процессов управления, связанных с заинтересованными лицами, охватывающая процессы по выявлению всех заинтересованных лиц проекта и взаимодействию с ними, в том числе с куратором, заказчиком и другими участниками проекта The subject group of management processes related to stakeholders, covering the processes for identifying and interacting with all stakeholders of the project, including with the curator, customer and other project participants.
Управление рисками проекта Project Risk Management	Предметная группа процессов управления рисками проекта, охватывающая процессы, необходимые для идентификации и управления угрозами и возможностями в проекте The subject group of project risk management processes, covering the processes required to identify and manage threats and opportunities in the project.
Управление качеством проекта Project quality management	Предметная группа процессов управления качеством проекта, охватывающая процессы, необходимые для планирования и обеспечения контроля качества в проекте The subject group of project quality management processes, covering the processes needed to plan and ensure quality control in the project
Управление закупками проекта Project procurement management	Предметная группа процессов управления закупками проекта, охватывающая процессы, требуемые для планирования снабжения, приобретения или получения необходимых для завершения проекта продуктов, услуг или результатов, а также процессы управления взаимоотношениями с поставщиками по проекту The subject group of project procurement management processes, the processes required to plan supply, purchase or obtain the products, services or deliverables required to complete the project, as well as the processes of managing relationships with suppliers for the project
Управление поддерживающими процессами Supporting process management	Предметная группа процессов управления поддерживающими процессами организации, охватывающая процессы повседневной деятельности организации и являющаяся неотъемлемой частью деятельности организации во всех секторах деятельности A subject group of processes for managing the supporting processes of the organization, covering the processes of the organization's daily activities and being an integral part of the organization's activities in all sectors of activity

Табл. 4. Описание КТ «Управление процессами»

Table 4. Description of the classification table “Process management”

Параметр КТ Parameter of CT	Описание КТ CT description
Наименование КТ CT name	Управление процессами Process management
Версия КТ CT version	0,1

Продолжение табл. 4 / Continuation of the Table 4

Номер КТ (согласно Приказу Минстроя РФ от 06.08.2020 № 430/ПР) CT number (according to the Decree of the Ministry of Construction of the Russian Federation of 08/06/2020 No. 430 / PR)	7
Код КТ (РУС/ENG) CT code (RUS / ENG)	УПр / Mng
Базовые стандарты Basic standards	ГОСТ Р 10.0.05-2019/ИСО 12006-2:2015 ISO/IEC 81346-12:2018 IEC 81346-1:2009 IEC 81346-2:2019 GOST R 10.0.05-2019 / ISO 12006-2: 2015 ISO / IEC 81346-12: 2018 IEC 81346-1: 2009 IEC 81346-2: 2019
Назначение КТ CT purpose	КТ используется для классификации управленческих процессов CT is used to classify management processes
Объект классификации Classification object	Процессы управления Management processes
Метод классификации Classification method	Фасетно-перечислительный Facet-enumerative
Основание классификации Basis of classification	Вид процесса. Process type. Предметная группа Subject group
Примеры классов КТ Examples of CT classes	ВАА Определение принципов декомпозиции работ по проекту. BAA Defining principles of work breakdown for the project. ЕАН Определение ролей в команде проекта EAN Defining Roles in the Project Team
Общее количество классов Total number of classes	257
Общее количество типов классов Total number of class types	0
Общее количество позиций КТ Total number of CT positions	257
Метод кодирования Coding method	Последовательный Consistent
Формат кодовых обозначений классов Format of class code designations	[A] .. [A]
Алфавит кодовых обозначений классов (допустимые значения кодового обозначения) Alphabet of class code designations (allowable code designation values)	Заглавные буквы латинского алфавита за исключением «О» и «I» Capital letters of the Latin alphabet except for «O» and «I»
Формат кодовых обозначений типов Format of class code designations	[A] .. [A][NNN]

Окончание табл. 4 / End of the Table 4

Алфавит кодовых обозначений типов Alphabet of class code designations	Цифровые символы от 0 до 9 Numeric characters from 0 to 9
Максимальный уровень иерархической вложенности КТ (без учета типов) The maximum level of hierarchical nesting of CT (excluding types)	3
Количество классов верхнего уровня Number of top-level classes	11
Интеграция данных (интеграция данных из иных классификаторов, спецификаций, справочников) Data integration (integration of data from other classifiers, specifications, reference books)	—
Синхронизация КТ (наличие переходных ключей для иных классификаторов, классификационных систем и прочих информационных ресурсов) CT synchronization (availability of transition keys for other classifiers, classification systems and other information resources)	—
Возможность вертикального масштабирования КТ Vertical scaling of CT	За счет типов класса Due to the class types
Возможность горизонтального масштабирования КТ Horizontal CT scaling	Для классов ограничена 24 позициями. Limited to 24 positions for classes. Для типов ограничена 999 позициями Limited to 999 positions for types
Потенциальная емкость КТ (максимально возможное количество классов, без учета типов) Potential CT capacity (the maximum possible number of classes, excluding types)	13 824 классов / classes

Табл. 5. Состав управленческой группы для КТ «Процессы проектирования»

Table 5. Structure of the management group for classification table “Design processes”

Наименование управленческой группы процессов The name of the process management group	Определение управленческой группы процессов Defining the process management group
Инициирование (процесс инициирования) Initiation (initiation process)	Процесс формирования задания на проектирование, определения исходных данных при проектировании и ожидаемых результатов процесса проектирования для старта работ по проектированию The process of forming a design assignment, determining the initial data during the design and the expected results of the design process for the start of design work
Исполнение (процесс разработки проектных решений) Execution (design solutions development process)	Процесс преобразования всех требований для проектирования в проектные решения The process of converting all design requirements into design solutions
Контроль (процесс проверки проектных решений) Control (design solutions verification process)	Действия всех видов верификации и валидации проектных решений, в том числе выбранные методы и регистрация полученных результатов проверки Actions of all types of verification and validation of design solutions, including the selected methods and registration of the obtained verification results
Завершение (процесс завершения) Completion (completion process)	Процесс закрытия всех действий для формального завершения проектных работ Closing process for all activities to formally complete design work

Табл. 6. Описание классификационной таблицы «Процессы проектирования»

Table 6. Description of the classification table “Design processes”

