

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 19 Выпуск 2/2024
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 19. Выпуск 2
2024**

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

Сквозной номер 183

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 19. Issue 2
2024**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	26.02.2024.
Подписан в свет	29.02.2024.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 18,48. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 56

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Анна Александровна Дядичева

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рашид Абдуллович Мангушев, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архи-

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	26.02.2024

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2024

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova* **Layout:** *Alina Y. Baykova*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Али Салмо, Е.В. Щербина

Оценка устойчивости городов Сирии с учетом историко-культурного наследия 169

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

Т.А. Белаш, А.В. Кузнецов

Расчетно-теоретические исследования узловых соединений в монолитных зданиях 181

А.Н. Малахова

Оценка несущей способности и эксплуатационной пригодности плиты перекрытия после высокотемпературного воздействия 194

Н.С. Никитина, Н.К. Мельников

Оценка устойчивости грузоподъемных средств при разработке котлованов в стесненных условиях 203

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.С. Иноземцев

Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве 216

А.А. Баруздин, Л.В. Закревская

Композиционные материалы на основе строительных и полимерных отходов 246

С.В. Федосов, М.О. Баканов, И.С. Грушко

Применение техногенного сырья в процессе синтеза пеностекла с гетерогенной микроструктурой 258

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А.С. Антонов, Н.П. Караблин, К.Ю. Бод, И.В. Баклыков

Оценка вибрационного состояния и определение напряженно-деформированного состояния сороудерживающих решеток гидроэлектростанций 270

Г.В. Орехов, Чан Мань Кыонг

Анализ фильтрации через земляную плотину с диафрагмой на непроницаемом основании с помощью программы PLAXIS 2D 281

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

С.Б. Сборщиков, Н.В. Лазарева

Рейнжиниринг организационной структуры и бизнес-процессы инвестиционно-строительной деятельности. Их место в общей системе корпоративного регулирования 294

Ю.А. Лаамарти, Е.Г. Дедов, О.Ю. Крамлих

Методы прогнозирования запасов строительных материалов во время поставок 307

Е.Ю. Васильева, М.Г. Даниелян

Нейминг как один из факторов ценообразования в сфере жилищного строительства на примере жилых комплексов Москвы и Московской области 315

Требования к оформлению научной статьи 328

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Ali Salmo, Elena V. Scherbina

Sustainability assessment of Syrian cities considering historical and cultural heritage 169

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

Tatyana A. Belash, Anatoly V. Kuznetsov

Computational and theoretical studies of nodal joints in monolithic buildings 181

Anna N. Malahova

Estimation of bearing capacity and serviceability of a floor slab after high-temperature exposure 194

Nadezhda S. Nikitina, Nikolay K. Melnikov

Estimation of stability of lifting equipment during excavation of pits in cramped conditions 203

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Aleksandr S. Inozemtcev

Modern theory and practice of concrete technology for 3D printing in construction 216

Aleksandr A. Baruzdin, Lyubov V. Zakrevskaya

Composite materials containing construction and polymer waste 246

Sergey V. Fedosov, Maksim O. Bakanov, Irina S. Grushko

Using anthropogenic raw materials in the process of synthesizing foam glass with heterogeneous microstructure 258

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Anton S. Antonov, Nikita P. Karablin, Konstantin Ju. Baud, Igor V. Baklykov

Evaluation of the vibration state and determination of the stress-strain state of the trash-rack structure of the hydroelectric power plants 270

Genrikh V. Orekhov, Tran Manh Cuong

Analysis of seepage through an earth dam with a diaphragm on an impermeable foundation using PLAXIS 2D 281

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Sergey B. Sborshikov, Natalia V. Lazareva

Reengineering of the organizational structure and business processes of investment and construction activities. Their place in the general system of corporate regulation. 294

Yulia A. Laamarti, Evgeny G. Dedov, Olga Yu. Kramlikh

Methods of forecasting stocks of construction materials during deliveries. 307

Elena Yu. Vasilyeva, Mary G. Daniyelyan

Naming as one of pricing factors in the field of house construction on the example of housing estates in Moscow and Moscow region 315

Requirements for research paper design 328

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

В научно-техническом журнале «Вестник МГСУ» публикуются научные материалы по проблемам строительной науки и архитектуры (строительство в России и за рубежом: материалы, оборудование, технологии, методики; архитектура: теория, история, проектирование, реставрация; градостроительство).

Тематический охват соответствует научным специальностям:

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки);
- 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки);
- 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки);
- 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);
- 2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки);
- 2.1.9. Строительная механика (технические науки);
- 2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки);
- 2.1.11. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура);
- 2.1.11. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (технические науки);
- 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура);
- 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки);
- 2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки);
- 2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура);
- 2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки);
- 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки);
- 5.2.6. Менеджмент (экономические науки).

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

Analytical materials, scientific articles, surveys, reviews on scientific publications on fundamental and 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).

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 711.4:719(569.1)

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.169-180

Оценка устойчивости городов Сирии с учетом историко-культурного наследия

Али Салмо, Елена Витальевна Щербина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Устойчивость территорий городских и сельских поселений относится к одной из приоритетных задач градостроительного и социально-экономического планирования, а также определяется целью комплексного развития территории. Этот вопрос широко обсуждается в научно-технической литературе, где основное внимание уделяется социально-экономическим, экологическим и антропогенным факторам, характеризующим систему города, которые используются для получения количественного показателя уровня устойчивости с помощью энтропийно-взвешенных, TOPSIS (техники упорядочения предпочтений по сходству с идеальным решением) и других методов. В то же время значению культурного наследия в устойчивом развитии территории уделяется недостаточно внимания. На основе многокритериальной модели представлены результаты оценки устойчивости влияния недвижимого материального культурного наследия восьми сирийских городов.

Материалы и методы. Использованы материалы из открытых источников и статистические данные муниципальных организаций, выбор которых обоснован целями устойчивого развития и системным подходом. Данные включают характеристики социальной, историко-культурной, экономической, экологической, инженерной, транспортной подсистем города. Цель исследования — определение обобщенного показателя, характеризующего устойчивость города и влияние его факторов на ценность культурного наследия в содействии социально-экономическому развитию и восстановлению городов после военных конфликтов.

Результаты. На основе представленной модели выполнены расчеты индекса устойчивости города (IS) для восьми сирийских городов: Дамаска, Хомса, Алеппо, Латакии, Пальмиры, Дараа, Дейр-эз-Зора и Идлиба на период 2010 г. (до военного конфликта) и 2023 г., которые показали снижение индекса устойчивости до двух раз. Это обусловлено разрушениями жилых территорий инженерных и транспортных систем, уничтожением объектов культурного наследия (ОКН). Также установлено, что материальное культурное наследие оказывает большое влияние на устойчивость системы город.

Выводы. Предложенная модель определения индекса устойчивости города позволяет получить количественную оценку и проанализировать влияние каждого фактора. Показано, что наряду с восстановлением жилых территорий и объектов инженерно-транспортной инфраструктуры необходимо проведение работ по сохранности ОКН, утрата которых приведет к снижению устойчивости города, потере его градостроительной идентичности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: устойчивость, культурное наследие, городское поселение, сельское поселение, системный анализ, интегральный показатель устойчивости, комплексное развитие территории

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Салмо А., Щербина Е.В. Оценка устойчивости городов Сирии с учетом историко-культурного наследия // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 169–180. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.169-180

Автор, ответственный за переписку: Али Салмо, alisalmorussia1993@gmail.com.

Sustainability assessment of Syrian cities considering historical and cultural heritage

Ali Salmo, Elena V. Scherbina

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

ABSTRACT

Introduction. The sustainability of territories of urban settlements (USs) and rural settlements (RSs) is one of the priority tasks of urban planning and socio-economic planning, and is also determined by the goal of integrated development of the territory. This issue is widely discussed in the scientific and technical literature, where the focus is on socio-economic, environmental and anthropogenic factors that characterize the urban system, which are used to obtain a quantitative indicator of the level of sustainability using entropy-weighted, (TOPSIS-Technique of Preference Similarity to the Ideal Solution) and other methods. At the same time, the importance of cultural heritage in sustainable development has not received

enough attention. This paper presents the results of sustainability assessment of the impact of immovable tangible cultural heritage of eight Syrian cities based on a multi-criteria model.

Materials and methods. The paper uses materials from open sources and statistical data of municipal organizations, the selection of which is based on the Sustainable Development Goals (SDGs) and the system approach. The data include characteristics of social, historical-cultural, economic, environmental, engineering, transport subsystems of the city. The aim of the study is to determine a generalized index characterizing the sustainability of the city and the impact of its factors on its importance of cultural heritage in promoting socio-economic development and urban reconstruction after the military conflict.

Results. Based on the presented model, calculations of the urban sustainability index (IS) of 8 Syrian cities — Damascus, Homs, Aleppo, Latakia, Palmyra, Daraa, Deir ez-Zor and Idlib for the period of 2010 (before the military conflict) and 2023 were performed, which showed a decrease in the sustainability index up to two times. This is due to the destruction of residential areas of engineering and transport systems, destruction of cultural heritage objects. It is also found that tangible cultural heritage has a great impact on the sustainability of the city system.

Conclusions. The proposed model for determining the index of urban sustainability (IS) allows us to obtain a quantitative assessment and analyze the impact of each factor. It is shown that along with the restoration of residential areas and objects of engineering and transport infrastructure, it is necessary to carry out works to preserve objects of cultural heritage, the loss of which leads to a decrease in the sustainability of the city, the loss of its urban identity.

KEYWORDS: sustainability, cultural heritage, urban settlement, rural settlement, system analysis, integral sustainability indicator, integrated development of the territory

FOR CITATION: Salmo A., Scherbina E.V. Sustainability assessment of Syrian cities considering historical and cultural heritage. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):169-180. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.169-180 (rus.).

Corresponding author: Ali Salmo, alisalmorussia1993@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Культурное наследие подразделяется на два основных вида: материальное и нематериальное. Материальное культурное наследие, в свою очередь, классифицируется на движимое и недвижимое. К движимому материальному культурному наследию относятся объекты, например картины, рисунки, скульптуры и другие артефакты. К недвижимому материальному наследию — исторические здания, достопримечательности и иные объекты культуры. Нематериальное наследие охватывает различные аспекты культуры, включая обычаи, традиции, язык, диалекты и другие аспекты социокультурной жизни [1–3].

Для оценки культурного наследия существуют различные классификации, которые учитывают степень его значимости. Одной из наиболее важных является международный список объектов культурного наследия (ОКН), разработанный ЮНЕСКО^{1,2} [4]. В мировой практике ОКН систематизируются на международном, региональном и местном уровнях. Однако стоит отметить, что в разных странах эти категории могут различаться. Например, в РФ существует несколько уровней спецификации культурного наследия, включая глобальный, национальный (федеральный), межрегиональный, региональный и местный (муниципальный)³.

¹ The operational guidelines for the implementation of the world heritage convention. WHC.21/01 July 31, 2021. URL: <https://whc.unesco.org/en/guidelines/>

² World heritage. Information collection. UNESCO World Heritage Center. URL: <https://whc.unesco.org/en/list/>

³ Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации : Федеральный закон от 25.06.2002 № 73-ФЗ (ред. от 24.07.2023). URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/18230/page/1>

В Сирии имеется внутривосточная классификация ОКН, не включенных в список всемирного наследия, но обладающих высокой историко-культурной ценностью [5]. При оценке ОКН учитываются социальные и экономические факторы, что позволяет предполагать, что сохранение и увеличение роли культурного наследия может способствовать развитию различных аспектов, включая туризм, создание рабочих мест и развитие местной экономики [6–8]. Особую важность имеет оценка, основанная на многообразии культурной идентичности, которая дает возможность связать маркетинг и брендинг местности и способствует ее экономическому развитию [9–11].

Тем не менее все чаще мы сталкиваемся с утратой ОКН, которая может быть как мгновенной, так и постепенной, а также вызвана действиями человека или природными процессами [4, 12–15]. Это определило необходимость поиска нового подхода к обоснованию ценности ОКН через выявление их значимости для устойчивости городов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использовались общедоступные материалы и статистические данные муниципальных организаций городов Сирии: трех основных крупных городов (Дамаска, Алеппо и Хомса) и других небольших городов (Идлиба, Дараа, Дейр-эз-Зора, Латакии и Пальмиры)⁴. Для решения поставленной исследовательской задачи объединены системный подход и метод квалиметрии. Метод квалиметрии в начале своего развития трактовался как наука об измерении качества продукции, в дальнейшем он был распространен на решение задач, в которых для получения обобщенного показателя применялись количественные и качественные значения

⁴ The website of the Central Bureau of Statistics in the Syrian Arab Republic. URL: <http://cbssyr.sy/>

того или иного фактора⁵. Объекты культурного наследия в Сирии подверглись воздействию целого ряда факторов, которые поставили их под удар потерь, включая войны, землетрясения, организационные и административные ошибки. Концепция устойчивого развития городов в Сирии — сложная и многогранная проблема, предполагающая баланс между сохранением культурного наследия и необходимостью экономического развития и модернизации. Исторические территории и города Сирии — одни из самых древних и богатых в культурном отношении мест на земле с длинной и разнообразной историей, насчитывающей 5 тыс. лет. Концепция устойчивого развития включает 6 основных направлений, образующих систему, которая представляет собой модель устойчивого развития исторической территории [16, 17] (рис. 1).

В соответствии с этим каждое направление развития может быть оценено с помощью системы критериев оценки. Эта система также позволит более эффективно и объективно учесть все факторы и получить решения для устойчивого развития. Повышение устойчивости основано на единстве многих факторов, например, система критических и мотивирующих факторов включает антропогенные (физические), социальные, экономические, экологические и административные системы [18–20]. Для облегчения экспертной оценки была принята нумерация факторов в соответствии с деревом целей (рис. 2).

После получения ответов от 25 экспертов, которые оценили каждый показатель от 0 до 1 в соответствии с указаниями в анкете, начался процесс расчета с определением веса показателей, предложенных по формулам методом квалиметрии (формулы (1)–(4)).

Для экспертных оценок использовалась балльная шкала от 0 до 1, причем начало шкалы (0 баллов) означает отсутствие значимости показателя, а верхний предел (1 балл) соответствует максимальной значимости показателя.

Статистическая обработка данных включала вычисление коэффициента вариации, который определяет относительную меру отклонения измененных значений от среднего арифметического:

$$C_{x_j} = \frac{\sigma_{x_j}}{X_j}, \quad (1)$$

где C_{x_j} — коэффициент вариации, %; σ_{x_j} — среднеквадратическое отклонение значений оценок данных экспертами для j -го показателя; X_j — средняя оценка показателя.

Среднеквадратическое отклонение показывает абсолютное отклонение значений от среднего арифметического. Среднеквадратическое отклонение

оценок экспертов для j -го показателя σ_{x_j} определяется по формуле:

$$\sigma_{x_j} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j)^2}{n}}, \quad (2)$$

где x_{ij} — оценки экспертов по каждому показателю; n — объем статистической совокупности.

В результате распределение среднего отклонения в порядке увеличения значимости представлено на рис. 3.

Значение относительно показателя индекса развития города можно рассчитать по формуле (3):

$$K_{ij} = \frac{P_{ij}}{P_j^{э\tau}} \text{ при } P_{ij} \leq P_j^{э\tau};$$

$$K_{ij} = \frac{P_j^{э\tau}}{P_{ij}} \text{ при } P_{ij} \geq P_j^{э\tau}, \quad (3)$$

где K_{ij} — значение относительно показателя; P_{ij} — значение абсолютного показателя; $P_j^{э\tau}$ — эталонное значение абсолютного показателя.

Индекс развития города (IS) представляет собой комплексную оценку качества исследуемого города в определенных условиях конкретного периода времени, поэтому он может быть получен как средневзвешенная арифметическая относительных оценок с весовыми коэффициентами в соответствии с формулой (рис. 4):

$$IS = \sum_{j=1}^n K_{ij} \cdot M_j, \quad (4)$$

где $\sum_{j=1}^n K_{ij}$ — суммарное значение относительных показателей; M_j — значения коэффициентов весовости. Лучшим по качеству из сравниваемых вариантов считается тот, который обладает наибольшим значением IS.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Максимальное значение индекса устойчивости в представленной модели может составлять 100 %. Расчеты продемонстрировали, что индекс устойчивости г. Хомса до войны составлял 63,9 %, что позволяет оценить его как достаточно высокий. После войны его значение составляет 35,0 %, что характеризует снижение устойчивости почти в два раза. Анализ диаграммы (рис. 5, 6) показывает снижение показателей второго уровня (социальные, экономические, экологические, ОКН, инженерная и транспортная инфраструктура).

При этом транспортная инфраструктура и экологический показатель снизились незначительно, а ОКН и экономика снизились почти в два раза. Это свидетельствует о важности экономики в устойчивости города и, соответственно, о необходимости дополнительных инвестиций в период его вос-

⁵ Азгальдов Г.Г., Костин А.В., Садовов В.В. Квалиметрия для всех. М. : ИнформЗнание, 2012. 165 с. EDN SJOONH. URL: http://www.labrate.ru/kostin/064571_qualimetry_azgaldov-kostin-sadovov-2012.pdf

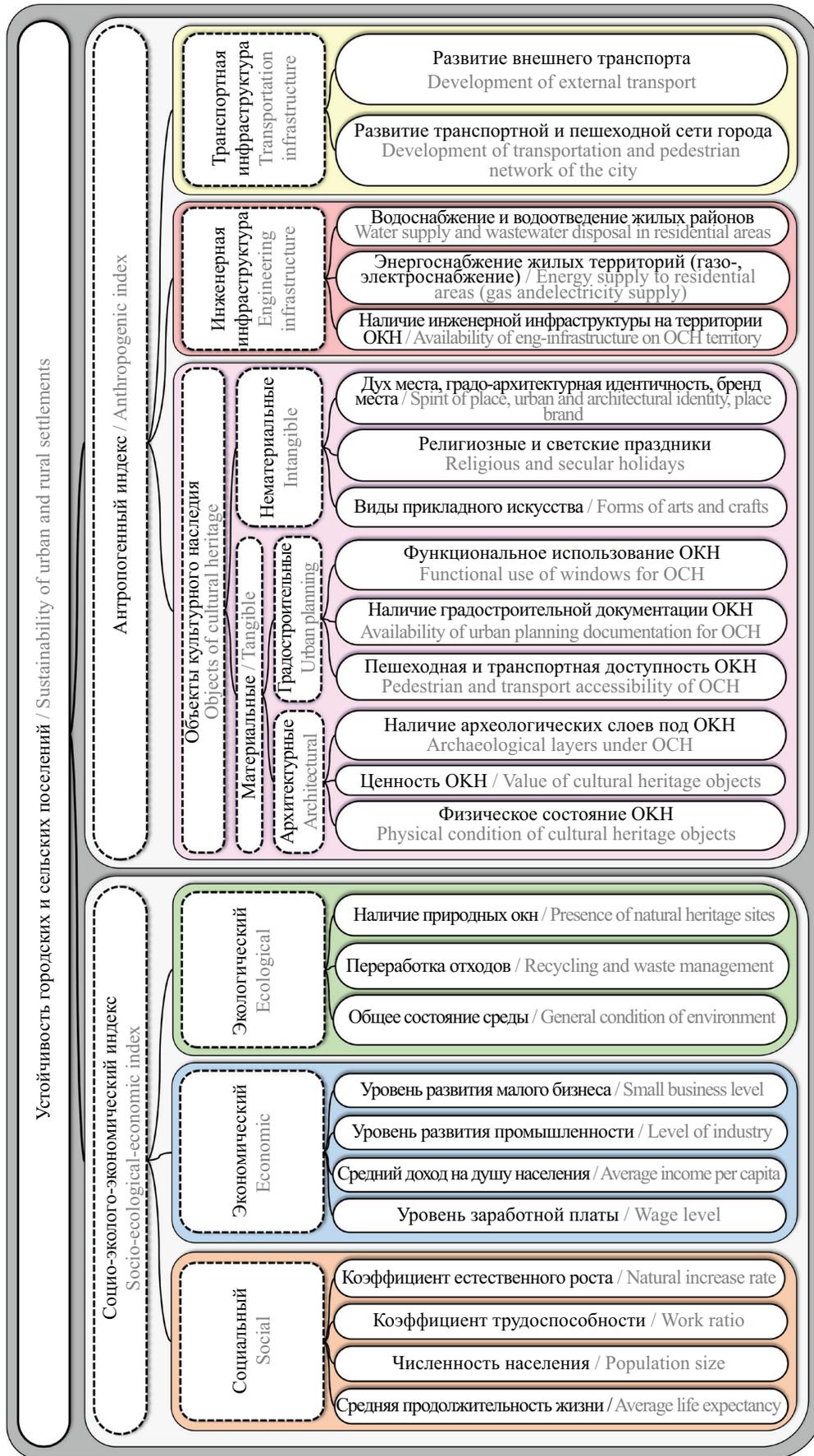


Рис. 1. Дерево индексов устойчивости городских и сельских поселений

Fig. 1. Urban and rural settlements sustainability index tree

Устойчивость городского и сельского поселения Sustainability of urban and rural settlements	Социально-эколого-экономический индекс Socio-ecological-economic index	35	29	Социальный Social	Средняя продолжительность жизни / Average life expectancy		1				
					Численность населения / Population size		2				
					Коэффициент трудоспособности / Number of population		3				
					Коэффициент естественного прироста / Natural growth rate		4				
		Экономический Economical	30	Уровень заработной платы / Wage level		5					
				Средний доход на душу населения / Average income per capita		6					
				Уровень развития промышленности / Level of industrial development		7					
				Уровень развития малого бизнеса / Level of small business development		8					
		Экологический Ecological	31	Общее состояние окружающей среды / General condition of the environment		9					
				Переработка и утилизация отходов / Recycling and waste utilization		10					
				Наличие природных ОКН / Presence of natural OCH		11					
	36	32	Нематериальные Intangible	Объекты культурного наследия Objects of cultural heritage	28		Виды прикладного искусства / Types of applied art	12			
							Религиозные и светские праздники / Religious and secular holidays	13			
							Градостроительная идентичность / Urban and architectural identity	14			
					28	Материальные Tangible	Архитектурные Architectural	26		Физическое состояние ОКН / Physical condition of the OCH	15
										Ценность ОКН / Value of OCH	16
										Наличие археологических слоев под объектами культурного наследия / Presence of archaeological layers under cultural heritage objects	17
								Пешеходная и транспортная доступность ОКН / Pedestrian and transportation accessibility of OCH	18		
			Градостроительные Urban planning	27			Наличие градостроительной документации по охране ОКН / Availability of urban planning documentation for the protection of OCH	19			
							Функциональное использование ОКН / Functional use of OCH	20			
							Обеспеченность территории ОКН инженерной инфраструктурой / Availability of engineering infrastructure in the OCH territory	21			
							Энергоснабжение жилых территорий (газоснабжение, электроснабжение) / Energy supply to residential areas (gas supply, electricity supply)	22			
			Инженерная инфраструктура Engineering infrastructure	33			Водоснабжение и водоотведение жилых территорий / Water supply and sewage of residential territories	23			
					34	Транспортная инфраструктура Transportation infrastructure	Развитость транспортной и пешеходной сети города / Development of transport and pedestrian network of the city		24		
							Развитость внешнего транспорта / Development of external transportation		25		

* Антропогенный индекс применим в случаях, когда территория населенного пункта полностью историческая, как в рассматриваемых примерах городов.