Параметр КТ Parameter of CT	Описание КТ CT description
Наименование КТ CT name	Процессы проектирования Design processes
Версия КТ CT version	0,1
Номер КТ (согласно Приказу Минстроя РФ от 06.08.2020 № 430/ПР) CT number (according to the Decree of the Ministry of Construction of the Russian Federation of 08/06/2020 No. 430/PR)	10
Код КТ (РУС/ENG) CT code (RUS / ENG)	ППр / PDe
Базовые стандарты Basic standards	ГОСТ Р 10.0.05-2019/ИСО 12006-2:2015 ISO/IEC 81346-12:2018 IEC 81346-1:2009 IEC 81346-2:2019 GOST R 10.0.05-2019 / ISO 12006-2: 2015 ISO / IEC 81346-12: 2018 IEC 81346-1: 2009 IEC 81346-2: 2019
Назначение КТ CT purpose	КТ используется для классификации процессов проектирования CT is used to classify design processes
Объект классификации Classification object	Процессы проектирования Design processes
Метод классификации Classification method	Фасетно-перечислительный Facet-enumerative
Основание классификации Basis of classification	Вид процессов Process type
Примеры классов КТ Examples of CT classes	ААС Формирование частного технического задания на проектирование. Development of private terms of reference for design ДВА Печать проектной документации DBA Printing of project documentation
Общее количество классов Total number of classes	165
Общее количество типов классов Total number of class types	70
Общее количество позиций КТ Total number of CT positions	235
Метод кодирования Coding method	Последовательный Consistent
Формат кодовых обозначений классов Format of class code designations	[A] .. [A]
Алфавит кодовых обозначений классов (допустимые значения кодового обозначения) Alphabet of class code designations (allowable code designation values)	Заглавные буквы латинского алфавита за исключением «O» и «I» Capital letters of the Latin alphabet except for “O” and “I”

Окончание табл. 6 / End of the Table 6

Формат кодовых обозначений типов Format of class code designations	[A] .. [A][NNN]
Алфавит кодовых обозначений типов Alphabet of class code designations	Цифровые символы от 0 до 9 Numeric characters from 0 to 9
Максимальный уровень иерархической вложенности КТ (без учета типов) The maximum level of hierarchical nesting of CT (excluding types)	4
Количество классов верхнего уровня Number of top-level classes	4
Интеграция данных (интеграция данных из иных классификаторов, спецификаций, справочников) Data integration (integration of data from other classifiers, specifications, reference books)	—
Синхронизация КТ (наличие переходных ключей для иных классификаторов, классификационных систем и прочих информационных ресурсов) CT synchronization (availability of transition keys for other classifiers, classification systems and other information resources)	—
Возможность вертикального масштабирования КТ Vertical scaling of CT	За счет типов класса Due to the class types
Возможность горизонтального масштабирования КТ Horizontal CT scaling	Для классов ограничена 24 позициями Limited to 24 positions for classes Для типов ограничена 999 позициями Limited to 999 positions for types
Потенциальная емкость КТ (максимально возможное количество классов, без учета типов) Potential CT capacity (the maximum possible number of classes, excluding types)	331 776 классов 331 776 classes

Табл. 7. Состав базовых классов для КТ «Информация»

Table 7. Structure of base classes for classification table “Information”

Наименование класса верхнего уровня Top-level class name	Определение Definition
Регламентирующая и регулирующая информация Controlling and regulatory information	Нормативные акты и документы, регламентирующие и регулирующие деятельность в строительстве Normative acts and documents controlling and regulating activities in construction
Идентификационная (общая) информация об ОКС Identification (general) information about the capital construction object	Информация, определяющая основные параметры непосредственно самого ОКС Information that determines the main parameters of the capital construction object itself
Информация об этапах жизненного цикла ОКС Information about the stages of the life cycle of a capital construction object	Информация о деятельности в строительстве на этапах жизненного цикла ОКС Information on activities in construction at the stages of the life cycle of a capital construction object

Окончание табл. 7 / End of the Table 7

Финансовая информация Financial information	Сведения финансового характера, имеющие предметное содержание и предназначенные для снятия неопределенности и принятия финансовых решений Information of a financial nature that has a substantive content and is intended to remove uncertainty and make financial decisions
Информация о ресурсах (трудовых) Information about human resources (labor)	Информация, определяющая сведения о трудовых ресурсах, необходимых для трудовой деятельности Information defining data on the human resources (labor) required for labor activity
Коммуникационная информация Communication information	Информация, предназначенная для обмена и понимания информации между двумя и более объектами или совокупность всех информационных потоков в организации Information intended for the exchange and understanding of information between two or more objects or the totality of all information flows in an organization
Информация о закупках Procurement Information	Сведения, касающиеся процесса составления, управления и выполнения договоров, относящихся к поставке товаров, услуг, проектных и строительных работ, ликвидации оборудования или любого сочетания указанного Information concerning the process of drafting, managing and executing contracts related to the supply of goods, services, design and construction works, disposal of equipment, or any combination of the above
Информация о материальных ресурсах Material resource information	Информация, определяющая сведения о материальных ресурсах, необходимых для непрерывного производства продукции, оказания услуг и выполнения работ по договорам Information defining data on the material resources required for the continuous production of products, the provision of services and the performance of work under contracts
Юридическая информация Legal information	Правовые акты, а также вся информация, которая связана с правом: материалы подготовки законопроектов и других нормативных правовых актов, их обсуждения и принятия, учета и упорядочения, толкования и реализации правовых норм, изучения практики их применения Legal acts, as well as all information related to law: materials for the preparation of bills and other regulatory legal acts, their discussion and adoption, accounting and ordering, interpretation and implementation of legal norms, studying the practice of their application
Простейшие элементы информации The simplest elements of information	Элементы информации, применимые ко всем видам деятельности, определяющие текстовую и графическую информацию или информационную модель и позволяющие структурировать и однозначно идентифицировать основные элементы (требования, рекомендации и пр.) информации Elements of information applicable to all types of activity, defining textual and graphic information or an information model and allowing to structure and uniquely identify the main elements (requirements, recommendations, etc.) of information

• для однозначной идентификации информации в формализованных сущностях, являющихся результатами строительной деятельности или используемых для реализации строительной деятельности, необходимо выделение простейших элементов таких сущностей (например, выделение позиции-требования из документа ГОСТ);

• выделение простейших элементов данных сущностей требует подхода, отличного от того, что преимущественно применяется в КТ «Информация», а их полная синхронизация является неоптимальным решением;

• разработка отдельной КТ, отражающей структуру простейших элементов данных сущностей, служит неоптимальным решением в контексте общего исследования;

• выделение отдельного базового класса «Простейшие элементы информации» в составе КТ «Информация» и одновременное применение его в связке с оставшимися девятью классами верхнего уровня обеспечивают наличие необходимых вышеуказанных интерфейсов.

Фрагмент КТ «Информация» приведен на рис. 13. Описание КТ «Информация» приведено в табл. 8.

Класс	Подкласс 1	Подкласс 2	Тип (%)	Наименование	Определение	Источник	Управленческая группа	Примечание
A				Управление проектом	Предметная группа процессов управления, охватывающая процессы, необходимые для соответствующей координации между различными элементами проекта и включающая процессы, необходимые для выявления, определения, комбинирования, объединения, координации, контроля и завершения различных процессов и работ, связанных с проектом	ГОСТ Р ИСО 21500-2014 ГОСТ Р ИСО 9000-2015 ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 16326-2002 ГОСТ Р 54869-2011		Сформулировано на основании результата анализа источников
	AA			Разработка Устава проекта	Процесс разработки документа, который формально авторизует существование проекта и определяет его ключевые параметры	ГОСТ Р ИСО 21500-2014	Инициирование	Сформулировано на основании результата анализа источников
	AAA			Определение задач проекта	Процесс определения, согласования и документирования ключевых результатов, которые должны быть достигнуты в ходе реализации проекта	ГОСТ Р ИСО 9001-2015	Инициирование	Сформулировано на основании результата анализа источников
	AAB			Определение верхнеуровневой организационной структуры проекта	Процесс определения, согласования и документирования верхнеуровневой организационной структуры проекта, адаптированной к его потребностям, включающий определение ключевых ролей персонала проекта, их прав и обязанностей	ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 16326-2002	Инициирование	Сформулировано на основании результата анализа источников
	AAC			Определение требований и целей проекта	Процесс определения, согласования и документирования ключевых и верхнеуровневых требований и целей проекта, ради которых проект иницируется	ГОСТ Р 54869-2011 ГОСТ Р ИСО 9001-2015	Инициирование	Сформулировано на основании результата анализа источников
	AAD			Определение рисков проекта	Процесс определения, согласования и документирования ключевых и верхнеуровневых рисков и преимуществ проекта	ГОСТ Р ИСО 9001-2015	Инициирование	Сформулировано на основании результата анализа источников
	AAE			Определение политики и методов управления проектом	Процесс определения, согласования и документирования политики и методов управления проектом	ГОСТ Р ИСО 9000-2015	Инициирование	Сформулировано на основании результата анализа источников

Рис. 7. Фрагмент КТ «Управление процессами»

Fig. 7. Fragment of the classification table “Process management”

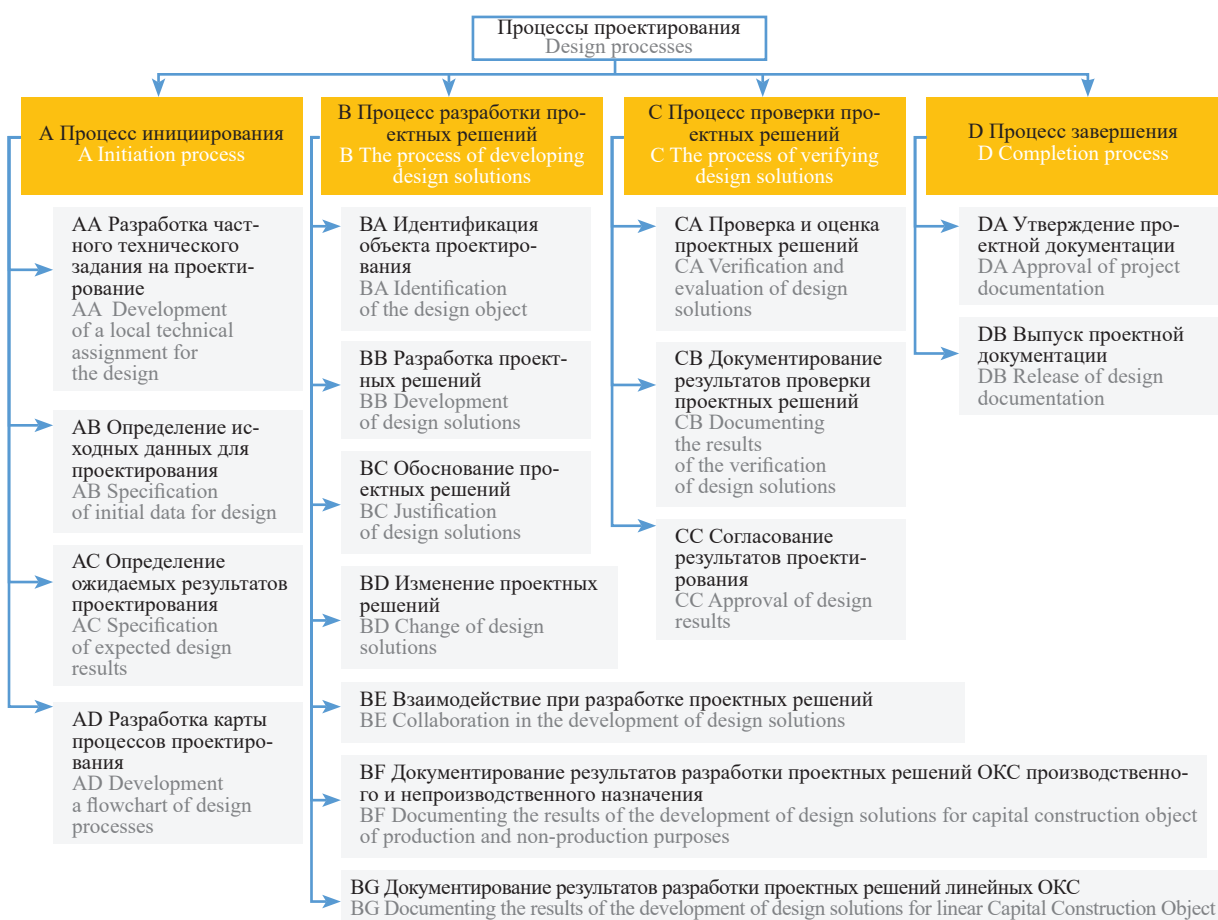


Рис. 8. Верхнеуровневая структура КТ «Процессы проектирования» (классы A-D)

Fig. 8. Top-level structure of classification table “Design processes” (A-D classes)

Табл. 8. Описание КТ «Информация»

Table 8. Description of the classification table "Information"

Параметр КТ Classification table parameter	Описание КТ CT description
Наименование КТ Name of the classification table	Информация Information
Версия КТ Classification table version	0.1
Номер КТ (согласно Приказу Минстроя РФ от 06.08.2020 № 430/ПР) Classification table number (according to the Decree of the Ministry of Construction of the Russian Federation of 08/06/2020 No. 430/PR)	20
Код КТ (РУС/ENG) CT code (RUS/ENG)	Инф / Inf
Базовые стандарты Basic standards	ГОСТ Р 10.0.05-2019/ИСО 12006-2:2015 ISO/IEC 81346-12:2018 IEC 81346-1:2009 IEC 81346-2:2019 GOST R GOST R 10.0.05-2019/ISO 12006-2:2015 ISO/IEC 81346-12:2018 IEC 81346-1:2009 IEC 81346-2:2019
Назначение КТ CT purpose	КТ используется для классификации информации CT is used to classify information
Объект классификации Classification object	Информация Information
Метод классификации Classification method	Фасетно-перечислительный Facet-enumerative
Основание классификации Basis of classification	Вид документа Type of document
Примеры классов КТ Examples of CT classes	ААВЕВ Распоряжение Президента РФ. АСДА Отраслевые стандарты (ОСТ) ААВЕВ Decree of the President of the Russian Federation. АСДА Industry Standards (CCO)
Общее количество классов Total number of classes	847
Общее количество типов классов Total number of class types	506
Общее количество позиций КТ Total number of CT positions	1353
Метод кодирования Coding method	Последовательный Consistent
Формат кодовых обозначений классов Format of class code designations	[A] .. [A]
Алфавит кодовых обозначений классов (допустимые значения кодового обозначения) Alphabet of class code designations (allowable code designation values)	Заглавные буквы латинского алфавита за исключением «О» и «I» Capital letters of the Latin alphabet except for "O" and "I"
Формат кодовых обозначений типов Format of class code designations	[A] .. [A][NNN]