* The anthropogenic index could be applicable for cases where the territory of the settlement is completely historical, as in the examples of cities under consideration.

Рис. 2. Нумерация индексов и субиндексов устойчивости городских и сельских поселений

Fig. 2. Numbering of indices and sub-indices of sustainability of urban and rural settlements

становления. Также это свидетельствует о том, что значительный ущерб, нанесенный ОКН, влияет на устойчивость города и требует разработки специальных градостроительных мер в период его восстановления. В случае недостаточного внимания ОКН может быть полностью утрачен, что негативно скажется на устойчивости города даже при полном восстановлении его инженерной и транспортной инфраструктуры и жилых кварталов. Любое увеличение индекса культурного наследия будет эффективно способствовать развитию общего индекса устойчивости города.

Следующее описание каждого города объясняет изменения в индексах устойчивости:

1. Хомс (IS2010 = 63,9 %, IS2023 = 35,0 %). Анализ диаграммы показывает снижение показателей второго уровня (социальные, экономические, экологические, ОКН, инженерная и транспортная инфраструктура). При этом транспортная инфраструктура и экологический показатель снизились незначительно, а ОКН и экономика снизились почти в два раза. Это свидетельствует о значительной важности экономики в устойчивости города и необходимости дополнительных инвестиций в период его восстановления.

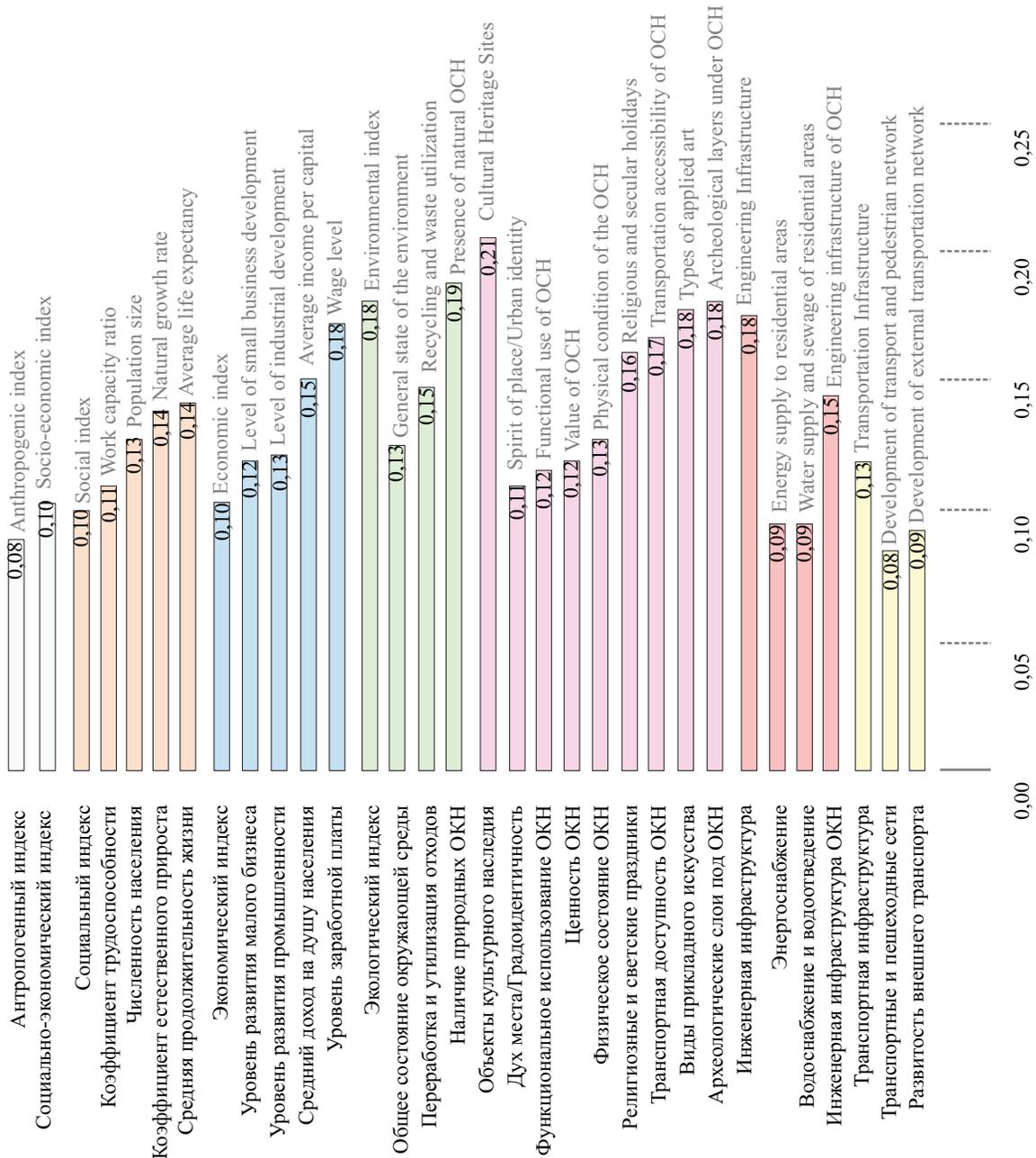


Рис. 3. Диаграмма распределения среднего отклонения

Fig. 3. Distribution diagram of the median deviation

А также это говорит о том, что значительный ущерб, нанесенный ОКН, влияет на устойчивость города и требует разработки специальных градостроительных мер в период его восстановления.

2. Пальмира (IS2010 = 60,0 %, IS2023 = 33,2 %). Социальный индекс снизился незначительно. По экологическому и экономическому показателю снижение примерно в два раза меньше. Индекс инженерной и транспортной инфраструктуры уже был на низком уровне, однако здесь также наблюдается снижение на более низкий уровень, учитывая, что г. Пальмира является музеем под открытым небом и логически нет необходимости развивать инженерную и транспортную инфраструктуру из-

за важности его археологических слоев. Основное значительное изменение произошло в ОКН, огромное снижение из-за систематического разрушения и кражи. Многие храмы, арки и другие руины были уничтожены.

3. Дамаск (IS2010 = 68,7 %, IS2023 = 49,7 %). Наблюдалось общее снижение всех индексов, в том числе социально-экономического и транспортной инфраструктуры, примерно на 1/3 значения. По экологическому индексу существенного снижения не произошло, учитывая, что в сирийской столице постоянно распространяются новые тенденции в области сохранения окружающей среды. Также было отмечено снижение значения индекса культур-

Номер индекса Index number	Хомс 2010 / Homs City 2010					Хомс 2023 / Homs City 2023						
	$M_j, \%$	P_j^{π} / P_j^{σ}	P_{ij}	K_{ij}	$K_{ij} \cdot M_j$	$M_j, \%$	P_j^{π} / P_j^{σ}	P_{ij}	K_{ij}	$K_{ij} \cdot M_j$		
1	3,3	80	68,9	0,861	2,842	3,3	90	65	0,722	2,383		
2	3,08	1,2	1	0,833	2,567	3,08	2,5	0,4	0,160	0,493		
3	2,71	0,58	0,58	1,000	2,710	2,71	0,8	0,25	0,313	0,847		
4	3,19	27,5	3,9	0,142	0,452	3,19	20,1	5,1	0,254	0,809		
5	3,47	1000	300	0,300	1,041	3,47	1500	13	0,009	0,030		
6	3,35	2000	500	0,250	0,838	3,35	2500	60	0,024	0,080		
7	2,99	10	2,5	0,250	0,748	2,99	10	0,01	0,001	0,003		
8	2,94	32	78	0,410	1,206	2,94	70	10	0,143	0,420		
9	3,01	0,8	0,6	0,750	2,258	3,01	1	0,2	0,200	0,602		
10	3,32	1	0,3	0,300	0,996	3,32	1	0,1	0,100	0,332		
11	4,28	5	5	1,000	4,280	4,28	5	2	0,400	1,712		
12	3,67	8	8	1,000	3,670	3,67	8	1	0,125	0,459		
13	3,39	45	20	0,444	1,507	3,39	45	19	0,422	1,431		
14	2,81	1	0,2	0,200	0,562	2,81	1	0,01	0,010	0,028		
15	3,04	100	95	0,950	2,888	3,04	100	29	0,290	0,882		
16	2,97	1	1	1,000	2,970	2,97	1	0,2	0,200	0,594		
17	3,96	1	0,8	0,800	3,168	3,96	1	0,4	0,400	1,584		
18	3,39	5	2,5	0,500	1,695	3,39	5	0	0,000	0,000		
19	4,14	1	0,2	0,200	0,828	4,14	1	0	0,000	0,000		
20	2,85	3	1	0,333	0,950	285	3	0	0,000	0,000		
21	3,31	4	0,5	0,125	0,414	3,31	4	0,01	0,003	0,008		
22	1,88	1	0,5	0,500	0,940	1,88	1	0,16	0,160	0,301		
23	2,01	1	1	1,000	2,010	2,01	1	0,16	0,160	0,322		
24	1,32	20	5	0,250	0,330	1,32	20	0	0,000	0,000		
25	1,85	20	5	0,250	0,463	1,85	20	0	0,000	0,000		
29	2,17	100	100	1,000	2,167	2,17	100	100	1,000	2,167		
30	2,30	100	100	1,000	2,301	2,30	100	100	1,000	2,301		
31	3,91	100	100	1,000	3,914	3,91	100	100	1,000	3,914		
32	4,75	100	100	1,000	4,748	4,75	100	100	1,000	4,748		
33	50)	100	100	1,000	3,500	3,50	100	100	1,000	3,500		
34	2,97	100	100	1,000	2,971	2,97	100	100	1,000	2,971		
35	2,39	100	100	1,000	2,391	2,39	100	100	1,000	2,391		
36	1,80	100	100	1,000	1,804	1,80	100	100	1,000	1,804		
	Суммарное значение индекса устойчивости IS Total value of the sustainability index IS					63,9 %	Суммарное значение индекса устойчивости IS Total value of the sustainability index IS					35,0 %

Рис. 4. Расчет суммарного значения индекса устойчивости г. Хомса в 2010 и 2023 гг.

Fig. 4. Calculation of the cumulative value of the sustainability index of Homs city in 2010 and 2023

ного наследия в связи с разрушением многих объектов в пригородных районах Дамаска.

4. Алеппо (IS2010 = 67,3 %, IS2023 = 51,2 %). Общее снижение наблюдалось по всем показателям, особенно по экономическому фактору, поскольку экономической столицей Сирии является Алеппо, и во второй степени снижение было очевидно по фактору, связанному с культурным наследием, но уже из-за вандализма в отношении различных элементов культурного наследия в старом городе.

5. Латакия (IS2010 = 65,4 %, IS2023 = 64,7 %). В г. Латакия общий индекс устойчивого развития сохранил свое значение в течение 13 лет и это хорошее свидетельство восстановления, поскольку изменения произошли, но они были разными по стандартам.

Например, три основных социально-экономических показателя изменились незначительно, а ценности культурного наследия сохранили свое значение, поскольку город в основном не подвергался военным действиям, а только сельские районы. Поскольку город является прибрежным и туристическим центром, он был в центре внимания правительства в плане заботы об окружающей среде.

6. Дараа (IS2010 = 60,4 %, IS2023 = 45,1 %). В г. Дараа основные изменения произошли в социальном факторе, связанном с перемещением большого числа людей за пределы Сирии, затем ухудшился экономический фактор. Что касается остальных факторов, то они изменились незначительно.

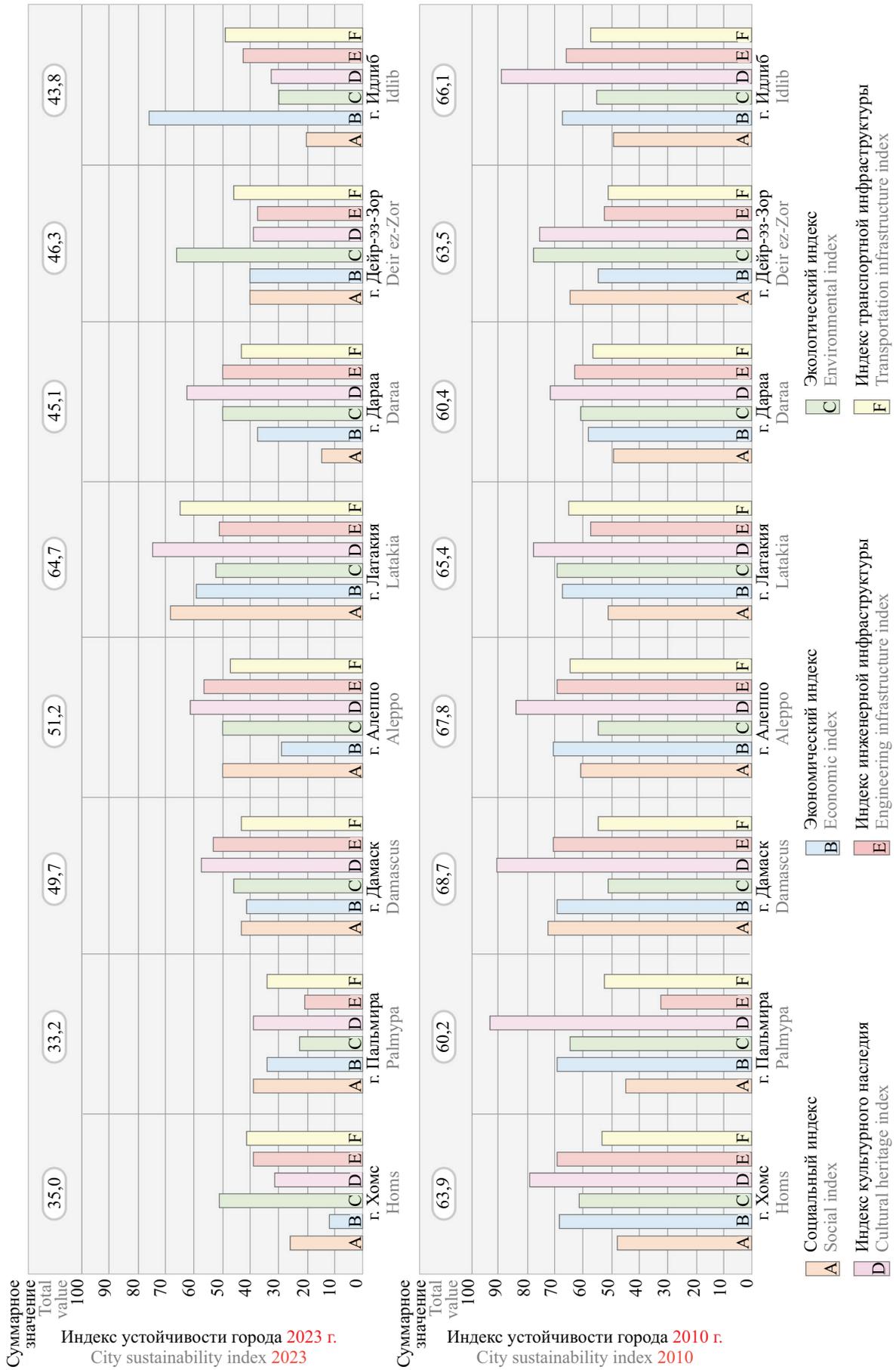
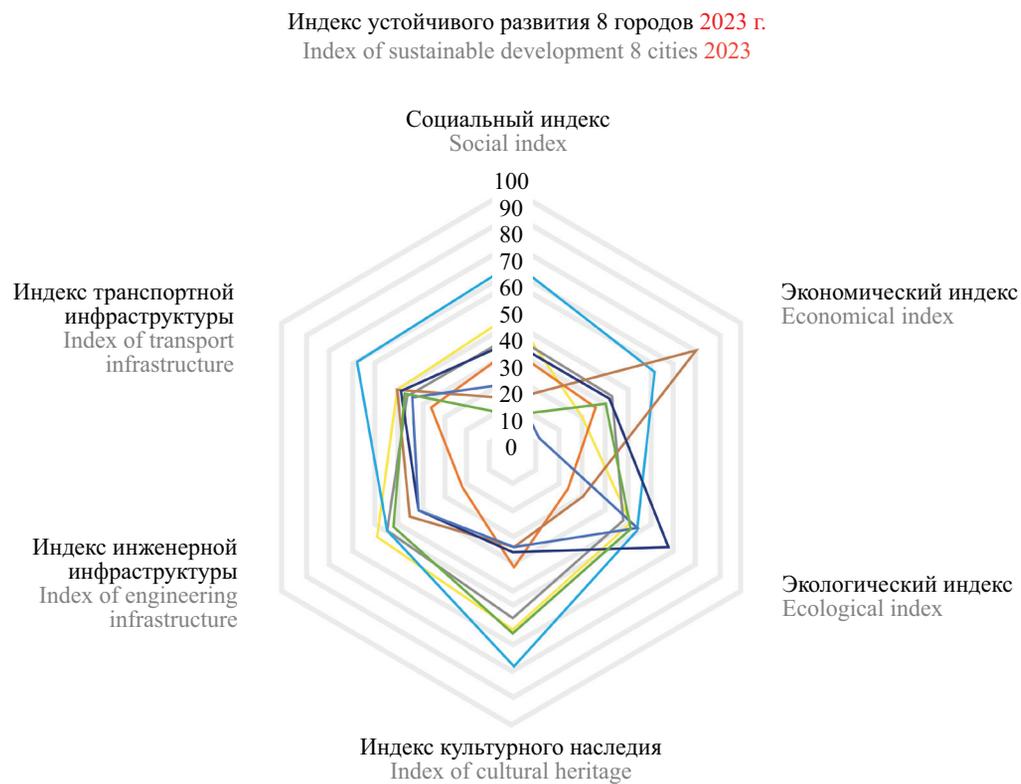


Рис. 5. Гистограммы устойчивости городских и сельских поселений. Верхняя — 2023 г., нижняя — 2010 г.

Fig. 5. Histograms of sustainability of urban and rural settlements. Upper — 2023, lower — 2010



- г. Хомс / Homs
- г. Пальмира / Palmyra
- г. Дамаск / Damascus
- г. Алеппо / Aleppo
- г. Латакия / Latakia
- г. Дараа / Daraa
- г. Дейр-эз-Зор / Deir ez-Zor
- г. Идлиб / Idlib

Рис. 6. Изменение уровней индекса устойчивости городов в период с 2010 по 2023 г., представленное на радарной диаграмме

Fig. 6. Changes in urban resilience index levels between 2010 and 2023 shown in the radar chart

7. Дейр-эз-Зор (IS2010 = 63,5 %, IS2023 = 46,3 %).
Транспортная инфраструктура снизилась незначи-

тельно, а ОКН — почти в два раза. По социальному показателю также наблюдается снижение в соответ-

ствии с внутренним и внешним перемещением населения. Остальные показатели, такие как инженерная инфраструктура, экономический и экологический, снизились примерно на одну треть.