Окончание табл. 8 / End of the Table 8

Алфавит кодовых обозначений типов Alphabet of class code designations	Цифровые символы от 0 до 9 Numeric characters from 0 to 9
Максимальный уровень иерархической вложенности КТ (без учета типов) The maximum level of hierarchical nesting of CT (excluding types)	5
Количество классов верхнего уровня Number of top-level classes	10
Интеграция данных (интеграция данных из иных классификаторов, спецификаций, справочников) Data integration (integration of data from other classifiers, specifications, reference books)	—
Синхронизация КТ (наличие переходных ключей для иных классификаторов, классификационных систем и прочих информационных ресурсов) CT synchronization (availability of transition keys for other classifiers, classification systems and other information resources)	—
Возможность вертикального масштабирования КТ Vertical scaling of CT	За счет типов класса Due to the class types
Возможность горизонтального масштабирования КТ Horizontal CT scaling	Для классов ограничена 24 позициями Limited to 24 positions for classes Для типов ограничена 999 позициями Limited to 999 positions for types
Потенциальная емкость КТ (максимально возможное количество классов без учета типов) Potential capacity of CT (maximum possible number of classes excluding types)	7 962 624 классов / classes

Класс	Подкласс 1	Подкласс 2	Подкласс 3	Тип (%)	Наименование	Определение	Источник	Управленческая группа процессов	Примечания
А					Процесс инициирования	Процесс формирования задания на проектирование, определения исходных данных при проектировании и ожидаемых результатов процесса проектирования для старта работ по проектированию	ГОСТ Р ИСО 21500-2014 ГОСТ Р 54871-2011 ГОСТ Р 54869-2011		Сформулировано на основании результата анализа источников
	АА				Разработка частного технического задания на проектирование	Процесс разработки документа, оформленного в установленном порядке, содержащего цели, требования, основные исходные данные и порядок выполнения работ	ГОСТ Р 57193-2016 ГОСТ Р ИСО 9000-2015 ГОСТ Р ИСО 21504-2016 ГОСТ Р ИСО 21500-2014	Инициирование	Сформулировано на основании результата анализа источников
		ААА			Анализ технического задания на проектирование в составе договора	Деятельность, предпринимаемая для установления пригодности, адекватности, результативности технического задания на проектирование для достижения установленных целей	ГОСТ Р ИСО 21500-2014 ГОСТ Р ИСО 9001-2015 ГОСТ Р ИСО 10006-2019	Инициирование	Сформулировано на основании результата анализа источников
		ААВ			Выборка требований, применимых к объекту проектирования	Процесс выявления требований технического задания, применимых к объекту проектирования	ГОСТ Р ИСО 9001-2015 ГОСТ Р ИСО 10005-2019 ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 16326-2002	Инициирование	Сформулировано на основании результата анализа источников
		ААС			Формирование частного технического задания на проектирование	Процесс написания и оформления в установленном порядке частного технического задания на проектирование	СП 86.13330.2014 ГОСТ Р 54869-2011	Инициирование	Сформулировано на основании результата анализа источников
		ААД			Корректировка частного технического задания на проектирование	Деятельность, предпринимаемая для изменения требований частного технического задания на проектирование объекта по результатам оценки исходных данных и ожидаемых результатов проектирования	ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 16326-2002 ГОСТ Р ИСО 9000-2015 ГОСТ Р ИСО 9001-2015 ГОСТ Р 54147-2010	Инициирование	Сформулировано на основании результата анализа источников
		ААЕ			Утверждение частного технического задания на проектирование	Официальное удостоверение уполномоченного должностного лица о введении в действие частного технического задания	ГОСТ Р 54147-2010 ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 16326-2002 ГОСТ Р 54869-2011 Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 N 87	Инициирование	Сформулировано на основании результата анализа источников

Рис. 9. Фрагмент КТ «Процессы проектирования»

Fig. 9. Fragment of the classification table “Design processes”



Рис. 10. Верхнеуровневая структура КТ «Информация» (классы А–С)

Fig. 10. Top-level structure of classification table “Information” (A–C classes)

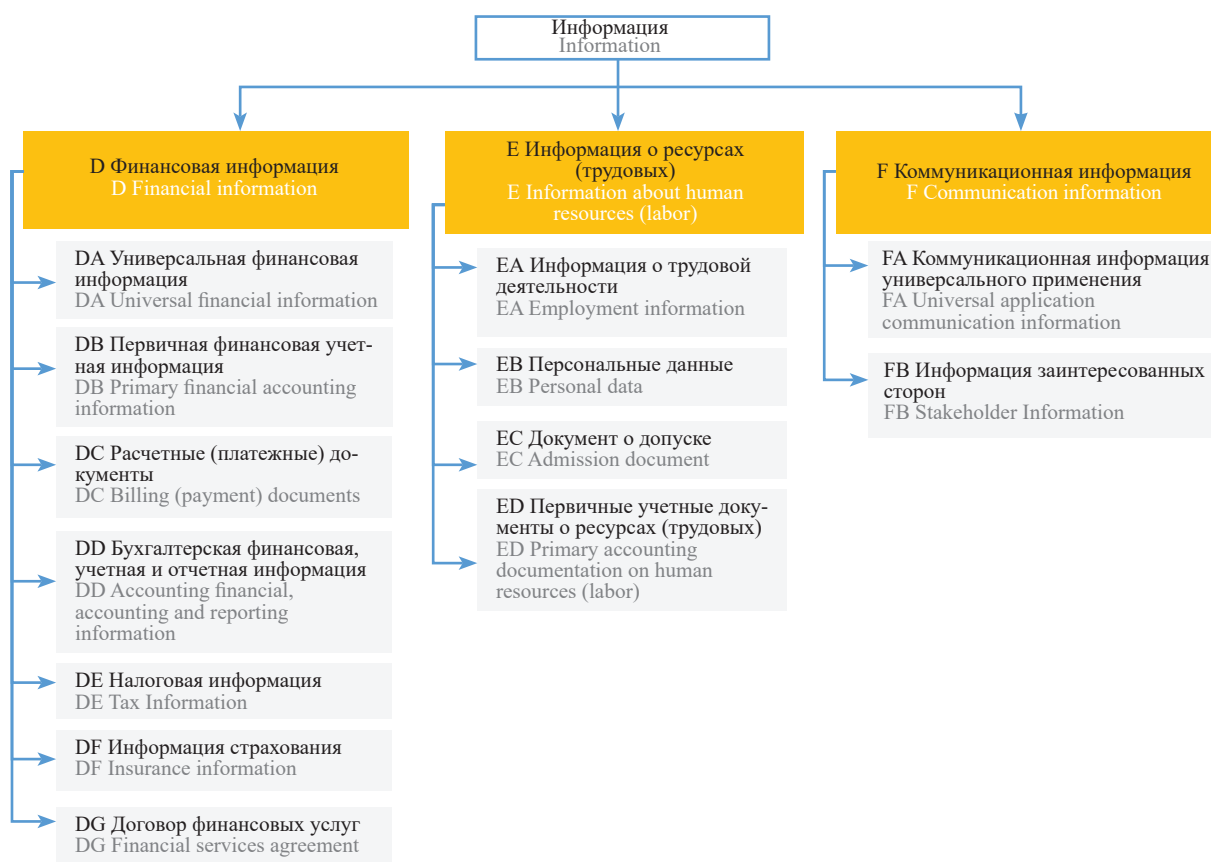


Рис. 11. Верхнеуровневая структура КТ «Информация» (классы D–F)

Fig. 11. Top-level structure of classification table “Information” (D–F classes)

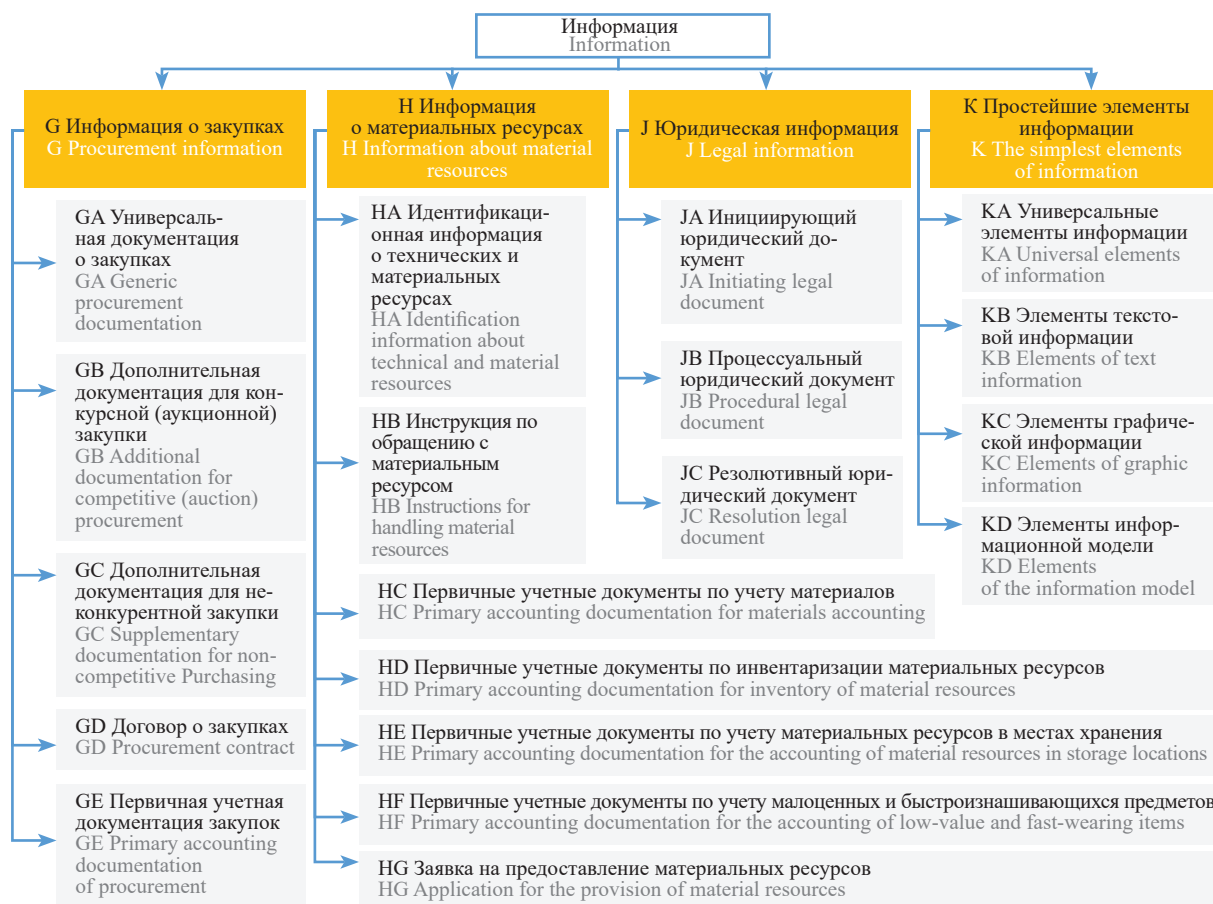


Рис. 12. Верхнеуровневая структура КТ «Информация» (классы G–K)

Fig. 12. Top-level structure of classification table “Information” (G–K classes)

Класс	Подкласс 1	Подкласс 2	Подкласс 3	Подкласс 4	Тип (%)	Наименование	Определение	Источник	Примечания
A						Регламентирующая и регулирующая информация	Нормативные акты и документы, регламентирующие и регулирующие деятельность в строительстве		Сформулировано на основании результата анализа источников
	AA					Нормативно-правовой акт	Письменный официальный документ, принятый (изданный) в определенной форме правотворческим органом в пределах его компетенции и направленный на установление, изменение или отмену правовых норм	Постановление Госстроя России от 13.10.2003 N 183 МДС от 13.10.2003 N 12-16.2003	Сформулировано на основании результата анализа источников
		AAA				Международно-правовой акт	Официальный правоприменительный акт, отражающийся в конкретных формах международных договоров, международных обычаев, актов международных организаций и конференций, регулирующих нормы международного права		Сформулировано на основании результата анализа источников
			AAAA			Международный договор	Официальное соглашение, заключенное в письменной форме, устанавливающее обязательства между двумя или более субъектами международного права (в первую очередь государствами и международными организациями)	Федеральный закон от 15.07.1995 N 101-ФЗ	Сформулировано на основании результата анализа источников
				AAAA010		Односторонний международный договор	Одностороннее волеизъявление субъекта международного права, которое при этом несет юридические последствия исключительно для данного субъекта		Сформулировано на основании результата анализа источников
				AAAA020		Двусторонний международный договор	Международный договор, заключенный между двумя субъектами международного права. Также, в подобном договоре возможны иные ситуации, например, участие с одной стороны единственного государства, а со второй – сразу нескольких.		Сформулировано на основании результата анализа источников
				AAAA030		Многосторонний международный договор	Международный договор, где участниками выступают три и больше субъектов международного права		Сформулировано на основании результата анализа источников

Рис. 13. Фрагмент КТ «Информация»

Fig. 13. Fragment of the classification table “Information”

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полноценное внедрение технологий информационного моделирования на всех этапах ЖЦ ОКС подразумевает эффективное и «бесшовное» управление информацией ОКС. Эффективное управление информацией обуславливается, прежде всего, ее структурированностью, связностью и однозначностью интерпретации и обеспечивается применением классификационных систем строительной информации.