8. Идлиб (IS2010 = 66,1 %, IS2023 = 43,8 %). Основные изменения в г. Идлиб связаны с экономическим положением, поскольку оно изменилось таким образом, что среднедушевой доход стал выше благодаря международной гуманитарной помощи, снизилась конкуренция за рабочие места, и в Идлибе появилась определенная экономическая деятельность, особенно в секторах торговли, сельского хозяйства и услуг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отличительной особенностью данного исследования является то, что в нем оценивается значение недвижимого культурного наследия в более широком контексте устойчивого развития. Представленная работа является шагом вперед по сравнению с предыдущими исследованиями, в которых этот важнейший фактор не рассматривался.

Модель, предложенная в настоящем исследовании, выявила глубокое влияние недвижимого культурного наследия на устойчивость городских центров. При сравнении индекса устойчивости

до конфликта, который составлял 64, с постконфликтным периодом наблюдается разительный контраст. Это несоответствие подтверждает обоснованность и актуальность предложенной математической модели.

Актуальность исследования обусловлена комплексной оценкой текущего состояния и перспективных траекторий дальнейшего совершенствования сирийских городских и сельских поселений. Такой многогранный анализ позволяет определить путь развития этих регионов.

Модель, представленная в данном исследовании, способна стать преобразующим инструментом в оценке состояния развития сирийских городских центров. Она обеспечивает комплексную основу для выявления критических точек и предлагает идеи для разработки и реализации проектов городского развития.

В целом индекс устойчивости является ценным инструментом принятия решений, обеспечивающим измеряемый показатель устойчивости. Этот индекс необходим для определения приоритетных стратегий восстановления, управления процессом возвращения беженцев, эффективной организации экономических планов и мониторинга действий по развитию городских и сельских поселений во время и после кризиса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Cosovic M., Amelio A., Junuz E.* Classification methods in cultural heritage // Proceedings of the Visual Pattern Extraction and Recognition for Cultural Heritage Understanding (VIPERC2019). 2019. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2320/>
2. *Isa W.M.W., Zin N.A.M., Rosdi F., Sarim H.M.* Digital preservation of intangible cultural heritage // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2018. Vol. 12. Issue 3. P. 1373. DOI: 10.11591/ijeecs.v12.i3.pp1373-1379
3. *Hua S.* World heritage classification and related issues — A case study of the “convention concerning the protection of the World cultural and natural heritage” // Procedia — Social and Behavioral Sciences. 2010. Vol. 2. Issue 5. Pp. 6954–6961. DOI: 10.1016/j.sbspro.2010.05.048
4. *Щербина Е.В., Салмо А.* Градостроительные риски утраты культурного наследия // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. № 4. С. 46–63. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.4.4. EDN UVUULM.
5. *Ахмед М.* Сирийское всемирное наследие и конвенция всемирного наследия во время сирийской войны // мат. науч.-практ. конф. молодых ученых географов. 2019. С. 169–172. EDN MGXJMF.
6. *Tišta S., Uzelac A., Jelinčić D.A., Franić S., Škrtić M.M.* Overview of social assessment methods for the economic analysis of cultural heritage investments //

- Journal of Risk and Financial Management. 2022. Vol. 15. Issue 8. P. 327. DOI: 10.3390/jrfm15080327
7. *Medda F., Lipparini F.* Impact investment for urban Cultural Heritage // City, Culture and Society. 2021. Vol. 26. P. 100413. DOI: 10.1016/j.ccs.2021.100413
8. *Rudan E.* Circular economy of Cultural Heritage — Possibility to create a new tourism product through adaptive reuse // Journal of Risk and Financial Management. 2023. Vol. 16. Issue 3. P. 196. DOI: 10.3390/jrfm16030196
9. Assessing the values of cultural heritage: research report / ed. De la Torre M. Los Angeles, CA : Getty Conservation Institute, 2002. URL: http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/values_cultural_heritage
10. *Panzer E.* The role of Cultural Heritage in shaping territorial identities // Cultural Heritage and Territorial Identity. 2022. Pp. 117–143. DOI: 10.1007/978-3-030-94468-1_5
11. *Салмо А., Щербина Е.В., Алибрахим Л.Я.* Architectural and urban identity of Homs city // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 10. С. 1285–1296. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1285-1296
12. *Zin N.M., Ismail F.Z.* Cultural Heritage protection from disaster impacts: A review of global disaster risk reduction frameworks // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023.

Vol. 1217. Issue 1. P. 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/1217/1/012004

13. Falk M.T., Hagsten E. Assessing different measures of fire risk for cultural world heritage sites // *Heritage Science*. 2023. Vol. 11. Issue 1. DOI: 10.1186/s40494-023-01026-y

14. Crowley K., Jackson R., O'Connell S., Karunarthna D., Anantasari E., Retnowati A. et al. Cultural Heritage and risk assessments: Gaps, challenges, and future research directions for the inclusion of heritage within climate change adaptation and disaster management // *Climate Resilience and Sustainability*. 2022. Vol. 1. Issue 3. DOI: 10.1002/cli.245

15. Karaca F. An AHP-based indoor air pollution risk index method for Cultural Heritage Collections // *Journal of Cultural Heritage*. 2015. Vol. 16. Issue 3. Pp. 352–360. DOI: 10.1016/j.culher.2014.06.012

16. Горбенкова Е.В., Щербина Е.В., Старолавицкая О.М. Методика определения индекса развития агрогородка // Интернет-журнал Науковедение.

2015. Т. 7. № 2 (27). С. 97. DOI: 10.15862/92TVN215. EDN УНМКУР.

17. Подгорбунских П.Е., Головина С.Г. Алгоритм мониторинга устойчивого развития сельских территорий // *Аграрный вестник Урала*. 2012. № 5 (97). С. 79–84. EDN ПАКJEV.

18. Harbiankova A., Shcherbina E.V. Evaluation model for sustainable development of settlement system // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Issue 21. P. 11778. DOI: 10.3390/su132111778

19. Harbiankova A., Shcherbina E., Budzevich M. Exploring the significance of Heritage preservation in enhancing the settlement system resilience // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue 21. P. 15251. DOI: 10.3390/su152115251

20. Salmo A., Shcherbina E. Post-war reconstruction priorities in the light of preservation tangible cultural heritage: AHP approach // Устойчивое развитие территорий : сб. докл. IV Междунар. науч.-практ. конф. М., 2022. С. 200–206. EDN KILILZ.

Поступила в редакцию 6 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 5 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 5 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Али Салмо — аспирант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1052643, ResearcherID: AAG-1758-2019, ORCID: 0000-0002-6797-7559; alisalmorussia1993@gmail.com;

Елена Витальевна Щербина — доктор технических наук, профессор кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 485908, ResearcherID: Q-6673-2016, ORCID: 0000-0002-8595-2101; scherbinaEV@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Салмо А. — методология, формальный анализ, подготовка первоначального проекта, визуализация.

Щербина Е.В. — научное руководство, концептуализация, курирование данных и подготовка первоначального проекта.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Cosovic M., Amelio A., Junuz E. Classification methods in Cultural Heritage. *Proceedings of the Visual Pattern Extraction and Recognition for Cultural Heritage Understanding (VIPERC2019)*. 2019. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2320/>

2. Isa W.M. W., Zin N.A.M., Rosdi F., Sarim H.M. Digital preservation of intangible cultural heritage. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2018; 12(3):1373. DOI: 10.11591/ijeecs.v12.i3.pp1373-1379

3. Hua S. World heritage classification and related issues — A case study of the “convention concerning the protection of the World cultural and natural heri-

tage”. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2010; 2(5):6954-6961. DOI: 10.1016/j.sbspro.2010.05.048

4. Scherbina E.V., Salmo A. Urban planning risks of losing cultural heritage. *Construction: Science and Education*. 2022; 12(4):46-63. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.4.4. EDN UVUULM. (rus.).

5. Ahmed M. Syrian World Heritage and World Heritage Convention during the Syrian War. *Proceedings of the Scientific and Practical Conference of Young Geographers Scholars*. 2019; 169-172. EDN MGXJMF. (rus.).

6. Tišma S., Uzelac A., Jelinčić D.A., Franić S., Škrtić M.M. Overview of social assessment methods for the economic analysis of Cultural Heritage invest-

ments. *Journal of Risk and Financial Management*. 2022; 15(8):327. DOI: 10.3390/jrfm15080327

7. Medda F., Lippardini F. Impact investment for urban cultural heritage. *City, Culture and Society*. 2021; 26:100413. DOI: 10.1016/j.ccs.2021.100413

8. Rudan E. Circular economy of Cultural Heritage — Possibility to create a new tourism product through adaptive reuse. *Journal of Risk and Financial Management*. 2023; 16(3):196. DOI: 10.3390/jrfm16030196

9. *Assessing the Values of Cultural Heritage: Research Report* / ed. De la Torre M. Los Angeles, CA, Getty Conservation Institute, 2002. URL: http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/values_cultural_heritage

10. Panzera E. The role of Cultural Heritage in shaping territorial identities. *Cultural Heritage and Territorial Identity*. 2022; 117-143. DOI: 10.1007/978-3-030-94468-1_5

11. Salmo A., Scherbina E.V., Alibrahim L.Y. Architectural and urban identity of Homs city. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(10):1285-1296. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1285-1296

12. Zin N.M., Ismail F.Z. Cultural Heritage protection from disaster impacts: A review of global disaster risk reduction frameworks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023; 1217(1):012004. DOI: 10.1088/1755-1315/1217/1/012004

13. Falk M.T., Hagsten E. Assessing different measures of fire risk for Cultural World Heritage sites. *Heritage Science*. 2023; 11(1). DOI: 10.1186/s40494-023-01026-y

14. Crowley K., Jackson R., O'Connell S., Karunarthana D., Anantasari E., Retnowati A. et al. Cultural

Heritage and Risk Assessments: Gaps, challenges, and future research directions for the inclusion of heritage within climate change adaptation and disaster management. *Climate Resilience and Sustainability*. 2022; 1(3). DOI: 10.1002/cli.2.45

15. Karaca F. An AHP-based indoor air pollution risk index method for Cultural Heritage Collections. *Journal of Cultural Heritage*. 2015; 16(3):352-360. DOI: 10.1016/j.culher.2014.06.012

16. Gorbenkova E.V., Scherbina E.V., Starolavnikova O.M. Method for determining the agro-town's development index. *Online journal Naukovedenie*. 2015; 7(2):97. DOI: 10.15862/92TVN215. EDN UHMKUP. (rus.).

17. Podgorbunskich P.E., Golovina S.G. The algorithm of rural territories sustainable development monitoring. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2012; 5(97):79-84. EDN PAKJEV. (rus.).

18. Harbiankova A., Shcherbina E.V. Evaluation model for sustainable development of settlement system. *Sustainability*. 2021; 13(21):11778. DOI: 10.3390/su132111778

19. Harbiankova A., Scherbina E., Budzevich M. Exploring the significance of heritage preservation in enhancing the settlement system resilience. *Sustainability*. 2023; 15(21):15251. DOI: 10.3390/su152115251

20. Salmo A., Shcherbina E. Post-war reconstruction priorities in the light of preservation of preserved tangible cultural heritage: AHP approach. *Sustainable Development of Territories: collection of reports of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2022; 200-206. EDN KILILZ. (rus.).

Received November 6, 2023.

Adopted in revised form on December 5, 2023.

Approved for publication on December 5, 2023.

BIONOTES: Ali Salmo — postgraduate student of Urban planning Faculty; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1052643, ResearcherID: AAG-1758-2019, ORCID: 0000-0002-6797-7559; alisalmorussia1993@gmail.com;

Elena V. Shcherbina — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 485908, Scopus: 57079098300, ResearcherID: Q-6673-2016, ORCID: 0000-0002-8595-2101; sherbinaEV@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Ali Salmo — methodology, formal analysis, initial draft preparation; visualization.

Elena V. Shcherbina — scientific guidance, conceptualization, curation of data and preparation of the initial draft.

Conflicts of interest: the authors declare no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69:69.07:692:699.86:699.88

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.181-193

Расчетно-теоретические исследования узловых соединений в монолитных зданиях

Татьяна Александровна Белаш¹, Анатолий Всеволодович Кузнецов²

¹ Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»); г. Москва, Россия;

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Сектор гражданского строительства в крупных регионах России в основном представлен монолитным домостроением. Приведена типология конструктивных решений узлов сопряжения дисков перекрытий со стенами. Выполнен анализ таких конструктивных решений в процессе эксплуатации.

Материалы и методы. Рассмотрен участок диска перекрытия с перфорацией под термовкладыши. Численный эксперимент в программном комплексе ANSYS включал построение трехмерной модели фрагмента плиты с перфорацией в модуле Design Modeler. Посредством модуля Mesh генерировалась сетка конечных элементов типа Solid 45, представленная в виде трехмерных 8-узловых объемных элементов. Применялся решатель Elemental Difference, позволяющий повысить точность расчетов. В качестве граничных условий учитывались температурные воздействия, силовые воздействия от веса ограждающих стеновых конструкций на консольную часть плиты не учитывались.

Результаты. В холодный период года в отапливаемых зданиях разрушение защитного слоя бетона возникает в зоне знакопеременных температурных воздействий, что приводит к тому, что в диске перекрытия с перфорацией характер многоциклового температурного влияния формирует появление трещин и деструкции бетона на боковых поверхностях шпонок. При действии отрицательных температур наружного воздуха наибольшие напряжения возникают в местах соединения перфорации шпонками и превосходят нормативные значения расчетного напряжения в 1,4 раза.

Выводы. Наиболее уязвимым местом дисков перекрытий с перфорацией являются шпоночные соединения, которые находятся под влиянием циклических температур. По результатам многофакторного анализа напряженно-деформированного состояния диска перекрытия, снабженного перфорацией под термовкладыши, с учетом геометрических параметров перфорации и температурно-климатических воздействий, установлены причины уязвимостей, появление которых связано с высокими значениями нормальных и касательных напряжений, превышающими предельно допустимые при отрицательных значениях температуры наружного воздуха, приводящие к начальной локализации разрушения. Повышение эксплуатационных качеств зданий монолитной конструкции обеспечивается путем применения усовершенствованных конструкций. Предлагаемые конструктивные решения позволяют решить вопросы, связанные с долговечностью и безопасностью при эксплуатации объектов гражданского назначения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, железобетонные монолитные перекрытия, численные методы расчета, температурно-климатические воздействия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Белаш Т.А., Кузнецов А.В. Расчетно-теоретические исследования узловых соединений в монолитных зданиях // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 181–193. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.181-193

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Всеволодович Кузнецов, akuznetsov@pgups.ru.

Computational and theoretical studies of nodal joints in monolithic buildings

Tatyana A. Belash¹, Anatoly V. Kuznetsov²

¹ Research Center of Construction; Moscow, Russian Federation;

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS); Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The civil engineering sector in large regions of Russia is mainly represented by monolithic housing construction. A typology of constructive solutions for interfaces between floor slabs and a wall is given. The analysis of such con-

structive solutions during operation is carried out. Defects and damages formed in the cantilever part of the perforated floor slab were determined. A numerical study of the stress-strain state of nodal joints was carried out, taking into account natural and climatic influences. An assessment of the performance of such buildings is given. Improved and new types of junctions of floor slabs with an outer wall are proposed.

Materials and methods. The section of the floor slab with perforation for thermal liners is considered. The numerical experiment carried out in the ANSYS software package included the construction of a three-dimensional model of a perforated slab fragment in the Design Modeler module. A finite element mesh of Solid 45 type, represented as three-dimensional 8-node volume elements, was generated using the Mesh module. The Elemental Difference solver was used to improve the accuracy of calculations. Temperature effects were taken into account as boundary conditions, force effects from the weight of enclosing wall structures on the cantilever part of the slab were not taken into account.

Results. A numerical study of the interface nodes of the floor slab with the wall was carried out. It was determined that in the cold period of the year, in heated buildings of the type under consideration, the destruction of the protective layer of concrete occurs in the zone of alternating temperature effects, which leads to the fact that in the perforated floor slab, the nature of the multi-cycle temperature effects forms the appearance of cracks and destruction of concrete on the side surfaces of the keys. The results of numerical simulation showed that under the action of negative outdoor temperatures, the greatest stresses occur at the junctions of perforations with keys and exceed the standard values of the calculated stress by 1.4 times. For example, for the ratio a/b equal to 100/100, the values of normal stresses σ_z amounted to 1.16 MPa, taking into account temperature and climatic influences in the cold season. New types of design solutions are proposed for the junctions of the floor slab with the wall, which allow to reduce the values of normal stresses to a level that does not exceed the standard values of the design compression resistance established by CP 63.13330.2018.

Conclusions. Based on the performed studies, it was found that the most vulnerable point of the floor slabs with perforation are key connections, which are influenced by cyclic temperatures. Based on the results of multifactor analysis of the stress-strain state of the floor slab with perforation for thermal inserts, taking into account the geometric parameters of perforation and temperature and climatic influences, the causes of vulnerabilities were established, the appearance of which is associated with high values of normal and tangential stresses exceeding the maximum permissible at negative outdoor temperatures, leading to the initial localization of destruction. The improvement of the operational qualities of monolithic buildings is ensured by the use of improved structures. The proposed design solutions make it possible to solve issues related to durability and safety during the operation of civil facilities.

KEYWORDS: finite element method, stress-strain state, reinforced concrete monolithic floors, numerical calculation methods, temperature and climatic effects

FOR CITATION: Belash T.A., Kuznetsov A.V. Computational and theoretical studies of nodal joints in monolithic buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):181-193. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.181-193 (rus.).

Corresponding author: Anatoly V. Kuznetsov, akuznetsov@pgups.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях городской агломерации сектор гражданского строительства России преимущественно представлен монолитным домостроением [1–3]. Высокие темпы строительства зданий, строящихся по монолитной конструктивной системе [4], позволяют решить ряд социальных задач, лежащих в основе государственной жилищной политики, связанных с увеличением жилой площади в ряде регионов страны [5]. Массовое возведение таких многоэтажных комплексов характеризуется перекрестно-стеновой конструктивной схемой. Конструктивные решения представляют собой чаще всего трехслойные стеновые конструкции, опирающиеся на консольную часть монолитного диска перекрытия, в которой, как правило, из теплотехнических соображений предусмотрена перфорация, заполняемая теплоизоляционным материалом.

Исследования показали, что для зданий, выполненных по монолитной конструктивной системе, характерны различные варианты устройств узлов сопряжений дисков перекрытий с наружными стеновыми конструкциями (рис. 1) [6–8]. В практике строительства наибольшее распространение получили конструктивные решения, выполненные по типу 2 (рис. 1, б).

При этом ряд интегральных значений эксплуатационных качеств монолитных зданий в основ-

ном на стадии разработки проектной и рабочей документации в полной мере не учитывается. Например: тепловлажностный режим помещений [9], влияние температурно-климатических воздействий на напряженно-деформированное состояние (НДС) узловых соединений монолитных зданий [10], безопасность и долговечность [11–13].

Недооценка климатического влияния, ошибки на стадии проектирования и строительства монолитных зданий приводят к различным дефектам и повреждениям [14].

Для рассматриваемых типов узловых соединений присуще устройство перфорации в консольной части плиты, заполняемое термовкладышами. Проводимые натурные исследования таких конструктивных решений выявили низкие эксплуатационные качества, что выражается в том числе ошибками в проектной документации и на стадии возведения зданий, теплотехническими дефектами и повреждениями в виде развития трещин, деформации материала в местах сопряжения узловых соединений дисков перекрытий с наружными стеновыми конструкциями [15, 16]. Совокупность влияния этих факторов, а также нарушение технологии выполнения монолитных работ зачастую приводят к аварийным ситуациям [17–22], а впоследствии к значительным технико-экономическим затратам, связанным с восстановлением таких зданий.

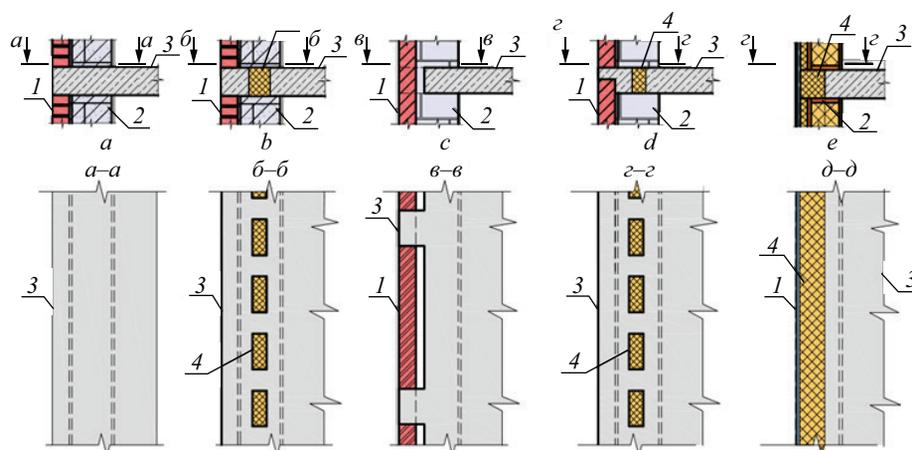


Рис. 1. Типология узлов сопряжения дисков перекрытий со стеной: *a* — перекрытие без утеплителя (тип 1); *b* — перекрытие с перфорацией (тип 2); *c* — перекрытие с консольными выпусками (тип 3); *d* — перекрытие с подрезкой в виде «зуба» (тип 4); *e* — перекрытие с внешним теплоизоляционным слоем (тип 5); 1 — наружный (лицевой) слой; 2 — внутренний слой; 3 — диск перекрытия; 4 — теплоизоляция (термовкладыш)

Fig. 1. Typology of nodes of interface of floor slabs with the wall: *a* — slab without insulation (type 1); *b* — slab with perforation (type 2); *c* — slab with cantilevered outlets (type 3); *d* — slab with “tooth” trimming (type 4); *e* — slab with external thermal insulation layer (type 5); 1 — external (face) layer; 2 — internal layer; 3 — floor slab; 4 — thermal insulation (thermal insert)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В соответствии с Приложением Г. 3 СП 230.1325800.2015 вариативность шага перфорации *a/b* принимается в диапазоне от 1/1 до 1/5 с последующим устройством термовкладышей в консольной части диска перекрытия. Схема размещения перфорации диска перекрытия представлена на рис. 2, на котором обозначены основные геометрические параметры, включающие длину термовкладыша — *a*, длину шпонки — *b*, ширину термовкладыша — *dt*.