Разработка национального классификатора строительной информации является первоочередным этапом на пути к внедрению и использованию технологий информационного моделирования в рамках строительной отрасли. Полноценное внедрение КСИ положит начало применению единого универсального «языка общения», используемого всеми участниками реализации ИСП и отвечающего условиям его однозначной интерпретации (одно из условий обеспечения «машиночитаемости»).

Согласно проведенному анализу мировой практики классификации строительной информации на примере существующих широко применяемых зарубежных систем строительной классификации (OmniClass, Uniclass 2015, CCS, CoClass) наиболее развитыми с технологической и методологической точки зрения являются КС «третьего поколения», которые также можно назвать «цифровыми» классификационными системами. Представителями данной категории КС являются датская CCS и шведская КС CoClass.

Стандарт ISO 12006-2:2015 и серия стандартов ISO/IEC 81346 образуют гармоничную методологическую базу по классификации в строительной отрасли и рекомендуются к применению при разработке национальной КС, что в области общего применения данных стандартов подтверждается в работе [6].

Разработанные структуры и составы КТ «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация» позволяют:

- обеспечить единую методологию и принципы классификации для всех строительных сущностей, используемых в рамках управления ЖЦ ОКС;
- применить единые правила идентификации и кодирования элементов строительного комплекса и соответствующих им атрибутивных наборов, обеспечивающие совместимость КСИ с любыми из существующих систем классификации (общенациональными, ведомственными и корпоративными);
- реализовать индексацию и структурирование всего массива данных строительных систем, связанных с управлением ЖЦ ОКС, для однозначной идентификации используемых данных на соответствующих информационных ресурсах;
- обеспечить качественно новый уровень формирования, обработки и достоверности сведений, на основании которых принимаются решения;

- в рамках информационного моделирования ОКС разработанные КТ «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация» могут применяться при разработке процессных и информационных моделей создания ОКС в рамках соответствующих этапов их ЖЦ, при составлении процессных карт, календарно-сетевых графиков ИСП, управлении процессами и информацией, разработке многоцелевых баз данных строительной информации, переводе документации в цифровой формат, оценке трудозатрат и стоимости работ.

Удобство применения и восприятия информации КТ «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация» обеспечивается однозначной структурой, разработанной на выявлении и выделении предметных и управленческих областей деятельности в строительстве, т.е. выделении предметных и управленческих групп процессов в строительстве, что, в свою очередь, позволяет однозначно идентифицировать стадию и предметную область любого процесса и элемента информации. Разработанная таблица характеристик для КТ «Управление процессами» и «Процессы проектирования» в том числе позволяет однозначно идентифицировать процесс во времени и на этапе ЖЦ ОКС.

Необходимо отметить, что ни один из изученных информационных источников не предлагает систематизированный подход и структуру, применимые для КТ «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация», а для КТ «Информация» в том числе не обеспечивает требуемые интерфейсы со стадиями ЖЦ ОКС, всей деятельностью в строительстве и смежными КТ.

Подходы к управлению процессами в строительстве излагаются в ряде источников, включая ГОСТ Р ИСО 21500-2014, ГОСТ Р ИСО 9000-2015, ГОСТ Р 54869-2011, ГОСТ Р 54870-2011 и ГОСТ Р 54871-2011, однако данные источники содержат методологические указания по исполнению указанных процессов и предлагают различные способы их структурирования, оставляя решение о применении того или иного способа (или их комбинации) на усмотрение исполнителя работ и не предлагают четкой и однозначной структуры и иерархии процессов. Аналогичная ситуация и с документами, основывающимися на ГОСТ Р ИСО 21500-2014 и ГОСТ Р ИСО 9000-2015, например, Project Management Body of Knowledge, A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) — PMI, которые предлагают верхнеуровневую структуру процессов управления проектом и методологические указания по реализации функций, разделенных по предметным группам. Все вышеизложенное позволяет сделать заключение об уникальности и научной новизне достигнутых результатов настоящего научного исследования, итоги которого в виде КТ «Управление процессами» классификатора строительной информации предлагают более обширный охват

вопросов управления и более глубокую декомпозицию структуры процессов управления, достаточную и избыточную для внедрения в повседневную практику строительства в РФ.

Кроме того, следует отметить, что и документы, входящие в перечень Постановления Правительства от 04.07.2020 № 985, в первую очередь предлагают методологическое решение конкретных задач в конкретном контексте (например, расчет несущей способности перекрытия здания по СП 63.13330.2018), что также является актуальной проблемой на сегодня [7] — проблемой решения задачи взаимоувязки методов проектирования с процессами проектирования. Разработка и будущая эксплуатация разработанных КТ призваны в том числе классифицировать данные методы и обеспечить их взаимоувязку в общей системе КСИ.

Подход к построению КТ «Процессы проектирования» в строительстве не предлагается ни одним из рассмотренных источников. Например, применяемая нормативно-техническая база в области строительства является объектно-ориентированной и не описывает процессы проектирования, а применимые стандарты типа ГОСТ и ИСО и литература [1, 8, 9] предлагают лишь методологический подход к решению задач проектирования, выделяя общие сущности, что делает результаты настоящего исследования уникальными в области строительства, имеющими обширный спектр применения.

Подход к построению КТ «Информация» в строительстве также не предлагается ни одним из рассмотренных источников. Например, применимая нормативно-техническая база в области строительства — объектно-ориентированная, не описывает структуру и иерархию информации, а лишь выделяет локальные информационные сущности, применимые к настоящему исследованию, стандарты типа ГОСТ и ИСО предлагают лишь методологический подход к решению задач проектирования, выделяя общие сущности. Все вышеизложенное позволяет сделать вывод об уникальности результатов настоящего исследования в области строительства и о крайне широком спектре применения разработанной КТ.

Разработанные КТ применимы для ОКС различного назначения ввиду синтеза структуры КТ (классов, подклассов и типов) на основании анализа достаточного количества информационных источников различного назначения и применения.

Дальнейшая разработка КТ «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация» в составе классификации строительной информации в части масштабирования и детализации КТ должна носить последовательный характер и базироваться прежде всего на принципах существующих международных стандартов в области классификации строительной информации с учетом практики внедрения BIM-технологий, нормативно-правовой

и нормативно-технической баз строительной отрасли Российской Федерации и результатах фактического применения разработанных КТ.

Для получения эффекта от применения разработанных КТ необходимо, чтобы для каждого из используемых процессов были обеспечены взаимосвязи с другими процессами. Для полного определения и удовлетворения требований заинтересованных сторон и достижения соглашения относительно целей проекта может потребоваться повторение отдельных процессов.

Необходимо отметить, что внедрение разработанных КТ «Управление процессами», «Процессы проектирования» и «Информация» позволит в значительной степени повысить качество результатов работ в строительстве, их результативность и эффективность и обеспечить необходимый контроль за исполнением работ на всех этапах и подэтапах исполнения работ в строительстве. КТ «Информация» дополнительно позволяет создавать однозначную структуру информации ОКС, включающую структуру исходных данных, на основании которой ОКС создается и используется. Иными словами, внедрение разработанной КТ «Информация» в значительной степени даст возможность повысить качество управления содержанием строительного проекта.

Приведенные процессы могут не применяться в полном объеме ко всем проектам или фазам ЖЦ ОКС. Руководитель должен корректировать состав процессов управления конкретным проектом или фазой, отбирая подходящие процессы и условия их реализации. Такая адаптация должна выполняться в соответствии с существующими политиками организации. Однако разработанные КТ предлагают наиболее комплексное, достаточное и избыточное представление процессов управления и проектирования, что делает их применение в полном объеме рекомендованным для достижения наибольшей экономической эффективности деятельности в строительстве.

Приведенные в КТ «Информация» информационные сущности могут не применяться в полном объеме ко всем проектам или фазам этапа ЖЦ ОКС. Необходимо корректировать состав информации конкретным проектом или фазой, отбирая подходящие на основании определенных процессов и условий их реализации. Такая адаптация должна выполняться в соответствии с существующими политиками организации, что полностью соответствует методологии проектирования и управления [10]. Разработанная КТ предлагает наиболее комплексное, достаточное и избыточное представление информации, что делает применение всех базовых классов рекомендованным для достижения наибольшей экономической эффективности деятельности в строительстве и качественного управления содержанием строительного проекта. Дополнительно применение языков проектирования и их унифика-

ция [11] позволят усилить положительный эффект от внедрения разработанных КТ.

Повышение экономической эффективности, результативности и качества результатов деятельности в строительстве является на сегодня крайне актуальной задачей, решение которой в том числе даст возможность обеспечить более интенсивное освоение зарубежного рынка в области строительства [12]. Дополнительно применение классификатора строительной информации как инструмента BIM-проектирования позволит решить задачу постоянного совершенствования методологической и методической базы организационно-технологического проектирования строительного производства, включая развитие алгоритмов вариантного формирования, оценки и выбора организационно-технологических решений строительного производства, что, согласно работе [13], является актуальной задачей, обеспечивающей рост конкурентного преимущества не только на отечественном, но и международном рынке.

Также росту конкурентоспособности на рынке строительства может послужить предоставление понятного, удобного и универсального инструмента для установления и осуществления строительной деятельности, который определяет стандартизированные интерфейсы между всеми видами деятельности на всех этапах ЖЦ ОКС между всеми организациям-участниками¹². Для организаций, занимающих твердую позицию на рынке строительства, применение такого инструмента не всегда является приоритетом номер один, и они уже имеют возможность совершенствовать методологические основы своей деятельности, включая международный бенчмаркинг. Такие организации разрабатывают и применяют свои собственные стандарты по осуществлению их профильной деятельности,

¹² Eleven Lessons: Managing Design in Eleven Global Brands. A Study of the Design Process. Design Council. URL: [https://www.designcouncil.org.uk/sites/default/files/asset/document/ElevenLessons_Design_Council%20\(2\).pdf](https://www.designcouncil.org.uk/sites/default/files/asset/document/ElevenLessons_Design_Council%20(2).pdf)

а анализируя и применяя международный опыт, выходят на зарубежный рынок строительства. Стандарты, подобные¹³, не обязательны к применению и законодательно в РФ не регулируются. Хотя их практическая значимость не может быть недооценена, они не формируют единую универсальную информационную систему (не преследуя такую цель) и не устанавливают интерфейсы и зависимости между различными сущностями. Таким образом, единый утвержденный информационный скелет в области строительства может облегчать коммуникации между организациями и провоцировать рост конкуренции на рынке строительства [14].

Кроме прямого назначения разработанных КТ и ввиду отсутствия в структуре сметной документации РФ оценки декомпозиции стоимости процессов управления, дополнительной рекомендацией служит разработка методов и способов оценки процессов, что в перспективе позволит повысить экономическую эффективность деятельности в строительстве, включающих заключение и управление договорами, что, согласно анализу¹⁴, достигается путем активного внедрения инструментов управления проектом и повышением квалификации персонала в данном направлении, увеличивая экономию средств и степень удовлетворенности инвесторов. Например, при управлении инвестиционно-строительными проектами и, в частности, стоимостью проекта во многих странах используется методология оценки стоимости ЖЦ здания или стоимости владения для выбора оптимальных проектных решений с применением технологии BIM [15].

¹³ Руководство по разработке проектов. Книга 5. URL: https://architect.49gov.ru/common/upload/29/editor/file/05_Kniga_5_Rukovodstvo_po_razrabotke_proektov1.pdf

¹⁴ The Future of Work. Leading the Way with PMTQ. PMI's Pulse of the Profession. 11th Global Project Management Survey 2019. URL: https://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2019.pdf?v=c8cab316-d2c6-44e4-856d-e0eca3c1cc00&sc_lang=temp=en-GB

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoyle D. ISO 9000 Quality Systems Handbook, Seventh Edition. London and New York : Routledge, 2018.
2. Волкодав В.А., Волкодав И.А. Разработка структуры и состава классификатора строительной информации для применения BIM-технологий // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 6. С. 867–906. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906
3. Полковников А.В., Дубовик М.Ф. Управление проектами. Полный курс MBA. М. : Олимп-Бизнес, 2015. С. 552.
4. Кошкарлов А.Р. Анализ состояния проектного управления в реалиях российского бизнеса //

Российское предпринимательство. 2019. Т. 20. № 1. С. 71–86. DOI: 10.18334/tp.20.1.39717

5. Шаврин А.В. Современные мировые тенденции в управлении проектами. М. : Высшая школа экономики, 2014.

6. Aksomitas D. Comparing classification systems I — The 2 Types. URL: <http://www.bimaxon.com/comparing-classification-systems-i-the-2-types/>

7. Sakae Y., Kato T., Sato K., Matsuoka Y. Classification of design methods from the viewpoint of design science // International Design Conference – Design. 2016.

8. Derelov M. On evaluation of design concepts. modelling approaches for enhancing the understanding of design solutions. Sweden, 2009.

9. Hovard T.J. Culley S.J., Dekoninck E.A. Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature // Design Studies. 2010. Vol. 29. Issue 2. Pp. 160–180. DOI: 10.1016/j.destud.2008.01.001

10. Боронина Л.Н. Основы управления проектами. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2015. 112 с.