В табл. 1 приведены варианты устройства шага перфорации в монолитной плите.

Применение перфорации предусматривается для укладки термовкладышей из экструдированного пенополистирола в целях снижения влияния «мостика холода» на параметры микроклимата помещений. Причем для недопущения промерзания несущих конструкций геометрическое расположение слоя термовкладыша в перфорации железобетонного диска перекрытия должно быть совмещено со слоем утеплителя в стене (рис. 3, *a*). Однако на практике данные требования не всегда выполняются, что показано на рис. 3, *b*.

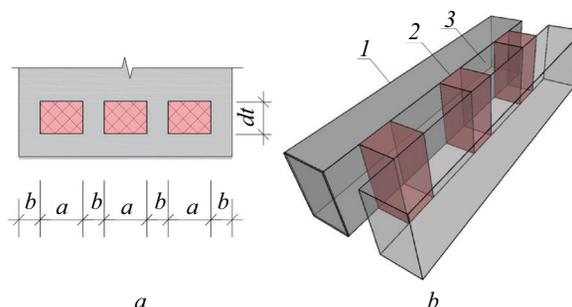


Рис. 2. Схема расположения фрагмента диска перекрытия: *a* — схема размещения перфорации диска перекрытия; *b* — 1 — торцевой брусок; 2 — шпонки; 3 — перфорация

Fig. 2. Layout of the floor slab fragment: *a* — layout of the floor slab perforation; *b* — 1 — end bar; 2 — keys; 3 — perforation

Следует отметить, что при разработке проектных решений по определению энергоэффективности монолитных зданий принято руководствоваться Приложением Г. 3 СП 230.1325800, в котором приведены значения удельной потери теплоты ψ , Вт/(м²·°С),

Табл. 1. Варианты устройства перфорации монолитного диска перекрытия при соотношении *a/b* = 1/1; 2/1; 3/1; 4/1; 5/1
Table 1. Variants of perforation device of monolithic floor slab at ratio *a/b* = 1/1; 2/1; 3/1; 4/1; 5/1

<i>a/b</i>	1/1	2/1	3/1	4/1	5/1
<i>Вариант 1 / Variant 1</i>					
<i>a</i>	100	200	300	400	500
<i>b</i>	100	100	100	100	100
<i>Вариант 2 / Variant 2</i>					
<i>a</i>	150	300	450	600	750
<i>b</i>	150	150	150	150	150



Рис. 3. Фрагменты диска перекрытия и балконной плиты с перфорацией: *a* — фактическое размещение шага перфорации диска перекрытия; *b* — фрагмент балконной плиты с перфорацией под термовкладыши и зоной локальных повреждений

Fig. 3. Fragments of the floor slab and balcony slab with perforations: *a* — actual placement of the perforation pitch of the floor slab; *b* — fragment of the balcony slab with perforations for thermal inserts and a zone of localized damage

для различных узловых соединений с наружной несущей многослойной стеной различной конструкции. Тем не менее в литературных источниках сведения о влиянии отношения a/b на НДС плиты перекрытия в зоне перфорации при температурных воздействиях отсутствуют¹ [23–25].

В этой связи рассмотрим здание с перекрестно-стеновой конструктивной схемой. Выделим типовой фрагмент ограждающей конструкции — диск перекрытия с перфорацией. Согласно предлагаемой типологии (см. рис. 1), данное конструктивное решение относится к типу 2.

¹ СП 230.1325800.2015. Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей (с Изменением № 1). М. : Минстрой России, 2015.

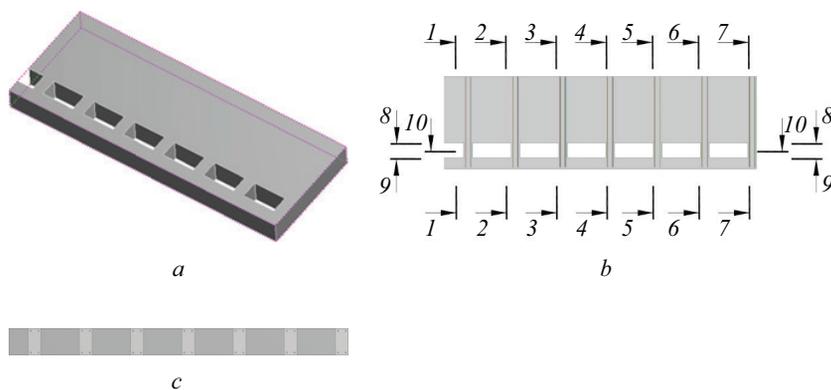


Рис. 4. Расчетная модель фрагмента в зоне перфорации при $a = 300$ мм, $b = 100$ мм: *a* — общий вид модели с арматурными стержнями в шпонках; *b* — вид сверху; *c* — вид спереди

Fig. 4. Computational model of the fragment in the perforation zone at $a = 300$ mm, $b = 100$ mm: *a* — general view of the model with reinforcement bars in keys; *b* — top view; *c* — front view

Оценка и анализ НДС трехмерной расчетной модели перфорированного диска перекрытия (рис. 4) проводился численными методами в программном комплексе ANSYS с учетом температурно-климатических воздействий. Рассматриваемый фрагмент диска перекрытия имел следующие фиксированные параметры: ширина — 1,35 м, перфорация — 7 шт.; длина диска перекрытия варьировалась с учетом соотношений a/b , представленных в табл. 1 (вариант 1). Толщина плиты в расчетной модели принята равной 200 мм, класс бетона В20, класс арматуры А500.

В расчетной модели исходные геометрические параметры приняты в соответствии с типовыми проектными решениями, показанными на рис. 5. В модели предусматривалось армирование плиты продольными арматурными стержнями вдоль шпонок. Варианты устройства перфорации монолитного диска перекрытия рассматривались согласно рекомендуемым параметрам СП 230.1325800.2015 при соотношениях $a/b = 1/1; 2/1; 3/1; 4/1; 5/1$.

Шпонки монолитно соединяют торцевой брус с основной частью плиты перекрытия, образуя, тем самым, статически неопределимую подсистему. В соответствии с СП 20.13330 нормативный температурный перепад в данном случае определяется разностями (1), (2):

$$\Delta t_w = t_w - t_{0c} \quad (1)$$

в теплое время года;

$$\Delta t_c = t_c - t_{0w} \quad (2)$$

изменение средней температуры в холодное время года,

где t_w, t_c — нормативные значения средних температур по сечению лицевого слоя в теплое и холодное время года; t_{0w}, t_{0c} — начальные температуры, соответствующие замыканию лицевого слоя, в теплое и холодное время года.

Нормативные и расчетные значения нагрузки от температурных климатических воздействий,

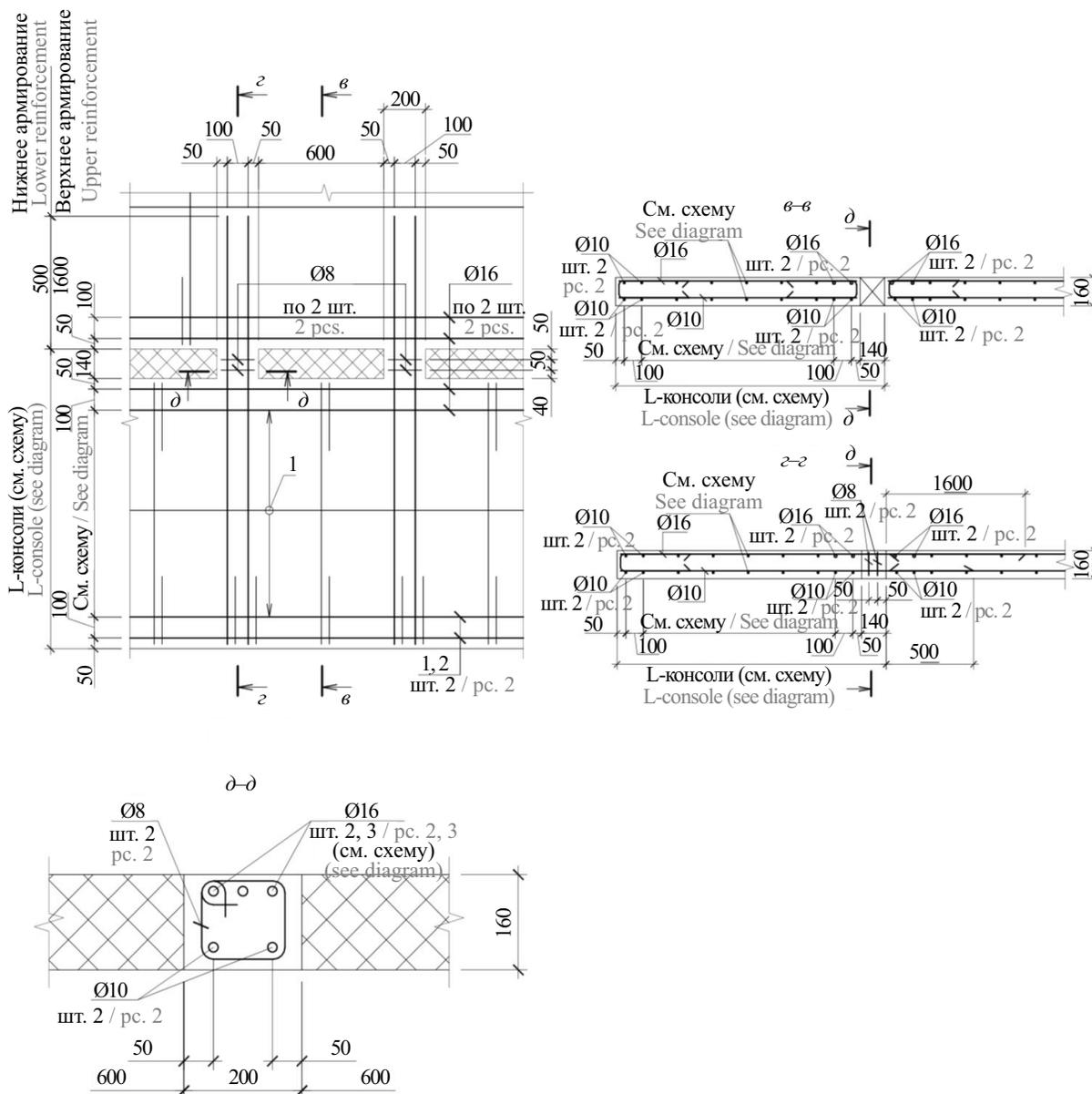


Рис. 5. Схема армирования фрагмента диска перекрытия (балкона) в зоне устройства перфорации
 Fig. 5. Reinforcement scheme of the floor slab fragment (balcony) in the perforation zone

определенные в соответствии с СП 20.13330 для г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области (а также районов с аналогичными климатическими параметрами), сведены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Температурно-климатические воздействия, включающие циклические колебания наружной температуры воздуха, солнечной радиации, влажности воздуха оказывают влияние на НДС узловых сопряжений монолитных зданий. Стеновые ограждающие конструкции зданий, а также диски перекрытий в зонах устройства перфорации испытывают существенные усилия, которые в ряде случаев являются причиной возникновения различного рода повреждений [26–33].

С целью определения характера НДС для исследуемой расчетной модели (см. рис. 4) задавались граничные условия в виде температурных нагрузок, приложенных к вертикальным граням перфорированного диска перекрытия. В качестве температурных нагрузок внешней среды задавались температуры в диапазоне от 0 до –40 °С, при этом также была определена температура замыкания конструкции для условий Санкт-Петербурга (см. табл. 2).

Для данного случая результаты расчета температурных полей отображены на рис. 6 в виде послойного среза конструкции заданными температурами, находящимися в диапазоне от 20 до –25 °С. На границах температурных срезов в зоне расположения шпоночных соединений распределение температур достигало отрицательных значений при температуре замыкания –25,96 °С.

Табл. 2. Значения нагрузки от температурных климатических воздействий

Table 2. Load values from temperature climatic effects

Параметр Parameter	Нормативное значение температур, °C Normative value of temperatures, °C			Расчетное значение температур, °C Calculated value of temperatures, °C		
	южная сторона south side	восточная и западная стороны east and west sides	северная сторона north side	южная сторона south side	восточная и западная стороны east and west sides	северная сторона north side
Δt_w	18,3	14,4	15,9	20,1	15,8	17,5
Δt_c	-23,9			-25,96		
$\vartheta_w = \theta_s$	6,0	7,15	2,43	7,3	7,87	2,67
ϑ_c^*	0			0		

Примечание: * ϑ_c — средний перепад температуры по сечению элемента в холодный период года.

Note: * ϑ_c is the average temperature difference across the element cross-section in the cold season.

При этих же температурных значениях определены перемещения вдоль торцевого бруса, максимальные значения которых составили 0,75 мм при длине торцевого бруса 2650 мм и соотношении $a/b = 3/1$ (рис. 7, а). Диаграмма перемещений при различном соотношении a/b при воздействии температуры минус $-25,96$ °C представлена на рис. 7, б. Необходимо отметить, что при низких отрицательных температурах до -50 °C максимальные значения продольных деформаций (по длине торцевого бруса) увеличивались и составляли более 1 мм.

На диаграмме перемещений (см. рис. 7, а) рассматриваются случаи, когда ширина шпонки $b = 100$ мм, длина перфорации $a = 100, 200, 300, 400, 500$ мм ($a/b = 1/1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5$). Из диаграммы видно, что значения горизонтальных перемещений практи-

чески линейно возрастают при увеличении отношения a/b (длины торцевого бруса).

На рис. 8 показан фрагмент схемы расположения диска перекрытия с перфорацией. Сечения, для которых численными исследованиями определялись нормальные σ_z и касательные τ_{xz} напряжения, приняты в соответствии с рис. 4, б.

В табл. 3 показаны значения максимальных и минимальных значений напряжений в сечениях 2–2/8–8, 6–6/8–8 при соотношениях a/b : 100/100; 300/100; 500/100.

Полученные значения сравнивались с расчетным сопротивлением растяжению $R_{bt} = 0,81$ МПа для бетона класса В20 в соответствии с СП 63.13330.2018. Фрагмент узла сопряжения диска перекрытия со стеной исследовался для периода с отрицательными температурами наружного воздуха,

C: Copy of Steady-State Thermal

Temperature

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1

Max: 22

Min: -25,96

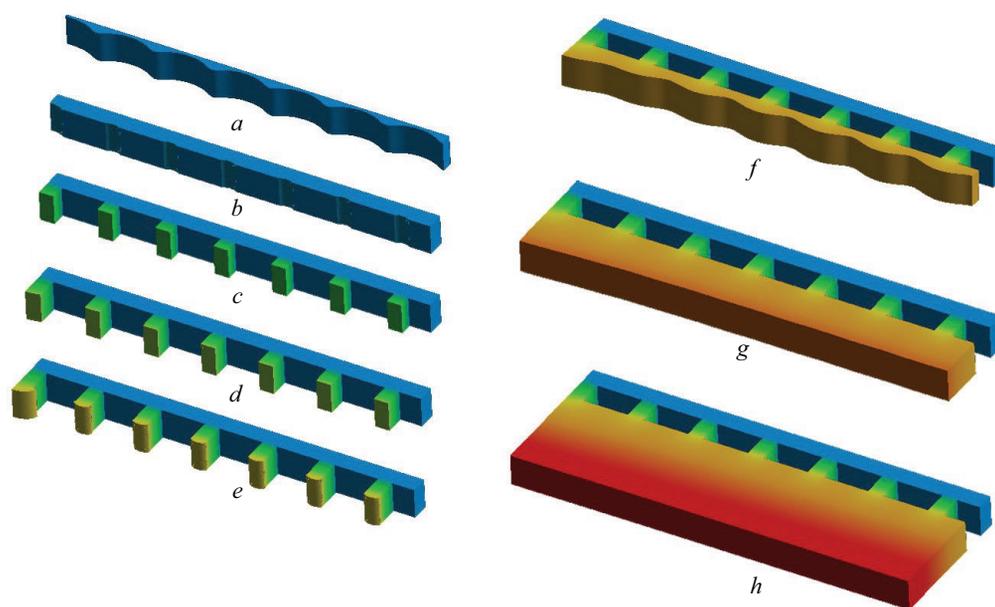
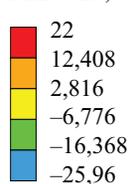


Рис. 6. Результаты расчета фрагмента диска перекрытия в зоне перфорации при $\Delta T = -25,96$ °C: а — $t = -25$ °C; б — $t = -20$ °C; в — $t = -10$ °C; д — $t = -5$ °C; е — $t = 0$ °C; ф — $t = 5$ °C; г — $t = 10$ °C; з — $t = 20$ °C

Fig. 6. Calculation results of the floor slab fragment in the perforation zone at $\Delta T = -25,96$ °C: а — $t = -25$ °C; б — $t = -20$ °C; в — $t = -10$ °C; д — $t = -5$ °C; е — $t = 0$ °C; ф — $t = 5$ °C; г — $t = 10$ °C; з — $t = 20$ °C

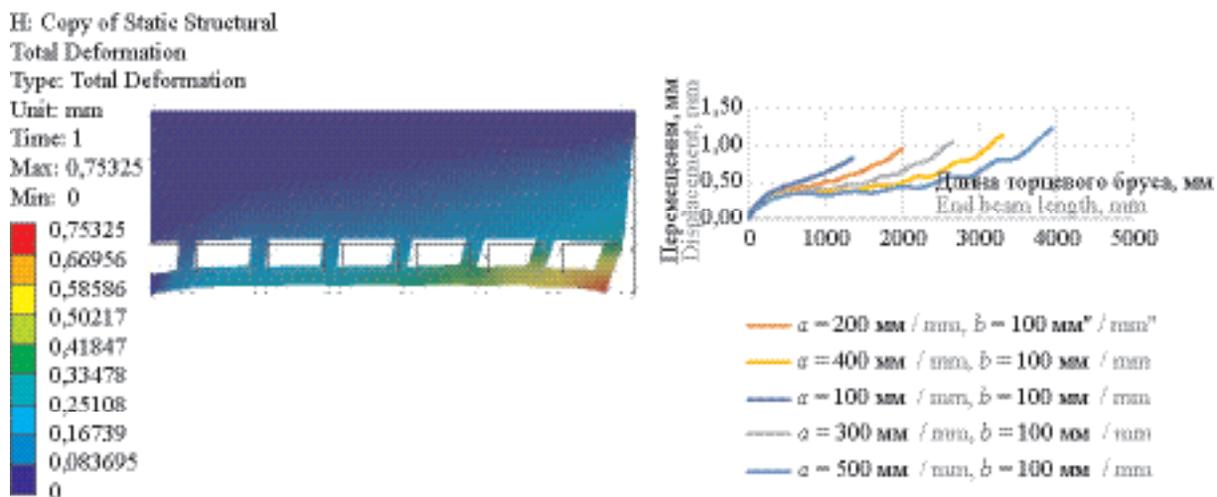


Рис. 7. Результаты расчета фрагмента диска перекрытия в зоне перфорации $a = 300$ мм, $b = 100$ мм: a — распределение температурных полей по плите (22°C — температура относительного нуля); b — диаграмма перемещений, мм, вдоль торцевого бруса

Fig. 7. Calculation results of the floor slab fragment in the perforation zone $a = 300$ mm, $b = 100$ mm: a — distribution of temperature fields in the slab (22°C — relative zero temperature); b — displacement diagram, mm, along the end beam

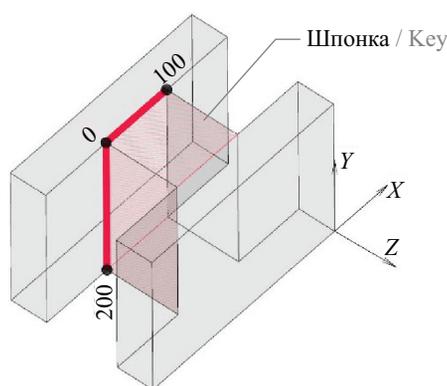


Рис. 8. Схема расположения диска перекрытия с перфорацией

Fig. 8. Layout of the floor slab with perforations

что для условий Санкт-Петербурга соответствует температуре замыкания конструкции, равной $-25,96$ и $20,13^\circ\text{C}$ при эксплуатации в зимнее время.