11. Фогель С., Рудольф С. Проектирование сложных систем при помощи языков проектирования: методы, применение и принципы проектирования // Онтология проектирования. 2018. Т. 8. № 3 (29). С. 323–346. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-323-346

12. Чурбанов А.Е., Шамара Ю.А. Влияние технологии информационного моделирования на развитие инвестиционно-строительного процесса //

Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 824–835. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.824-835

13. Николаев Ю.Н. Компьютерные технологии проектирования строительного производства. Волгоград, 2015. URL: https://vgasu.ru/attachments/oi_nkolaev-01.pdf

14. Sacks R., Eastman C., Lee G., Teicholz P. BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers, Third Edition. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 2018. DOI: 10.1002/9781119287568.

15. Дмитриев А.Н. Перспективы применения технологии информационного моделирования для проектного управления безопасной эксплуатацией зданий // Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании : мат. X Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 113-летию РЭУ им. Г.В. Плеханова, 8–12 апреля 2020 года / под ред. В.И. Ресина. М. : ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», 2020. С. 182–196.

Поступила в редакцию 21 июня 2021 г.

Принята в доработанном виде 20 июля 2021 г.

Одобрена для публикации 20 июля 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Сергеевич Тимченко — заместитель главного инженера проекта; Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий «АТОМПРОЕКТ» (АТОМПРОЕКТ); 197183, г. Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 82, литера А; vstimchenko@atomproekt.com;

Владимир Алексеевич Волкодав — генеральный директор; Научно-инженерный центр цифровизации и проектирования в строительстве (НИЦ ЦПС); 190020, г. Санкт-Петербург, Рижский пр-т, д. 58, кор. 2 литера А, офис 4.24; РИНЦ ID: 1068607; vva@niccps.ru;

Иван Алексеевич Волкодав — кандидат технических наук, директор по науке; Научно-инженерный центр цифровизации и проектирования в строительстве (НИЦ ЦПС); 190020, г. Санкт-Петербург, Рижский пр-т, д. 58, кор. 2 литера А, офис 4.24; РИНЦ ID: 574245; via@niccps.ru;

Ольга Викторовна Тимченко — ведущий инженер-проектировщик; Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий «АТОМПРОЕКТ» (АТОМПРОЕКТ); 197183, г. Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 82, литера А; ovtimchenko@atomproekt.com;

Никита Алексеевич Осипов — кандидат технических наук, доцент; Национальный исследовательский университет ИТМО (НИУ ИТМО); 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, литера А; РИНЦ ID: 860071; naosipov@itmo.ru.

REFERENCES

1. Hoyle D. *ISO 9000 Quality systems handbook, Seventh Edition*. London and New York, Routledge, 2018.

2. Volkodav V.A., Volkodav I.A. Development of the structure and composition of a building information classifier towards the application of BIM technologies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(6):867-906. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.867-906 (rus.).

3. Polkovnikov A.V., Dubovik M.F. *Project management. Complete MBA course*. Moscow, Olymp-Business, 2015; 552. (rus.).

4. Koshkarov A.R. Analysis of the state of project management in the realities of Russian business. *Rus-*

sian Journal of Entrepreneurship. 2019; 20(1):71-86. DOI: 10.18334/rp.20.1.39717 (rus.).

5. Shavrin A.V. *Modern global trends in project management*. Moscow, High School of Economics, 2014. (rus.).

6. Aksomitas D. *Comparing Classification Systems I — The 2 Types*. URL: <http://www.bimaxon.com/comparing-classification-systems-i-the-2-types/>

7. Sakae Y., Kato T., Sato K., Matsuoka Y. Classification of design methods from the viewpoint of design science. *International Design Conference – Design*. 2016.

8. Derelov M. On evaluation of design concepts. *Modelling approaches for enhancing the understanding of design solutions*. Sweden, 2009.

9. Hovard T.J., Culley S.J., Dekoninck E.A. Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design Studies*. 2010; 29(2):160-180. DOI: 10.1016/j.destud.2008.01.001
10. Boronina L.N. *Basics of Project Management*. Ekaterinburg, Ural University Publishing, 2015; 112. (rus.).
11. Vogel S., Rudolph S. Complex system design with design languages: method, applications and design principles. *Ontology of Designing*. 2018; 8(3):(29):323-346. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-323-346 (rus.).
12. Churbanov A.E., Shamara Yu.A. The impact of information modeling technology on the development of investment construction process. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(7):(118):824-835. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.824-835 (rus.).
13. Nikolaev U.N. *Computer-aided design technologies for building production*. Volgograd, 2015. URL: https://vgasu.ru/attachments/oi_nkolaev-01.pdf
14. Sacks R., Eastman C., Lee G., Teicholz P. *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers, Third Edition*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, 2018. DOI: 10.1002/9781119287568
15. Dmitriev A.N. Prospects of BIM Implementation Into Project Management for Secure Facility Maintenance. *Contemporary Problems of Project Management in Investment and Construction Sphere and Environmental Management: Proceedings of X International Scientific and Practical Conference, devoted to the 113th anniversary of Plekhanov Russian University of Economics dated April 8-12, 2020 / under ed. of V.I. Resin*. Moscow, FGBOU VO "Plekhanov Russian University of Economics", 2020; 182-196. (rus.).

Received June 21, 2021.

Adopted in revised form on July 20, 2021.

Approved for publication on July 20, 2021.

B I O N O T E S: **Vladimir S. Timchenko** — Deputy Chief Engineer for Design; **Scientific Research and Design Institute for Energy Technologies ATOMPROEKT (ATOMPROEKT)**; lit. A, 82 Savushkina st., St. Petersburg, 197183, Russian Federation; vstimchenko@atomproekt.com.

Vladimir A. Volkodav — General Director; **Scientific and Engineering Center for Digitalization and Design in Construction**; office 4.24, lit. A, 58 Riga avenue, St. Petersburg, 190020, Russian Federation; ID RSCI: 1068607; vva@niccps.ru;

Ivan A. Volkodav — Candidate of Technical Sciences, R&D Director; **Scientific and Engineering Center for Digitalization and Design in Construction**; office 4.24, lit. A, 58 Riga avenue, St. Petersburg, 190020, Russian Federation; ID RSCI: 574245; via@niccps.ru;

Olga V. Timchenko — Leading Design Engineer; **Scientific Research and Design Institute for Energy Technologies ATOMPROEKT (ATOMPROEKT)**; lit. A, 82 Savushkina st., St. Petersburg, 197183, Russian Federation; ovtimchenko@atomproekt.com;

Nikita A. Osipov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **ITMO University (ITMO)**; lit. A, 49 Kronverksky pr., St. Petersburg, 197101, Russian Federation; ID RSCI: 860071; naosipov@itmo.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 указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте). Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК 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).

ми), 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, страна² 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 аннотаций.**

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 языке¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке² 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.

Вionotes: **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.