Рассмотрены нормальные и касательные напряжения с учетом температурных воздействий на конструкцию в холодный период года при различных соотношениях a/b . Отдельные результаты представлены на рис. 9 в виде эпюр нормальных напряжений σ_z для сечений 2–2/8–8, 6–6/8–8, проходящих по толщине перекрытия через шпонки в поперечном и продольном направлениях.

Для участка, расположенного в зоне сечений 2–2/8–8, характер изменений нормальных σ_z и касательных τ_{yz} напряжений является знакопеременным и находится в диапазоне от $0,7$ до $-2,1$ МПа. Много-

Табл. 3. Максимальные и минимальные значения напряжений в сечениях 2–2/8–8, 6–6/8–8 при соотношениях a/b : 100/100; 300/100; 500/100

Table 3. Maximum and minimum values of stresses in sections 2–2/8–8, 6–6/8–8 at ratios a/b : 100/100; 300/100; 500/100

Температурное воздействие Temperature impact	Положение Position	Сечение Cross-section	a/b					
			100/100		300/100		500/100	
			σ_{\min} , МПа σ_{\min} , МПа	σ_{\max} , МПа σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа σ_{\min} , МПа	σ_{\max} , МПа σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа σ_{\min} , МПа	σ_{\max} , МПа σ_{\max} , МПа
Холодный период. Температура замыкания Cold period. Circuit temperature	Боковая грань Side edge	2–2	0,4915	0,8651	-1,7362	-0,8658	-1,6264	-0,9332
	Центр шпонки Key centre		0,5278	1,1691	-0,4445	0,4706	-0,3354	0,5794
	Боковая грань Side edge	6–6	-0,3786	-0,2302	-3,4313	-1,4890	-3,3729	-2,9654
	Центр шпонки Key centre		-0,0216	0,0529	-0,7460	-0,0531	-0,5933	-0,1186

Температурное воздействие Temperature impact	Положение Position	Сечение Cross-section	a/b					
			100/100		300/100		500/100	
			σ_{\min} , МПа σ_{\min} , МПа	σ_{\max} , МПа σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа σ_{\min} , МПа	σ_{\max} , МПа σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа σ_{\min} , МПа	σ_{\max} , МПа σ_{\max} , МПа
Теплый период. Температура замыкания Warm period. Circuit temperature	Боковая грань Side edge	2-2	-2,9433	-2,6272	0,7682	1,6010	1,2920	2,3730
	Центр шпонки Key centre		-2,9519	-2,1922	-1,0605	0,2539	-1,0333	0,4392
	Боковая грань Side edge	6-6	-0,0680	0,0563	0,8683	1,0759	2,7582	3,2481
	Центр шпонки Key centre		0,0361	0,1258	-0,2912	0,1641	-0,4275	0,1551
$t_n = -50$ °C $t_n = -50$ °C	Боковая грань Side edge	2-2	0,8931	1,4592	-2,3334	-1,3381	-2,4719	-1,4267
	Центр шпонки Key centre		0,91599	1,9163	-0,6786	0,76318	-0,5029	0,8970
	Боковая грань Side edge	6-6	-0,5667	-0,3419	-2,6611	-2,2933	-5,0702	-4,4214
	Центр шпонки Key centre		-0,14840	0,08718	-1,1159	-0,07569	-0,9240	-0,1522

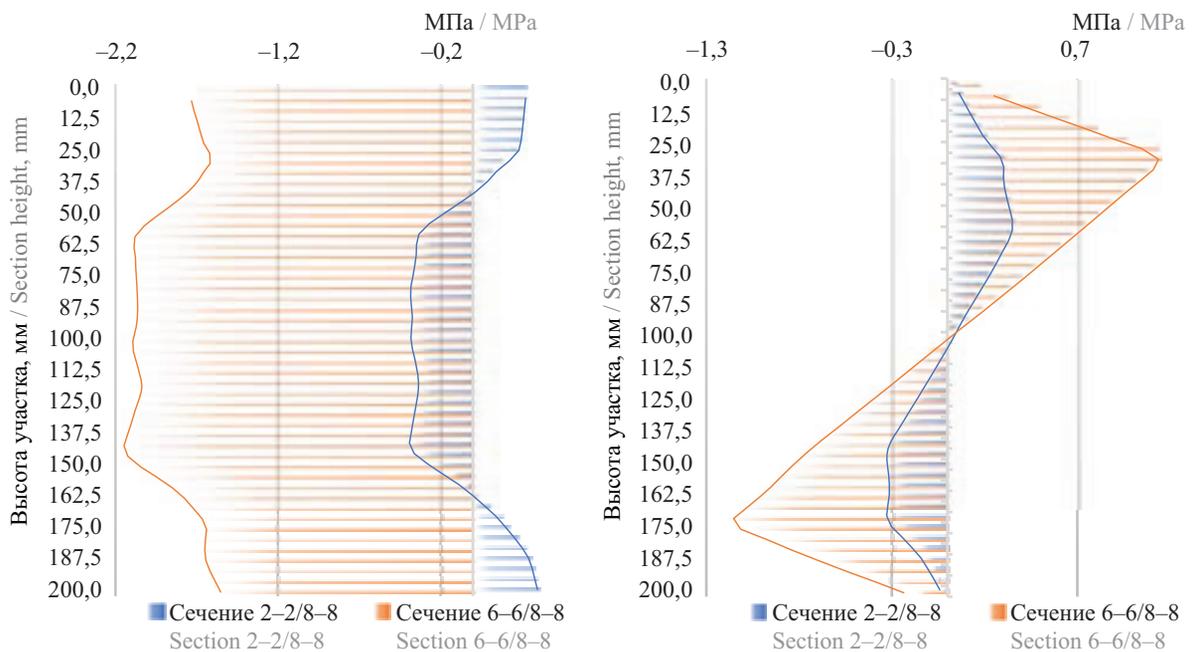


Рис. 9. Нормальные σ_z (a) и касательные τ_{yz} (b) напряжения для сечений в поперечном направлении при температуре замыкания в холодный период года $\Delta t_c = -25,96$ °C, $\Delta t_w = 20,13$ °C для соотношения $a/b = 500/100$

Fig. 9. Normal σ_z (a) and tangential τ_{yz} (b) stresses for cross-sections in transverse direction at circuit temperature in cold season $\Delta t_c = -25.96$ °C, $\Delta t_w = 20.13$ °C for the ratio $a/b = 500/100$

летний режим эксплуатации при таких температурно-климатических воздействиях служит основным дестабилизирующим фактором, показывающим, что наиболее уязвимые элементы диска перекрытия — шпонки и торцевой брус. В случае многоциклового воздействия пониженных температур на отапливаемые здания возникает усадка бетона в стенах и перекрытиях. Оказываемое на боковые вертикальные поверхности шпонок изменение температуры и влажности по сечениям элемента имеет резко неравномерный характер. С учетом того, что торцы диска перекрытия являются уязвимым местом, в ситуациях их открытого расположения вертикальная плоскость на контакте с внешней средой зачастую подвергается критическому воздействию атмосферных осадков. Это приводит к заполнению капилляров и пор в теле бетона влагой, а с учетом воздействия пониженных температур на торцевой брус, работающий под нагрузкой, возникают объемные деформации, приводящие со временем к деструкции бетонного камня и коррозии арматурных стержней.

На этапе исследований консервативно в запас принималось значение R_{bt} по 1-й группе предельных состояний. Применение перфорации в консольной части плиты по сравнению с традиционным диском перекрытия однозначно снижает значения нормальных σ_z и касательных τ_{yz} напряжений в приопорной зоне со стороны наружной стены и приближает их к нормативным значениям, которые могут быть восприняты бетоном конструкции. В ходе проведения численного моделирования превышение напряжений над нормальными значениями наблюдалось не во всех сечениях.

В частности, анализ проводимых численных исследований показал, что наибольшие напряжения возникают в местах соединения перфорации шпонками и превосходят нормативные значения расчетного напряжения в 1,4 раза. Например, для соотношения a/b , равного 100/100, значения нормальных напряжений σ_z составили 1,16 МПа с учетом температурно-климатических воздействий в холодный период года.

Так как железобетонный диск перекрытия относится к материалам с высокой степенью инерционности, при воздействии отрицательных температур на торец плиты зона перехода через 0°C будет проходить многократно по сечениям шпонок. Наблюдаемые при этом процессы микро- и макроскопической сегрегации льда в структуре бетонного камня будут ускорять разрушение из-за действия агрегатного состояния воды. В связи с этим необходимо ставить вопрос об опасности применения подобного рода конструктивного решения в жилищном строительстве и о разработке инновационных способов защиты узлов сопряжения диска перекрытия со стеной в монолитных зданиях.

Некоторые из предлагаемых решений показаны на рис. 10. Узел сопряжения диска перекрытия

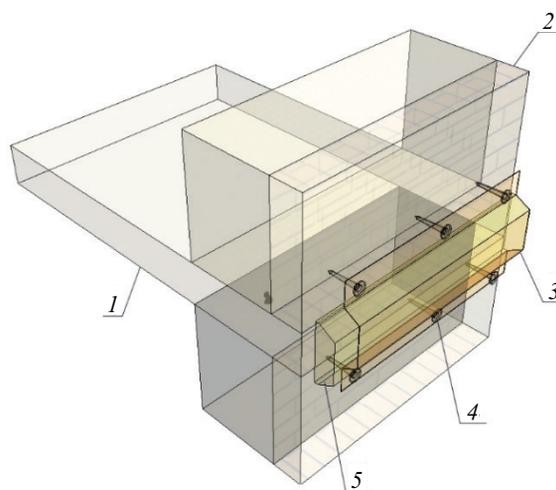


Рис. 10. Устройство для утепления наружной стены здания: 1 — диск перекрытия; 2 — наружная стена; 3 — каркас трапециевидальной формы; 4 — отверстия под дюбель-анкеры; 5 — теплоизоляционный материал; 6 — саморегулируемые электронагревательные кабели

Fig. 10. Device for insulation of the outer wall of the building: 1 — floor slab; 2 — outer wall; 3 — trapezoidal frame; 4 — holes for dowel anchors; 5 — thermal insulation material; 6 — self-regulating electric heating cables

со стеной [34] (рис. 10) нашел отражение в практике строительства и включен в региональные методические документы РМД 51-25-2015 (первое издание), РМД 51-25-2018 (переиздание) для условий г. Санкт-Петербурга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование температурно-климатических воздействий на НДС фрагмента диска перекрытия с перфорацией подтвердило опасность применения существующих типов конструктивных решений. Определено, что наиболее уязвимым местом в перфорированных плитах являются шпонки, поскольку они находятся в зоне влияния циклических температур. Установлено, что наибольшая концентрация напряжений в таких плитах возникает при шаге перфорации $a/b = 500/100$.

Для повышения теплотехнических показателей, обеспечения прочности и устойчивости узлов сопряжений дисков перекрытий со стеной рассматривается система конструктивных решений, на которые получены патенты на полезные модели. Предлагается применение усовершенствованных и новых типов конструктивных решений. Например, разницу в напряжениях возможно компенсировать при помощи конструктивных мероприятий, описание которых приводится в ряде публикаций [6, 7, 34].

Эти предложения позволяют решить принципиальные вопросы, связанные с повышением эксплуатационных качеств гражданских зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шембаков В.А. Технология сборно-монолитного домостроения СМК в массовом строительстве России и стран СНГ // Жилищное строительство. 2013. № 3. С. 26–29. EDN PXACBN.
2. Волкова О.Е., Сидоренко К.А. Монолитное домостроение в современном строительстве // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2021. Т. 1. С. 146–149. EDN FTZGJH.
3. Камчыбеков М.П., Мураталиев Н.М., Орозалиев К.Ж., Сагынбеков У.С., Мелисов К.М. К вопросу о монолитном домостроении // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2019. Т. 19. № 4. С. 66–70. EDN BEUJYL.
4. Зенин С.А., Шарипов Р.Ш., Чистяков Е.А., Кудинов О.В. Разработка свода правил «Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования» // Вестник НИЦ Строительство. 2020. № 4 (27). С. 18–27. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-18-27. EDN FALHNM.
5. Пешков В.В., Белобородов К.М. Разработка энергосберегающих мероприятий на этапе строительства монолитных многоэтажных зданий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 11 (767). С. 106–114. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-767-11-106-114. EDN EFORBP.
6. Кузнецов А.В. Узлы сопряжения диска перекрытия с ограждающими стеновыми конструкциями в монолитном домостроении : автореф. дис. ... канд. тех. наук. СПб., 2023. 23 с. EDN GFCFWD.
7. Kuznetsov A.V., Demin A.M. Energy efficient design solution for the interface node between the floor slab and the wall // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021. 2022. Pp. 799–807. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_87. EDN ERFOMA.
8. Kuznetsov A.V., Zimin S.S. Temperature stresses in the perforated overlap disc // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. No. 3 (101). P. 10103. DOI: 10.4123/CUBS.101.3. EDN MPKTHТ.
9. Сидоров В.Н., Примкулов А.М. Численно-аналитическое решение нестационарной задачи теплопроводности с переменными теплофизическими параметрами среды // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 5. С. 685–696. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.685-696. EDN JWFKVJ.
10. Лебедева А.В., Тумаков С.А. Влияние температурно-климатических воздействий на напряженно-деформированное состояние монолитного железобетонного каркаса здания // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 4 (11). С. 9–14. EDN HQCCED.
11. Сотникова О.А., Целярицкая М.И., Пащенко Ю.О. Анализ «мостиков холода» с целью выявления недостатков монолитного домостроения в г. Воронеже // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. Т. 26. № 3. С. 21–34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-35. EDN HLPDRO.
12. Guri M., Krosi F., Xhexhi K. Study of thermal performance of prefabricated large panel buildings // 2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering – 2CroCEE. 2023. DOI: 10.5592/CO/2CroCEE.2023.63
13. Ицук М.К., Ицук Е.М., Айзятуллин Х.А., Черемных В.А. Дефекты наружных стен с лицевым слоем из пустотелого кирпича // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 4. С. 29–35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.29-35. EDN YRWQXO.
14. Орлович Р.Б., Деркач В.Н., Зимин С.С. Повреждение каменного лицевого слоя в зоне сопряжения с железобетонными перекрытиями // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 8 (60). С. 30–37. DOI: 10.5862/MCE.60.4. EDN VBPVXD.
15. Coppola L., Beretta S., Bignozzi M.C., Bolzoni F., Brenna A., Cabrini M. The improvement of durability of reinforced concretes for sustainable structures: A review on different approaches // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 8. P. 2728. DOI: 10.3390/ma15082728
16. Tamrazyan A.G., Minasyan A.A. The influence of depth of tensile concrete deterioration on the load bearing strength and deflections of corrosion-damaged floor slabs // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 02012. DOI: 10.1051/mateconf/201825102012
17. Желдаков Д.Ю., Пономарев О.И., Минасян А.А., Турсуков С.А. Оценка долговечности кирпичных и каменных конструкций при проведении инженерных изысканий // Вестник НИЦ Строительство. 2023. № 1 (36). С. 27–40. DOI: 10.37538/2224-9494-2023-1(36)-27-40. EDN ZFIKOG.
18. Tamrazyan A.G., Koroteev D. Assessment of the durability of corrosion-damaged prefabricated reinforced concrete structures // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1687. Issue 1. P. 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1687/1/012009
19. Kramarchuk A., Ilnytskyy B., Kopiika N. Ensuring the load-bearing capacity of monolithic reinforced concrete slab damaged by cracks in the compressed zone // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Pp. 217–229. DOI: 10.1007/978-3-031-14141-6_21
20. Umnyakova N.P. Convective and radiant heat transfer on internal surfaces of the outer corner // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2022. № 3 (55). Pp. 55–65. DOI: 10.36622/VSTU.2022.55.3.005. EDN OPNNDX.
21. Сотникова О.А., Целярицкая М.И., Пащенко Ю.О. Анализ «мостиков холода» с целью выявления недостатков монолитного домостроения в г. Воронеже // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. Т. 26. № 3. С. 21–34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-35. EDN HLPDRO.
22. Томаков В.И., Томаков М.В., Пахомова Е.Г., Андриенко В.В. Анализ причин обрушения опалубочного университета. 2022. Т. 26. № 3. С. 21–34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-35. EDN HLPDRO.

бочных систем в строящихся зданиях при устройстве монолитных перекрытий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8. № 4 (29). С. 79–92. EDN PNTULV.

23. Тихонов И.Н., Козелков М.М. Расчет и конструирование железобетонных монолитных перекрытий зданий с учетом защиты от прогрессирующего обрушения // Бетон и железобетон. 2009. № 3. С. 2–8. EDN XWGNV.

24. Умнякова Н.П., Егорова Т.С., Андрейцева К.С., Смирнов В.А., Лобанов В.А. Новое конструктивное решение сопряжения наружных стен с монолитными междуэтажными перекрытиями и балконными плитами // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 28–31. EDN QIOMMR.

25. Яров В.А., Коянкин А.А., Скрипальщиков К.В. Экспериментальные исследования участка монолитного перекрытия многоэтажного здания // Вестник МГСУ. 2009. № 3. С. 150–153. EDN KZFKIL.

26. Довженко О.А., Погребной В.В., Карабаш Л.В. Эффективные шпоночные соединения многопустотных плит перекрытий со стенами в современном крупнопанельном домостроении // Наука и техника. 2018. Т. 17. № 2. С. 146–156. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-146-156. EDN YNQSHZ.

27. Белаиш Т.А., Кузнецов А.В. Теплотехнические качества монолитных жилых зданий // Жилищное строительство. 2009. № 9. С. 22–24. EDN KYLLUN.

28. Альхименко А.И., Снегирев А.И. Влияние температуры замыкания при возведении на напряжения в несущих конструкциях // Инженерно-

строительный журнал. 2008. № 2 (2). С. 8–16. EDN NBMYGX.

29. Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф., Левцев А.П., Митина Е.А., Лапин Е.С. Термическое сопротивление наружных ограждающих конструкций при переменном тепловом потоке // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 10. С. 4–13. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.10.04-13. EDN ELAHVF.

30. Корнилов Т.А., Васильева А.Т. Тепловые потери через сопряжения трехслойных стен с железобетонными перекрытиями // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 8. С. 25–31. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.08.25-31. EDN GLQNGV.

31. Варламов А.А., Шишлонов Е.А., Ткач Е.Н., Шумилин М.С., Гончаров Д.В. Закономерности связи напряжений и деформаций в бетоне // Academy. 2016. № 2 (5). С. 7–16. EDN VLHZPZ.

32. Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Зумин С.С., Ватин Н.И., Борщева К.Д., Белкина Т.В. Трещиностойкость железобетонной стенки в условиях стесненной основой температурной деформации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 8 (71). С. 51–62. DOI: 10.18720/CUBS.71.5. EDN UUXZXT.

33. Barabanshchikov Iu.G., Pham T.H. The influence of concrete composition on the ratio of strength to elastic modulus as a criterion of crack resistance // Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. № 4 (97). P. 9704. DOI: 10.4123/CUBS.97.4. EDN EQZTMP.

34. Кузнецов А.В. Узлы сопряжения диска перекрытия с ограждающими стеновыми конструкциями в монолитном домостроении : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2023. 206 с. EDN VFPDIC.

Поступила в редакцию 23 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 14 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 16 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Татьяна Александровна Белаиш — доктор технических наук, профессор кафедры строительных сооружений, конструкций и материалов; советник РААСН; **Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»);** 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6; РИНЦ ID: 66498, Scopus: 7801647643, ResearcherID: B-7819-2018, ORCID: 0000-0002-4577-8794; belashta@mail.ru;

Анатолий Всеволодович Кузнецов — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительных конструкций, зданий и сооружений; **Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС);** 191031, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9; РИНЦ ID: 659654, Scopus: 57205441909, ResearcherID: HPH-1274-2023, ORCID: 0000-0002-3809-399X; anatolijs@vk.com.

Вклад авторов:

Белаиш Т.А. — научное руководство, обработка материала, доработка текста, итоговые выводы.

Кузнецов А.В. — сбор и обработка материалов, вычисления, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Shembakov V.A. Technology of precast and cast-in-situ housing construction SMK in mass construction of Russia and country-members of Commonwealth of Independent States (CIS). *Housing Construction*. 2013; 3:26-29. EDN PXACBN. (rus.).
2. Volkova O.E., Sidorenko K.A. Monolithic housing construction in modern construction. *Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences*. 2021; 1:146-149. EDN FTZGJH. (rus.).
3. Kamchybekov M.P., Murataliev N.M., Orozaliyev K.Z., Sagybekov U.S., Melisov K.M. To the question of monolithic building. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University*. 2019; 19(4):66-70. EDN BEUJYL. (rus.).
4. Zenin S., Sharipov R., Chistyakov E., Kudinov O. The development of the code of rules 'monolithic structural systems. Design rules'. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2020; 4(27):18-27. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-18-27. EDN FALHNM. (rus.).
5. Peshkov V.V., Beloborodov K.M. The development of energy-saving measures at the construction stage of monolithic multi-storey buildings. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; 11(767):106-114. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-767-11-106-114. EDN EFORBP. (rus.).
6. Kuznetsov A.V. *Interfacing nodes of the floor disk with enclosing wall structures in monolithic housing construction : dissertation abstract ... candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2023; 23. EDN GFCFWD. (rus.).
7. Kuznetsov A.V., Demin A.M. Energy efficient design solution for the interface node between the floor slab and the wall. *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021*. 2022; 799-807. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_87. EDN ERFOMA.
8. Kuznetsov A.V., Zimin S.S. Temperature stresses in the perforated overlap disc. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022; 3(101):10103. DOI: 10.4123/CUBS.101.3. EDN MPKTHH.
9. Sidorov V.N., Primkulov A.M. Semi-analytical solution to steady-state and transient heat transfer problem with variable conductivity properties of the domain. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(5):685-696. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.685-696. EDN JWFVKVJ. (rus.).
10. Lebedeva A.V., Tumakov S.A. The influence of temperature and climatic influences on the stress-strain state of reinforced concrete monolithic frame of the building. *Housing and communal infrastructure*. 2019; 4(11):9-14. EDN HQCCED. (rus.).
11. Sotnikova O.A., Tselyaritskaya M.I., Pashchenko Yu.O. Analysis of "cold bridges" in order to identify shortcomings of monolithic housing construction in Voronezh. *Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3):21-34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-35. EDN HLPDRO. (rus.).
12. Guri M., Krosi F., Xhexhi K. Study of thermal performance of prefabricated large panel buildings. *2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering – 2CroCEE*. 2023. DOI: 10.5592/CO/2CroCEE.2023.63
13. Ishchuk M.K., Ishchuk E.M., Aizyatullin Kh.A., Cheremnykh V.A. Defects of exterior walls with a facing layer of hollow brick. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 4:29-35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.04.29-35. EDN YRWQXO. (rus.).
14. Orlovich R.B., Derkach V.N., Zimin S.S. The damage of a stone facing layer at the junction with reinforced concrete floors. *Magazine of Civil Engineering*. 2015; 8(60):30-37. DOI: 10.5862/MCE.60.4. EDN VBVPXD. (rus.).
15. Coppola L., Beretta S., Bignozzi M.C., Bolzoni F., Brenna A., Cabrini M. The improvement of durability of reinforced concretes for sustainable structures: A review on different approaches. *Materials*. 2022; 15(8):2728. DOI: 10.3390/ma15082728
16. Tamrazyan A.G., Minasyan A.A. The influence of depth of tensile concrete deterioration on the load bearing strength and deflections of corrosion-damaged floor slabs. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:02012. DOI: 10.1051/mateconf/201825102012
17. Zheldakov D.Yu., Ponomarev O.I., Minasyan A.A., Tursukov S.A. Durability assessment of brick and stone structures in engineering surveys. *Bulletin of NIC Construction*. 2023; 1(36):27-40. DOI: 10.37538/2224-9494-2023-1(36)-27-40. EDN ZFIKOG. (rus.).
18. Tamrazyan A.G., Koroteev D. Assessment of the durability of corrosion-damaged prefabricated reinforced concrete structures. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1687(1):012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1687/1/012009
19. Kramarchuk A., Ilynskyy B., Kopyika N. Ensuring the load-bearing capacity of monolithic reinforced concrete slab damaged by cracks in the compressed zone. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023; 217-229. DOI: 10.1007/978-3-031-14141-6_21
20. Umnyakova N.P. Convective and radiant heat transfer on internal surfaces of the outer corner. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2022; 3(55):55-65. DOI: 10.36622/VSTU.2022.55.3.005. EDN OPNNDX.
21. Sotnikova O.A., Tselyaritskaya M.I., Pashchenko Yu.O. Analysis of "cold bridges" in order to identify shortcomings of monolithic housing construction in Voronezh. *Bulletin of the South-Western State University*. 2022; 26(3):21-34. DOI: 10.21869/2223-1560-2022-26-3-21-35. EDN HLPDRO. (rus.).
22. Tomakov V.I., Tomakov M.V., Pahomova E.G., Andrienko V.V. Analysis of the causes of the collapse of formwork systems in buildings under construction

with monolithic slabs. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2018; 8(4):(29):79-92. EDN PNTULV. (rus.).

23. Tikhonov I.N., Kozelkov M.M. Calculation and design of reinforced concrete monolithic ceilings of buildings taking into account protection against progressive collapse. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2009; 3:2-8. EDN XWGNEV. (rus.).

24. Umnyakova N.P., Egorova T.S., Andreitseva K.S., Smirnov V.A., Lobanov V.A. New constructive solution for coupling external walls with monolithic interfloor ceilings and balcony slabs. *Construction Materials*. 2013; 6:28-31. EDN QIOMMR. (rus.).

25. Yarov V.A., Koyankin A.A., Skripalshchikov K.V. Experimental studies of the site of a monolithic overlap of a multi-storey building. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2009; 3:150-153. EDN KZFKIL. (rus.).

26. Dovzhenko O.A., Pohribnyi V.V., Karabash L.V. Effective keyed connections of hollow-core floor slabs with walls in modern large-panel house building. *Science and Technique*. 2018; 17(2):146-156. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-146-156. EDN YNQSHZ. (rus.).

27. Belash T.A., Kuznetsov A.V. Thermal engineering qualities of monolithic residential buildings. *Housing Construction*. 2009; 9:22-24. EDN KYLLUN. (rus.).

28. Alkhimenko A.I., Snegirev A.I. Influence of closing temperature during erection on stresses in load-bearing structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2008; 2(2):8-16. EDN NBMYGX. (rus.).

29. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F., Levtshev A.P., Mitina E.A., Lapin E.S. Thermal resistance of external enclosing structures at variable heat flow. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 10:4-13. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.10.04-13. EDN ELAHVF. (rus.).

30. Kornilov T.A., Vasilyeva A.T. Heat losses through the coupling of three-layer walls with reinforced concrete floors. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 8:25-31. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.08.25-31. EDN GLQNGV. (rus.).

31. Varlamov A.A., Shishlonov E.A., Tkach E.N., Shumilin M.S., Goncharov D.V. Patterns of the relationship between stresses and strains in concrete. *Academy*. 2016; 2(5):7-16. EDN VLHZPZ. (rus.).

32. Barabanshchikov Yu.G., Semenov K.S., Zimin Z.S., Vatin N.I., Borshcheva K.D., Belkina T.V. Crack-resistance of the reinforced concrete wall under conditions of temperature deformation constrained by the foundation. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2018; 8(71):51-62. DOI: 10.18720/CUBS.71.5. EDN UUXZXT. (rus.).

33. Barabanshchikov Iu.G., Pham T.H. The influence of concrete composition on the ratio of strength to elastic modulus as a criterion of crack resistance. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021; 4(97):9704. DOI: 10.4123/CUBS.97.4. EDN EQZTMP.

34. Kuznetsov A.V. *Nodes of interfacing of a floor disk with enclosing wall structures in monolithic housing construction : dissertation ... candidate of Technical Sciences*. St. Petersburg, 2023; 206. EDN VFPDIC. (rus.).

Received August 23, 2023.

Adopted in revised form on December 14, 2023.

Approved for publication on December 16, 2023.

B I O N O T E S : **Tatyana A. Belash** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Structures, Structures and Materials, advisor to the RAASN; **Research Center of Construction**; 6 2nd Institutskaia st., Moscow, 109428, Russian Federation; ID RSCI: 66498, Scopus: 7801647643, ResearcherID: B-7819-2018, ORCID: 0000-0002-4577-8794; belashta@mail.ru;

Anatoly V. Kuznetsov — Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer of the Department of Building Structures, Buildings and Structures; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky pr., 191031, St. Petersburg, Russian Federation; ID RSCI: 659654, Scopus: 57205441909, ResearcherID: HPH-1274-2023, ORCID: 0000-0002-3809-399X; anatolijs@vk.com.

Contribution of the authors:

Tatyana A. Belash — scientific guidance, processing of the material, revision of the text, final conclusions.

Anatoly V. Kuznetsov — collection of materials and their processing, calculations, writing the source text.

The authors declare no conflict of interest.

Оценка несущей способности и эксплуатационной пригодности плиты перекрытия после высокотемпературного воздействия

Анна Николаевна Малахова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Железобетонные конструкции зданий и сооружений хорошо сопротивляются высокотемпературным воздействиям, но эти воздействия приводят к изменению прочностных и деформационных характеристик материала. Кроме того, для предварительно напряженных конструкций при огневых воздействиях может иметь место потеря предварительного напряжения, которое обеспечивает уменьшение ширины раскрытия трещин и прогиба несущих конструктивных элементов.

Материалы и методы. Приведены и проанализированы результаты аналитических расчетов несущей способности и эксплуатационной пригодности сборной железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты перекрытия до и после высокотемпературного огневого воздействия на нее. После воздействия пожара расчеты выполняются при полной потере арматурой предварительного напряжения. Температура прогрева бетона сжатой зоны и растянутой арматуры в расчетном поперечном сечении плиты перекрытия принимается по результатам экспериментальных исследований.

Результаты. Сравнение прогибов плиты перекрытия, полученных расчетным путем и экспериментально, свидетельствует о наличии дополнительных факторов (температурное расширение бетона и арматуры, высокотемпературная ползучесть арматуры), определяющих увеличенное значение экспериментального прогиба плиты перекрытия по сравнению с расчетным. Анализируется конструктивное решение плиты перекрытия, рассматривается целесообразность увеличения площади продольной растянутой арматуры для повышения несущей способности и уменьшения ширины раскрытия трещин в плите. Показано влияние огнезащиты на температуру прогрева бетона сжатой зоны и растянутой арматуры плиты.

Выводы. Сравнение результатов расчета плиты до огневого воздействия и после него показало, что высокотемпературное воздействие привело к потере предварительного напряжения и, как следствие, к значительному увеличению прогиба плиты. В то же время ширина раскрытия трещин увеличилась не столь значительно, так как на ее величину оказывает влияние процент армирования, который при конструировании плиты был увеличен. Несущая способность плиты изменилась незначительно вследствие малого изменения прочностных характеристик бетона и арматуры при достигнутой температуре прогрева материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетонные конструкции зданий, ребристая плита перекрытия, предварительное напряжение, экспериментальные и аналитические исследования, огневые воздействия, температура прогрева, прочностные и деформационные характеристики материалов, несущая способность, эксплуатационные характеристики конструкций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Малахова А.Н. Оценка несущей способности и эксплуатационной пригодности плиты перекрытия после высокотемпературного воздействия // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 194–202. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.194-202

Автор, ответственный за переписку: Анна Николаевна Малахова, MalahovaAN@mgsu.ru, malahov@gnext.ru.

Estimation of bearing capacity and serviceability of a floor slab after high-temperature exposure

Anna N. Malahova

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

ABSTRACT

Introduction. Reinforced concrete structures of buildings have significant fire resistance, but high-temperature effects lead to changes in strength and deformation characteristics of concrete and reinforcement of structures. In addition, for prestressed reinforced concrete structures, fire impacts can be associated with partial or even complete loss of prestress. At the same time, it is the prestress of the reinforcement that makes it possible to limit the width of the crack opening and the deflection of reinforced concrete structures within acceptable limits.

Materials and methods. The paper presents and analyzes the results of analytical calculations of the bearing capacity and serviceability of a prestressed reinforced concrete ribbed floor slab before and after high-temperature fire impact on it. After fire exposure, the calculations are carried out with a complete loss of pre-stressing by the reinforcement. The heating temperature of the concrete in the compressed zone and tension reinforcement in the calculated cross section of the floor slab is taken according to the results of experimental studies.

Results. The comparison of the floor slab deflections obtained by calculation and experimentally indicates the presence of additional factors (temperature expansion of concrete and reinforcement, high-temperature creep of reinforcement) that determine the increased value of the experimental floor slab deflection compared to the calculated one. The structural solution of the floor slab is analyzed, the feasibility of increasing the area of longitudinal tensile reinforcement to increase the bearing capacity and reduce the crack opening width in the slab is considered. The effect of fire protection on the heating temperature of the concrete in the compressed zone and the tensile reinforcement of the slab is shown.

Conclusions. An analysis of the results of calculating a prestressed concrete ribbed floor slab before and after a fire showed a slight decrease in its bearing capacity after fire impact, an increase in the width of the crack opening and a significant increase in the deflection of the slab.

KEYWORDS: reinforced concrete building structures, ribbed floor slab, prestress, experimental and analytical studies, fire effects, warm-up temperature, strength and deformation characteristics of materials, load bearing capacity, operational characteristics of structures

FOR CITATION: Malahova A.N. Estimation of bearing capacity and serviceability of a floor slab after high-temperature exposure. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):194-202. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.194-202 (rus.).

Corresponding author: Anna N. Malahova, MalahovaAN@mgsu.ru, malahov@gnext.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Железобетонные конструкции (ЖБК) по сравнению с металлическими или деревянными несущими конструкциями зданий лучшим образом сопротивляются огневым воздействиям, но и они после огневых воздействий могут частично или полностью потерять свою несущую способность и эксплуатационную пригодность, которые определяют возможность их дальнейшей эксплуатации.

Наиболее уязвимыми для огневых воздействий являются изгибаемые статически определимые, быстро прогреваемые из-за малой толщины составных элементов сборные ЖБК и особенно железобетонные конструкции или их элементы с предварительно напряженной арматурой. Рассмотренная в статье сборная железобетонная предварительно напряженная ребристая плита перекрытия относится именно к таким конструкциям.

Для уменьшения прогибов и ширины раскрытия трещин сборные ЖБК выполняются с предварительным напряжением, поэтому снижение или даже потеря его уровня в результате пожара оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики конструкций.

В СП 329.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила обследования после пожара», СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и ог-

несохранности» приведены рекомендации по определению остаточного уровня предварительного напряжения арматуры с учетом достигнутой степени температурного ее нагрева при пожаре.

Кроме того, нормативные требования касаются ограничения уровня нагрева напрягаемой арматуры до температуры не более 100 °С. Этот показатель исключает потерю арматурой предварительного напряжения и может быть достигнут с помощью конструктивных мероприятий. Для рассматриваемой плиты в качестве конструктивных мероприятий применены газобетонные вкладыши.

Если температура нагрева превышает 100 °С, то предварительное напряжение в арматуре начинает постепенно снижаться, при температуре 210–330 °С оно уменьшается, как это показано в табл. 1, до нуля.

Промежуточный уровень предварительного напряжения арматуры σ_{sp} можно рассчитать по эмпирической формуле:

$$\sigma_{sp} = a - b \cdot t_s,$$

где a, b определяются по табл. 2 и зависят от класса арматуры. При этом сборные конструкции должны быть изготовлены из бетона класса В30 и выше.

Многие научно-технические статьи последних лет посвящены экспериментальным и компьютерным исследованиям ЖБК зданий и сооружений на высокотемпературные воздействия пожара [1–3]. Воздействие пожара на предварительно напряжен-

Табл. 1. Утрата предварительного напряжения для арматуры различных классов

Table 1. Loss of prestress for reinforcement of different classes

Класс арматуры Reinforcement class	A600	A800	A1000	Bp1200–Bp1500, K1400, K1500
Температура утраты предварительного напряжения в арматуре, °С (свыше) Temperature of loss of prestress in reinforcement, °С (over)	210	220	350	330

Табл. 2. Значения коэффициентов a и b для различных классов арматуры

Table 2. Values of coefficients a and b for various classes of reinforcement

Класс арматуры Reinforcement class		A600	A800	A1000	Bp1200–Bp1500, K1400, K1500
Безразмерные коэффициенты Dimensionless coefficients	a	84	87	92	89
	b	0,4	0,39	0,36	0,27

ные ЖБК описывается в трудах [4–7]. При этом актуальным является добавление огневого воздействия при стандартном расчете пространственной модели «здание – основание».

Ценность экспериментальных исследований поведения ЖБК в условиях пожара возрастает при проведении испытаний не отдельных конструкций, а конструкций в составе фрагмента здания, так как в этом случае возможна оценка степени вовлеченности конструктивных элементов здания в работу в условиях высокотемпературных воздействий.

В работах [8–10] приводятся аналитические расчеты несущих конструкций зданий на огневые воздействия.

Для уменьшения температуры прогрева бетона и арматуры в научно-технической литературе рассматриваются различные огнезащитные материалы и покрытия [11, 12].

Исследователи отмечают, что повышение предела огнестойкости ЖБК может быть достигнуто за счет применения термостойких бетонов [13].

Изменение прочностных характеристик бетона при увеличении температуры огневого воздействия зависит от вида бетона, вида заполнителя и условий твердения бетона. Для строительных конструкций из бетона с гранитным заполнителем снижение прочности бетона на сжатие после пожара в соответствии с СП 13-102–2003 при последовательном увеличении температуры нагрева бетона свыше 200, 300, 400, 500 °С соответственно составляет 30, 40, 60, 70 %.

При этом, начиная с нагрева выше 300 °С, развивается процесс трещинообразования, с нагрева свыше 500 °С образуются глубокие трещины, а при нагреве свыше 700–800 °С возникают отколы бетона, обнажающие в ряде случаев арматуру. При нагреве бетона свыше 500 °С значение его прочности принимается равным нулю.

В публикации [14] приводится сравнение несущей способности колонн и плит перекрытия при применении класса бетона В20, В40, В50 с органоминеральными добавками. Показано, что увеличение класса бетона значительно влияет на несущую способность колонн, в то время как для плит потеря несущей способности определяется достижением рабочей арматурой критической температуры нагрева.

Существует связь между потерей несущей способности несущих ЖБК при пожаре с категорией их технического состояния до пожара [15, 16].

В работе [17] изложены результаты исследований физико-механических свойств современной арматуры, что позволяет использовать арматурный прокат различных классов прочности и способов производства с гарантированной огнестойкостью железобетонных конструкций. Показано [18], что если несущая способность железобетонных балок при их эксплуатации была снижена на 25 %, то первоначальное значение их огнестойкости будет снижено на 50 %. Предлагается добавить в нормы рекомендации по оценке огнестойкости строительных конструкций в зависимости от их технического состояния [19]. Изучается влияние высоких температур на надежность ЖБК [20].

Несущая способность строительной конструкции, как и ее деформационные и эксплуатационные характеристики, играет определяющую роль в решении вопроса о возможности ее дальнейшей эксплуатации. Однако в большинстве научных трудов, посвященных исследованию работы строительных конструкций в ходе высокотемпературного воздействия, как правило, рассматривается только определение предела огнестойкости конструкции и ее прогибов. Вопросы, связанные с изучением и расчетом остаточной несущей способности конструкции, подвергшейся огневому воздействию, оценка изменения ее деформационных и эксплуатационных характеристик часто оказываются за рамками научных исследований.

В настоящей работе выполнены расчеты несущей способности, ширины раскрытия трещин и прогибов сборной железобетонной предварительно напряженной плиты перекрытия до и после огневого воздействия на нее, а также приведено сравнение этих расчетов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки несущей способности и эксплуатационной пригодности ЖБК после пожара необходимо иметь сведения о температуре нагрева материалов в различных зонах конструкций, прочностных и деформационных характеристиках бетона и арматуры, соответствующих этому прогреву, а также владеть информацией об уровне предварительного напряжения арматуры и его потере после пожара.

Величина температурного прогрева бетона и арматуры различных зон исследуемой железобетонной конструкции может устанавливаться на ос-

новании теплотехнического расчета с помощью современных программных комплексов.

Для упрощенного теплотехнического расчета могут быть использованы изотермы прогрева типовых сечений ЖБК (плит, стенок, балок, колонн) при одно-, двух-, трех-, четырехстороннем нагреве в зависимости от длительности воздействия пожара, приведенные в СП 468.1325800.2019.

Могут проводиться для железобетонных элементов зданий лабораторные испытания на огневые воздействия с определением температуры прогрева бетона и арматуры. Для этого в различных зонах исследуемых конструкций устанавливаются термоэлектрические преобразователи (ТЭП).

С целью выполнения исследований, направленных на оценку несущей способности и эксплуатационной пригодности сборных ЖБК с предварительно напряженной арматурой, подвергнутых высокотемпературному воздействию, выбрана предварительно напряженная железобетонная ребристая плита перекрытия.

В качестве исходных данных для поверочного расчета сборной железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты перекрытия приняты результаты испытаний, проведенных в испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве НИУ МГСУ [21]. Экспериментально были определены температура нагрева отдельных зон указанной плиты перекрытия и изменение ее прогиба в ходе высокотемпературного воздействия.

Сборная железобетонная ребристая плита перекрытия имела следующие размеры: длина — 6260 мм, ширина — 2980, толщина — 180 мм. Плита опиралась на две короткие противоположные стороны. Расчетный пролет l_0 плиты перекрытия — 6,1 м.

Для плиты использован тяжелый бетон класса В40. Нижняя продольная ненапрягаемая арматура представлена шестью стержнями Ø16-A500 ($A_s =$

$= 12,06 \text{ см}^2$). Расстояние от нижней растянутой грани плиты до центра тяжести арматуры a составило 60 мм. Нижняя продольная напрягаемая арматура плиты — пятнадцать канатов Ø12-K1500 ($A_s = 13,59 \text{ см}^2$) при $a = 45 \text{ мм}$. Начальный уровень предварительного напряжения арматуры σ_{sp} при механическом способе натяжения составил 1040 МПа. Предварительное напряжение арматуры σ_{sp} с учетом всех потерь составило $1040 - 327,2 = 712,8 \text{ МПа}$, усилие обжатия $P = A_{sp} \cdot \sigma_{sp} = 13,59 \cdot 10^{-4} \cdot 712,8 \times 10^3 = 968,7 \text{ кН}$.

На рис. 1 приведены общий вид и схема армирования ребристой плиты перекрытия. Плита снабжена элементами огнезащиты (газобетонные вкладыши, класс по прочности на сжатие В2,5; марка по средней плотности D400), которые призваны уменьшить температуру прогрева бетона и арматуры и, как следствие, степень влияния огневого воздействия на прочностные характеристики бетона и арматуры, в том числе на уровень предварительного напряжения в арматуре.

При проведении экспериментов к плите прикладывалась нагрузка $7,0 \text{ кН/м}^2$. Расчетное значение нагрузки было принято $8,05 \text{ кН/м}^2$ при коэффициенте надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,15 \cdot (7,0 \cdot 1,15 = 8,05 \text{ кН/м}^2)$. Пониженное нормативное значение — $6,02 \text{ кН/м}^2$ при доле длительности $0,86 \times (7,0 \cdot 0,86 = 6,02 \text{ кН/м}^2)$.

При выполнении экспериментальных исследований образец подвергался равномерному нагреву по нижней поверхности на всей длине пролета. Максимальная температура нагрева арматуры при пожаре составила $360 \text{ }^\circ\text{C}$.

В ходе эксперимента температура нагрева бетона сжатой зоны и стержней рабочей продольной напрягаемой и ненапрягаемой арматуры определена с применением 12 ТЭП, размещенных в различных зонах плиты.



Рис. 1. Общий вид и схема армирования сборной предварительно напряженной железобетонной ребристой плиты перекрытия

Fig. 1. General view and reinforcement scheme of a prestressed reinforced concrete ribbed floor slab

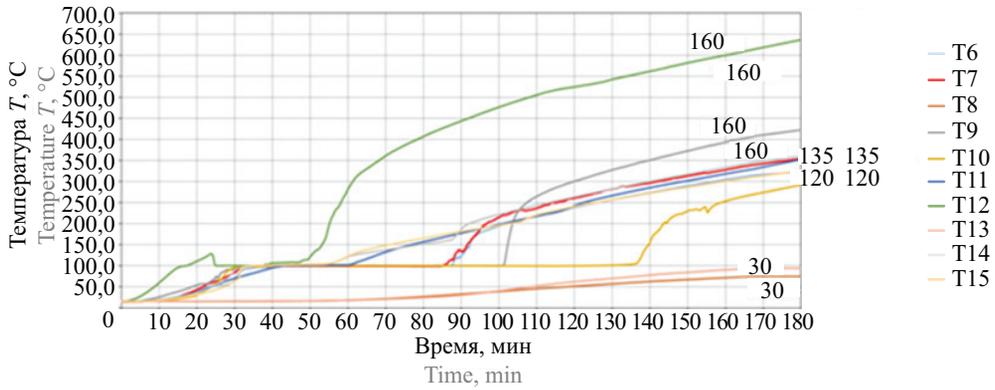


Рис. 2. График зависимости температуры, °С, бетона сжатой зоны лабораторного образца плиты (на глубине 30 мм от верхней поверхности плиты); температуры напрягаемой арматуры (на глубине 135 мм от верхней поверхности плиты) и ненапрягаемой (на глубине 120 мм от верхней поверхности плиты), а также бетона растянутой зоны (на глубине 160 мм) в зависимости от времени теплового воздействия, мин, при проведении эксперимента

Fig. 2. Graph of temperature dependence, °C, of the concrete in the compressed zone of the laboratory slab specimen (at a depth of 30 mm from the top surface of the slab); temperature of prestressed reinforcement (at a depth of 135 mm from the top surface of the slab) and non-tensioned reinforcement (at a depth of 120 mm from the top surface of the slab), as well as concrete of the tension zone (at a depth of 160 mm) depending on the time of thermal exposure, min, during the experiment

На рис. 2 представлен график зависимости температуры нагрева материалов плиты в местах расположения ТЭП в зависимости от времени теплового воздействия.

Сборная железобетонная предварительно напряженная ребристая плита является несущим элементом перекрытия в составе конструктивной системы крупнопанельного здания. В соответствии с СП 335.1325800.2017 «Крупнопанельные конструктивные системы. Правила проектирования» допускается выполнение расчета отдельно плиты перекрытия.

Расчетная схема плиты представляла собой статически определимую балку с двумя шарнирными опорами и равномерно распределенной нагрузкой. Значения расчетного, нормативного и нормативного длительного момента приняты следующие: $M = 111,6$ кНм, $M_n = 97,0$ кНм, $M_m = 83,4$ кНм.

Определение несущей способности, ширины раскрытия трещин и деформаций плиты перекрытия выполнены в соответствии с СП 63.13330.2018 «Бе-

тонные и железобетонные конструкции. Основные положения». При выполнении расчетов плиты после пожара прочностные и деформационные характеристики материалов, а также уровень предварительного напряжения арматуры принимались с учетом рекомендаций, приведенных в СП 329.1325800.2017.

В табл. 3 представлены коэффициенты, которые в зависимости от температуры прогрева бетона сжатой зоны и нижней продольной арматуры плиты должны вводиться к прочностным и деформационным характеристикам материалов.

Предварительное напряжение арматуры класса K1500 при температуре прогрева 330 °С считается утраченным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 4 приведены результаты расчета сборной железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты перекрытия до и после высокотем-

Табл. 3. Коэффициенты к прочностным и деформационным характеристикам материалов в зависимости от температуры прогрева сжатой зоны и нижней продольной арматуры плиты

Table 3. Coefficients for the strength and deformation characteristics of materials depending on the heating temperature of the compressed zone and the lower longitudinal reinforcement of the slab

Материалы для плиты перекрытия Materials for the floor slab	Бетон тяжелый класса В40 Heavy concrete class B40	Арматура класса А500 Reinforcement of class А500	Арматура класса К1500 Reinforcement of class K1500
Температура прогрева Warm-up temperature	100 °С	360 °С	360 °С
Коэффициенты к прочностным характеристикам Coefficients for strength characteristics	0,98	1,0	0,95
Коэффициенты к деформационным характеристикам Coefficients for deformation characteristics	0,85	0,99	0,84

Табл. 4. Результаты расчета сборной железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты перекрытия до и после высокотемпературного огневого воздействия

Table 4. The results of the calculation of a concrete prestressed ribbed floor slab before and after high-temperature fire exposure

Характеристики Characteristics	Несущая способность по моменту, кНм Load bearing capacity by moment, kNm	Ширина раскрытия трещин a_{crc} , мм Crack opening width a_{crc} , mm		Прогиб f , см Deflection f , cm
		кратковременная short-term	длительная long-term	
До пожара Before the fire	257,6	0	0	1,1
После пожара After the fire	243,4	0,35	0,28	12,5

пературного огневого воздействия на нее, в результате которого имели место уменьшение прочностных и деформационных характеристик бетона и арматуры и полная утрата предварительного напряжения нижней продольной арматуры класса K1500.

Анализ результатов расчетов плиты до и после пожара (табл. 4) показывает незначительное снижение ее несущей способности (на 5,5 %). При этом плита обладает значительным запасом прочности по несущей способности ($M = 243,4 \text{ кНм} < 111,6 \text{ кНм}$).

Увеличение ширины раскрытия трещин после пожара связано с полной утратой предварительного напряжения арматуры и уменьшением прочностных и деформационных характеристик материалов плиты. Как показано в табл. 4, трещины с шириной длительного и кратковременного раскрытия соответственно составляют: $a_{crc} = 0,28 \text{ мм} > 0,2 \text{ мм}$ и $a_{crc} = 0,35 \text{ мм} > 0,3 \text{ мм}$. Превышение допустимых значений ширины кратковременного и длительного раскрытия трещин соответственно — на 40 и 17 %.

Прогиб плиты f по расчету составил 12,5 см и существенно, в 4,2 раза, превысил предельно допустимое значение f_{lit} , равное 3,0 см.

Следует отметить, что, кроме прогиба плиты под нагрузкой, может иметь место дополнительный прогиб, связанный с температурным расширением бетона и арматуры у нижней нагреваемой поверхности плиты, а также с проявлением высокотемпературной ползучести арматуры.

Конструктивное решение исследуемой сборной железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты перекрытия было направлено на снижение температуры прогрева материалов плиты при возможном высокотемпературном воздействии пожара посредством установки в межреберном пространстве плиты огнезащиты в виде газобетонных вкладышей (класс по прочности на сжатие B2,5; марка по средней плотности D400). В ходе проведения эксперимента и после его завершения газобетонные вкладыши сохранили свое проектное положение и не получили видимых повреждений.

По результатам выполненного расчета плиты перекрытия можно сделать вывод, что увеличение

площади поперечного сечения нижней продольной арматуры при проектировании плиты оказало влияние на увеличение несущей способности по моменту в 2,3 раза, а после пожара несущая способность снизилась только на 5,5 %. Потеря предварительного напряжения арматуры сказалась на увеличении ширины раскрытия трещин, но, так как нижняя продольная арматура плиты была поставлена с запасом, это, в свою очередь, привело к уменьшению напряжения в арматуре и соответственно к уменьшению ширины раскрытия трещин. Поэтому окончательное превышение ширины раскрытия трещин против допустимого значения было не столь значительным. Прогиб плиты перекрытия после огневого воздействия оказался существенным, в 4,2 раза превышающим предельно допустимое значение, что связано с полной потерей предварительного напряжения в арматуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов расчета сборной железобетонной ребристой плиты перекрытия до и после пожара показало незначительное снижение ее несущей способности (на 5,5 %), увеличение ширины раскрытия трещин против допустимого (длительного раскрытия трещин — на 40 % и кратковременного раскрытия трещин — на 17 %), а также существенное (в 4,2 раза против допустимого) увеличение прогиба плиты перекрытия, что свидетельствует о сохранении несущей способности и снижении эксплуатационной пригодности плиты.

Размещение огнезащитных газобетонных вкладышей в межреберном пространстве плиты привело к снижению температуры нагрева материалов при пожаре, но не предотвратило потерю предварительного напряжения в арматуре.

Увеличение процента армирования при проектировании сборной железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты перекрытия позволяет при полной потере предварительного напряжения в арматуре плиты уменьшить ширину раскрытия трещин, но мало сказывается на прогибе плиты, который может стать основной причиной невозможности ее дальнейшей эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ефрюшин С.В., Юрьев В.В.* Численное моделирование огнестойкости железобетонной плиты с помощью программного комплекса ANSYS // *Строительная механика и конструкции*. 2019. № 4 (23). С. 86–92. EDN AQXAQL.
2. *Кудряшов В.А., Жамойдик С.М., Кураченко И.Ю., Неуен Т.К.* Результаты натурных огневых испытаний железобетонного монолитного перекрытия в составе экспериментального фрагмента каркасного здания // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2021. Т. 5. № 1. С. 49–66. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.49. EDN EODTXX.
3. *Мкртычев О.В., Сидоров Д.С.* Расчет железобетонного здания на температурные воздействия // *Вестник МГСУ*. 2012. № 5. С. 50–55.
4. *Полева И.И., Зайнудинова Н.В.* Огнестойкость изгибаемых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2018. Т. 2. № 2. С. 161–167. EDN XPAXHF.
5. *Полева И.И., Зайнудинова Н.В.* Моделирование поведения железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном в программном комплексе ANSYS // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2017. Т. 1. № 4. С. 385–391. EDN ZRKOZD.
6. *Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В.* Экспериментальные и аналитические исследования несущей способности большепролетных железобетонных балок при огневом воздействии // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. Т. 24. № 11. С. 31–38. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.31-38
7. *Ильин Н.А., Панфилов Д.А.* Особенности определения огнестойкости многопустотных предварительно напряженных железобетонных плит перекрытий зданий // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность* : сб. ст. 2017. С. 231–238. EDN YQLMID.
8. *Кудряшов В.А., Кураченко И.Ю.* Аналитическая оценка несущей способности изгибаемых железобетонных конструкций после пожара // *Судебная экспертиза Беларуси*. 2018. № 1 (6). С. 56–60. EDN NVKKDR.
9. *Зайцев А.М., Никулин А.В.* Анализ возможности эксплуатации железобетонных ферм после пожара // *Пожаровзрывобезопасность*. 2004. Т. 13. № 4. С. 66–71.
10. *Духов Д.Г., Клецунов Я.Я., Колгудаев А.Н.* Особенности обследования зданий после пожара // *Ceteris Paribus*. 2015. № 4. С. 21–26. EDN UNRXYN.
11. *Плотников Д.А., Баишова Т.С., Новиков Н.С.* Характер воздействия пожаров на элементы железобетонных конструкций и средства их огнезащиты // *Вестник Института гражданской защиты Донбасса*. 2016. № 1 (5). С. 14–21. EDN YTLEJC.
12. *Жувак О.В., Рыбаков В.А., Сергеева Ф.А.* Огнестойкость железобетонных конструкций с применением различных огнезащитных покрытий // *Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения* : мат. Всерос. науч.-техн. конф. 2021. С. 51–56. EDN QSSFJG.
13. *Левашов Н.Ф., Акулова М.В., Потемкина О.В., Соколова Ю.А.* Разработка аналитической модели потери прочности цементных композитов при воздействии повышенных температур // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 5. С. 104–111.
14. *Загоруйко Т.В., Леденев А.А., Мацюрак Б.К.* Определение огнестойкости железобетонных конструкций с учетом изменения свойств бетона // *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2018. № 1 (9). С. 143–145. EDN XSLVWP.
15. *Загоруйко Т.В., Леденев А.А., Перцев В.Т.* К вопросу огнестойкости железобетонных изделий и конструкций // *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2016. № 1–1 (7). С. 227–230. EDN WDHLND.
16. *Данилов Р.А.* Коррозия как фактор снижения огнестойкости железобетонных конструкций // *Проблемы техносферной безопасности* : мат. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. 2022. № 11. С. 137–141. EDN PXUPIH.
17. *Кузнецова И.С., Суриков И.Н., Востров М.С., Саврасов И.П.* Исследование физико-механических свойств арматуры современного производства при высокотемпературном нагреве и охлаждении // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 12. С. 18–23. EDN XISIXX.
18. *Приступок Д.Н., Фёдоров В.Ю., Данилов Р.А.* Исследование утраты огнестойкости эксплуатируемых железобетонных ригелей и балок // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2022. Т. 6. № 3. С. 278–293. DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-3.278. EDN AWIKFF.
19. *Ройтман В.М., Приступок Д.Н., Фёдоров В.Ю.* Метод оценки пределов огнестойкости железобетонных конструкций // *Ройтмановские чтения* : сб. мат. VII науч.-практ. конф. 2019. С. 34–38. EDN UDGUCI.
20. *Тамразян А.Г., Звонов Ю.Н.* К оценке надежности железобетонных плоских безбалочных плит перекрытий на продавливание при действии сосредоточенной силы в условиях высоких температур // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 7. С. 24–28. EDN WHKJTR.
21. *Портнов Ф.А., Ковалева С.А.* Состояние и перспективы развития вопроса оценки огнестойкости железобетонных конструкций // *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*. 2020. № 2 (54). С. 133–139. EDN BLEECI.

Поступила в редакцию 27 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 12 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 15 ноября 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Анна Николаевна Малахова** — кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0003-0203-0193; MalahovaAN@mgsu.ru, malahov@gnext.ru.

REFERENCES

1. Efrushin S.V., Yuriev V.V. Numerical modeling of fire resistance of reinforced concrete plate using ansys software complex. *Structural Mechanics and Structures*. 2019; 4(23):86-92. EDN AQXAQL. (rus.).
2. Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Kurachenko I.Yu., Nguen T.K. Results of full-scale fire tests of the monolithic reinforced concrete slab as part of a fragment of a frame building. *Vestnik of the University of Civil Protection of the MES of Belarus*. 2021; 5(1):49-66. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.49. EDN EODTXX. (rus.).
3. Mkrtychev O.V., Sidorov D.S. Calculation of a reinforced concrete building for temperature effects. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 5:50-55. (rus.).
4. Palevoda I., Zainudzinava N. Fire resistance of binding prestressed concrete slab with unbonded reinforcement. *Vestnik of the University of Civil Protection of the MES of Belarus*. 2018; 2(2):161-167. EDN XPAXHF. (rus.).
5. Palevoda I., Zainudzinava N. Modelling of the behavior of concrete slabs with unbonded reinforcement in the ANSYS program complex. *Vestnik of the University of Civil Protection of the MES of Belarus*. 2017; 1(4):385-391. EDN ZRKOZD. (rus.).
6. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Experimental and analytical studies of the bearing capacity long-span reinforced concrete during fire exposure. *Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(11):31-38. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.31-38 (rus.).
7. Ilyin N.A., Panfilov D.A. Features of determining the fire resistance of multi-hollow prestressed reinforced concrete floor slabs of buildings. Traditions and innovations in construction and architecture. *Natural sciences and technosphere safety*. 2017; 231-238. EDN YQLMID. (rus.).
8. Kudryashov V.A., Kurachenko I.Yu. Analytical evaluation of the load-bearing capacity of bendable reinforced concrete structures after fire. *Forensic Examination of Belarus*. 2018; 1(6):56-60. EDN NVKKDR. (rus.).
9. Zaitsev A.M., Nikulin A.V. Possible exploitation of reinforced forms after fire. *Fire and Explosion Safety*. 2004; 13(4):66-71. (rus.).
10. Dukhov D.G., Kleschunov Ya.Ya., Kolgudaev A.N. Peculiarities of surveying buildings after a fire. *Ceteris Paribus*. 2015; 4:21-26. EDN UNRXYH. (rus.).
11. Plotnikov D.A., Bashevaya T.S., Novikov N.S. Character of effect of fires on reinforced concrete structures and review existing fire protection means. *Bulletin of the Institute of Civil Protection of Donbass*. 2016; 1(5):14-21. EDN YTLEJC. (rus.).
12. Zhuvak O.V., Rybakov V.A., Sergeeva F.A. Fire resistance of reinforced concrete structures with the use of various fireproof coatings. *Problems of ensuring the functioning and development of ground infrastructure of weapon system complexes : materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2021; 51-56. EDN QSSFJG. (rus.).
13. Levashov N.F., Akulova M.V., Potemkina O.V., Sokolova Y.A. Analytical model of strength decreasing of cement composites exposed high temperatures. *Building and Reconstruction*. 2018; 5:104-111. (rus.).
14. Zagoruiko T.V., Ledenev A.A., Matsyurak B.K. Determination of the fire resistance of reinforced concrete structures, taking into account changes in the properties of concrete. *Modern technologies for ensuring civil defense and liquidation of consequences of emergency situations*. 2018; 1(9):143-145. EDN XSLVWP. (rus.).
15. Zagoruiko T.V., Ledenev A.A., Pertsev V.T. On the issue of fire resistance of reinforced concrete products and structures. *Modern technologies for civil defense and liquidation of consequences of emergency situations*. 2016; 1-1(7):227-230. EDN WDHLND. (rus.).
16. Danilov R.A. Corrosion as a factor of reducing the fire resistance of reinforced concrete structures. *Problems of technosphere safety : materials of the international scientific-practical conference of young scientists and specialists*. 2022; 11:137-141. EDN PXUPIH. (rus.).
17. Kuznecova I.S., Surikov I.N., Vostrov M.S., Savrasov I.P. Research in physical-mechanical properties of reinforcement of modern production at high temperatures of heating and cooling. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 12:18-23. EDN XISIYX. (rus.).
18. Pristupyuk D.N., Fedorov V.Yu., Danilov R.A. The study of the loss of fire resistance of the reinforced concrete crossbars and beams in operation. *Vestnik of the University of Civil Protection of the MES*

of Belarus. 2022; 6(3):278-293. DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-3.278. EDN AWIKFF. (rus.).

19. Roitman V.M., Pristupyuk D.N., Fedorov V.Yu. Method for assessing the fire resistance limits of reinforced concrete structures. *Roytman Readings : collection of materials of the VII scientific and practical conference*. 2019; 34-38. EDN UDGUI. (rus.).

20. Tamrazyan A.G., Zvonov Yu.N. To assessing the reliability reinforced concrete flat slabs for punching

under the action of concentrated force at high temperatures. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 7:24-28. EDN WHKJTR. (rus.).

21. Portnov F.A., Kovaleva S.A. State and prospects of development of the issue of evaluation of fire resistance of reinforced concrete structures. *Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*. 2020; 2(54):133-139. EDN BLEECI. (rus.).

Received August 27, 2023.

Adopted in revised form on November 12, 2023.

Approved for publication on November 15, 2023.

B I O N O T E S : **Anna N. Malahova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0203-0193; MalahovaAN@mgsu.ru, malahov@gnext.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.154

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.203-215

Оценка устойчивости грузоподъемных средств при разработке котлованов в стесненных условиях

Надежда Сергеевна Никитина, Николай Константинович Мельников

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Показаны необходимость и место задачи оценки устойчивости грузоподъемных средств при разработке котлованов в стесненных условиях, характерных для городских территорий с плотной городской застройкой при прокладке подземных транспортных объектов на примере открытого способа работ по сооружению Московского метрополитена.

Материалы и методы. В целях исследования влияния геотехнических параметров на устойчивость и безопасность работы подъемных средств большой грузоподъемности рассмотрены два участка на территории г. Москвы и различные грузоподъемные краны компании Liebherr; проведено численное моделирование для определения перемещений и деформаций при различном расположении грузоподъемного крана относительно ограждения котлована.

Результаты. С помощью численного моделирования с применением геотехнических программных комплексов PLAXIS 2D и PLAXIS 3D получены горизонтальные и вертикальные перемещения и общие деформации ограждения котлована, в том числе при использовании аэродромных гладких плит, а также при устройстве верхнего яруса распорной системы с использованием инвентарных плит 1,5 × 1,5 м.

Выводы. Вопрос аналитического расчета для ситуаций, которые могут возникать при решении практических задач, в частности при разработке проекта производства работ при установке подъемного средства вблизи котлована с ограждением, актуален. Особое и первостепенное влияние на результат расчета оказывают поверхностные слои грунтов (до 6 м). При установке подъемного средства в условиях насыпного грунта природного происхождения обязательна его замена на более твердый или укладка дополнительных бетонных плит большей площади, уменьшающих непосредственную нагрузку на грунт. В особых случаях, при применении тяжелых автокранов грузоподъемностью 250 т и более, при условии, что ограждение выполнено без распорной системы («консольного типа»), численное моделирование целесообразно проводить индивидуально.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геотехнические характеристики, грузоподъемный кран, инженерно-геологические условия, котлован, метрополитен, открытый способ работ, численное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никитина Н.С., Мельников Н.К. Оценка устойчивости грузоподъемных средств при разработке котлованов в стесненных условиях // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 203–215. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.203-215

Автор, ответственный за переписку: Надежда Сергеевна Никитина, nsnikitina@mail.ru.

Estimation of stability of lifting equipment during excavation of pits in cramped conditions

Nadezhda S. Nikitina, Nikolay K. Melnikov

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

ABSTRACT

Introduction. The paper illustrates the necessity and place of the problem of stability assessment of lifting devices applied for excavation in cramped conditions, which are typical for urban areas with dense urban development when laying underground transport facilities on the example of the open method of works on the construction of the Moscow Metro.

Materials and methods. Two sites on the territory of Moscow and different cranes of Liebherr company were considered in order to investigate the influence of geotechnical parameters on stability and safety of heavy lifting equipment. In addition, numerical modelling was carried out to determine displacements and deformations at different locations of the crane with respect to the excavation fence.

Results. Horizontal and vertical displacements and total deformations of the pit fence were obtained by means of numerical modelling with the use of geotechnical software systems PLAXIS 2D and PLAXIS 3D. Among other things, we analyzed the usage of PAG slabs, as well as construction of the top tier of the spacing system with the use of 1.5 × 1.5 m inventory slabs.

Conclusions. The relevant issue is an analytical calculation for situations that can arise in solving practical problems, in particular, in the development of the project of works for the installation of a lifting device near the pit with a fence. Surface layers of soils (up to 6 m) have a special and primary influence on the result of the calculation. If the lifting device is installed

in bulk soil of natural origin, it is mandatory to replace it with a harder soil or to lay additional concrete slabs with a larger area to reduce the direct load on the ground. In special cases, the numerical modelling should be performed separately for heavy truck cranes with a lifting capacity of 250 tons and more, provided that the guardrail is made without a spacing system ("cantilever type").

KEYWORDS: geotechnical characteristics, lifting crane, engineering and geological conditions, pit, underground, open method of works, numerical modelling

FOR CITATION: Nikitina N.S., Melnikov N.K. Estimation of stability of lifting equipment during excavation of pits in cramped conditions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):203-215. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.203-215 (rus.).

Corresponding author: Nadezhda S. Nikitina, nsnikitina@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Территория большого современного города простирается на сотни квадратных километров и тем не менее испытывает проблемы, обусловленные плотностью застройки, в том числе связанные с освоением подземного пространства, включая прокладку транспортных коммуникаций. Это отмечается во многих публикациях [1–6].

В плотно застроенных районах города, в наибольшей степени нуждающихся в прокладке подземных коммуникаций, часто приходится по разным причинам прибегать к открытым способам ведения строительных работ, что сопряжено с необходимостью принятия специфических конструктивно-технологических решений, среди которых обеспечение безопасности соседних зданий, сооружений и других объектов при устройстве котлованов¹ [7–9].

В настоящее время одним из вариантов разработки котлована под строительство метрополитена является открытый способ с помощью мощных подъемных сооружений и средств (ПС). Однако в технологии организации строительного производства безопасные способы перемещения землеройной техники по вертикали (в котлован и из него) слабо раскрыты и зачастую не могут быть применимы в условиях строительной площадки на плотно застроенной территории, нередко создавая угрозу расположенным поблизости зданиям и сооружениям [10, 11].

В связи с необходимостью проведения работ с участием ПС большой грузоподъемности актуален вопрос об их безопасной установке [12, 13]. В нормативных источниках не учитываются тип и конструктивные особенности ограждения котлована, реальные инженерно-геологические условия, стесняющие факторы и многое другое. В частности, речь должна идти о предотвращении обрушения грунтового массива, находящегося под воздействием передаваемых на опоры усилий с учетом конструктивных особенностей ограждающих конструкций стенок котлована по результатам математического моделирования и аналитических расчетов

по строительным нормам, включая напряженно-деформированное состояние (НДС) грунта при заданных нагрузках от опор грузоподъемного механизма и степень влияния типа конструктива ограждающих конструкций котлована.

Эти и другие вопросы рассмотрены в исследовании, проведенном в НИУ МГСУ и описываемом далее на примере котлована под строительство на одном из участков Московского метрополитена с устройством ограждения стенок способом «стена в грунте» (СВГ) при вертикальном нагружении грунтового массива.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В соответствии с п. 111 действующего приказа Ростехнадзора от 26.11.2020 № 461 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения»² краны стрелового типа, краны-манипуляторы, подъемники (вышки) на краю откоса котлована (канавы) должны быть установлены с соблюдением расстояний, указанных в Приложении № 1 к указанному нормативному документу. При глубине котлована более 5 м и невозможности соблюдения расстояний, указанных в табл. 1, откос должен быть укреплен согласно проекту производства работ (ППР).

Однако в больших городах с плотной застройкой не всегда есть площадь, достаточная под устройство откосов. Кроме того, сегодня практикуется разработка открытым способом и глубоких котлованов (более 5 м). В современной геотехнике эту задачу решают с помощью защиты стенок котлована разными конструкциями и способами.

Несмотря на широкое распространение технологии подъема землеройной техники с применением подъемных средств вблизи котлованов, на практике зачастую возникает вопрос о несущей способности ограждений.

¹ Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения: издание второе, дополненное и переработанное / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. М.: Изд-во АСВ, 2016. 1040 с.

² Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения»: приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 № 461.

Табл. 1. Минимальные расстояния от основания откоса котлована до оси ближайших опор крана при ненасыпном грунте, м

Table 1. Minimum distances from the base of the excavation slope to the axis of the nearest crane supports for unfilled soil, m

Глубина котлована, м Excavation depth, m	Грунт Soil				
	песчаный и гравийный sand and gravel	супесчаный sandy loam	суглинистый loamy	лессовый сухой loess dry	глинистый clay
1	1,5	1,25	1,00	1,0	1,00
2	3,0	2,40	2,00	2,0	1,50
3	4,0	3,60	3,25	2,5	1,75
4	5,0	4,40	4,00	3,0	3,00
5	6,0	5,30	4,75	3,5	3,50

Для анализа инженерно-геологических условий^{3, 4, 5, 6} [12–15] рассмотрены два участка в г. Москве. Один из них — в пос. Сосенское в Новомосковском административном округе. В геоморфологическом отношении изучаемая территория находится в пределах поверхности 3-й надпойменной террасы Москва-реки и ее притоков. Часть территории освоена (проложены коммуникации, временные дороги, установлены электрические подстанции). Поверхность относительно ровная. Абсолютные отметки поверхности обследуемой площадки изменяются от 149,40 до 148,30 м.

В геолого-литологическом строении принимают участие (сверху вниз): техногенные грунты (tQIV), аллювиально-флювиогляциальные отложения 3-й надпойменной террасы (a,f3QIIms), флювиогляциальные отложения сетунско-донского межледниковья (f,lqQIs-ds), отложения верхней средней юры (J2-3vd-er).

В геологическом отношении под асфальтобетонным покрытием, а в местах его отсутствия — с поверхности до глубины 1,0–5,9 м — площадка изысканий повсеместно перекрыта современными техногенными отложениями (tIV), представленными насыпными грунтами.

Насыпной грунт песчано-глинистого состава с включением строительного мусора — слежавшийся, влажный и водонасыщенный.

Мощность современных техногенных отложений в пределах площадки составляет 1,0–5,9 м.

³ ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 2013.

⁴ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия: утв. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. М., 2016. 104 с.

⁵ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений: утв. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. М., 2016. 220 с.

⁶ Автокраны Liebherr. Технические характеристики. URL: <https://kran-liebherr.ru/avtokrany-liebherr-tehnicheskie-harakteristiki/>

Насыпные грунты подвержены самоуплотнению, продолжительность которого зависит от гранулометрического состава и способа отсыпки. С учетом давности их образования насыпные грунты (ИГЭ-1) следует отнести к слежавшимся.

Специфические особенности насыпных грунтов включают:

- высокую пористость;
- малую прочность и большую сжимаемость с длительной консолидацией при уплотнении;
- существенное изменение деформационных и прочностных свойств при нарушении их естественного сложения, а также под воздействием динамических и статических нагрузок;
- анизотропию прочностных, деформационных и фильтрационных характеристик;
- повышенную агрессивность к бетонам и коррозионную агрессивность к металлическим конструкциям.

Под насыпными грунтами на глубине 1,0–5,9 м от уровня дневной поверхности на абсолютных высотных отметках порядка 124,60–135,60 м залегают верхнечетвертичные современные аллювиально-делювиальные (a,dIII–IV) отложения, представленные глинами. Глины серые, тугопластичной консистенции, с примесью органических веществ. Мощность отложений составляет 0,4–6,0 м.

К специфическим особенностям вышеперечисленных грунтов (ИГЭ-3) относятся:

- высокая пористость;
- малая несущая способность;
- большая изменчивость деформационных и прочностных свойств в массиве грунта;
- неравномерные осадки при уплотнении.

В рамках описываемого исследования получены численными методами оценки НДС массива грунта при взаимодействии с подъемными средствами в непосредственной близости от котлована.

Для моделирования было принято несколько типов ПС различной грузоподъемности, более подходящих для подъема специальной техники из котлована. Наиболее практичной задачей производи-

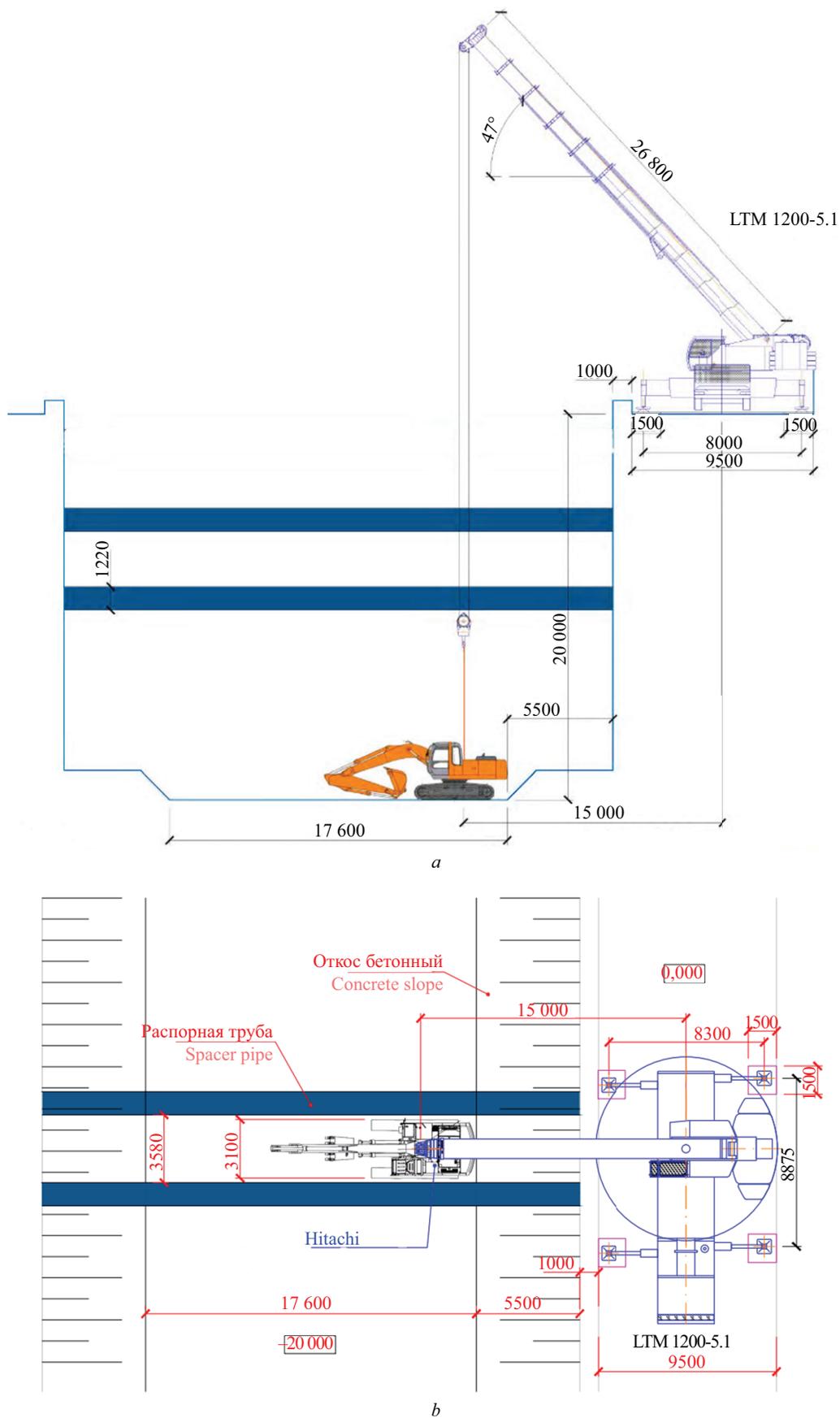


Рис. 1. Технологическая схема подъема экскаватора Hitachi ZX-330 с применением LTM1200-5.1: *a* — вид сбоку; *b* — вид сверху

Fig. 1. Technological scheme of Hitachi ZX-330 excavator lifting with application of LTM1200-5.1: *a* — side view; *b* — top view

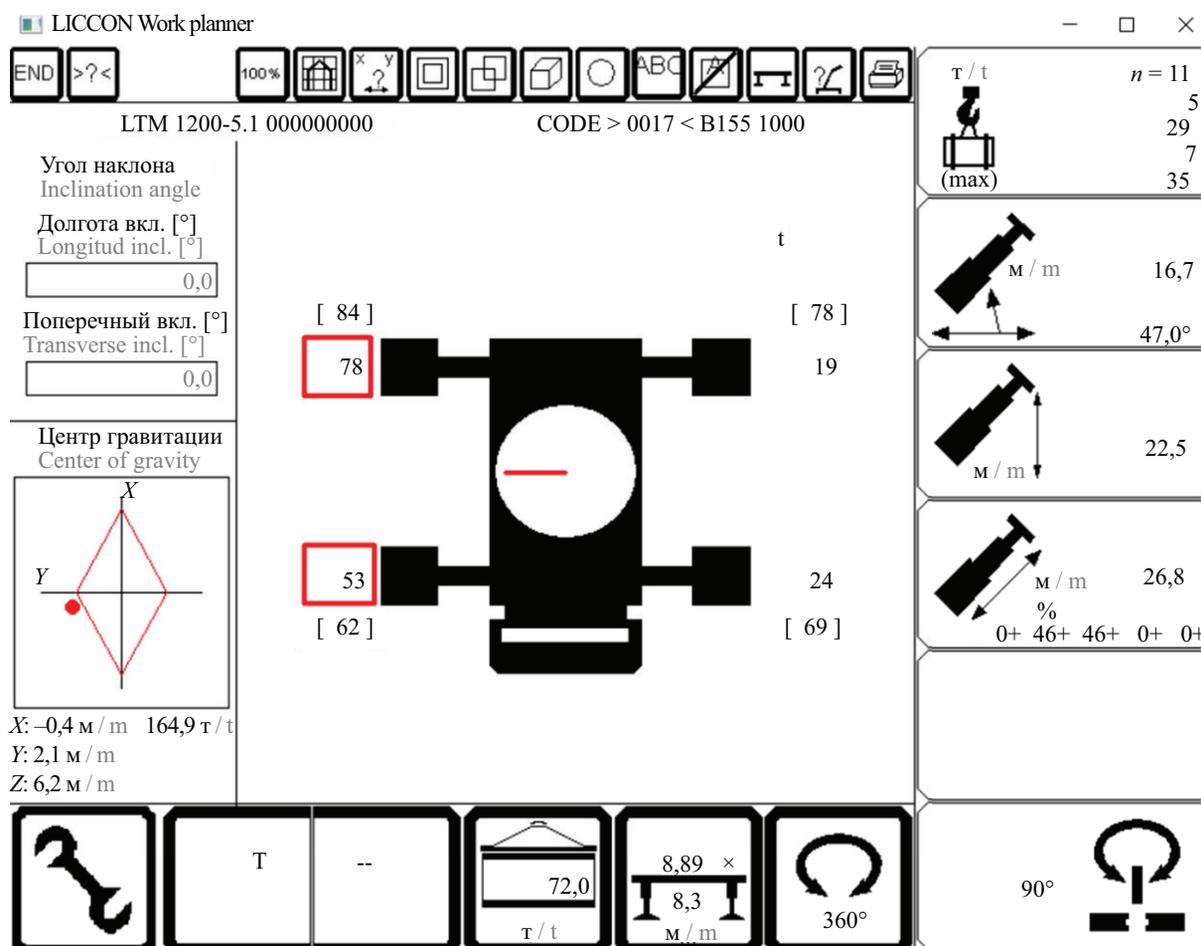


Рис. 2. Нагрузки, действующие на аутригеры автокрана

Fig. 2. Loads acting on truck crane outriggers

телей работ на стройплощадках г. Москвы, а также в других густонаселенных городах с развитым метростроением, в частности открытым способом, является подъем гусеничных экскаваторов общей массой 25–35 т. В зависимости от условий на площадке выбирают ПС необходимой грузоподъемности.

В ходе исследований проанализирован ряд ПС, наиболее подходящих для рассматриваемой ситуации:

- автокран грузоподъемностью 150 т (Liebherr LTM 1150-6.1);
- автокран грузоподъемностью 200 т (Liebherr LTM 1200-5.1);
- автокран грузоподъемностью 250 т (Liebherr LTM 1250-6.1)⁷.

При проектировании расчетной схемы определяли усилия от ПС с грузом, приходящиеся на плиту, опирающуюся на внешнюю часть грунтового массива.

Для обеспечения достоверности численных исследований выбран лицензионный программный комплекс (ПК) Liccon Work Planner.

⁷ Экскаваторы среднего класса. URL: <https://www.hitachicm.ru/produkcija/ekskovatory/ekskovatory-srednego-klassa/zx330-5a/>

В качестве исходных данных по инженерно-геологическим условиям для расчета принят описанный участок. Ограждение котлована выполнено методом СВГ из бетона марки В25 толщиной 600 мм с устройством распорных труб диаметром 625 мм, $t = 8$ мм в два яруса. Груз — экскаватор Hitachi ZX-3306 снаряженной массой 29 500 кг расположен в 5500 мм от края ограждения.

Ввиду ограниченных условий на площадке по размещению ПС по ширине 9500 мм было принято расположение, показанное на рис. 1. Соответственно, нагрузки от аутригера показаны на рис. 2.

Немаловажным фактором служит размер подкладок под силовые опоры автокрана (аутригеры). В зависимости от модели автокрана в комплектации представлены инвентарные металлические подкладки размерами 1,0 × 1,0 ... 2,5 × 2,5 м и толщиной 200–350 мм. В описываемом исследовании приняты подкладки габаритами 1500 × 1500 × 250 мм.

Для математического моделирования задачи под воздействие распределенной нагрузки на бровку котлована в процессе испытания проводились с помощью геотехнических ПК PLAXIS 2D по схеме, представленной на рис. 3.



Рис. 3. Этапы исследования

Fig. 3. Stages of the study

Принципиальная схема для численного исследования приведена на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью ПК PLAXIS 2D получены горизонтальные (рис. 5), вертикальные перемещения (рис. 6) и общие деформации (рис. 7).

В результате моделирования выявлено, что при работе описанной системы с участием ПС образуются горизонтальные и вертикальные деформации массива грунта, вследствие чего одна из выносных опор теряет устойчивость и вызывает перемещения на 500 мм. Установка крана возможна на площадке с уклоном не более 5 % (3°). Следовательно, в данном случае максимально возможное отклонение одной из выносной опоры составит не более 400 мм.

Для обеспечения устойчивости ПС потребуется увеличение площади опоры установкой бетонных аэродромных гладких плит (ПАГ) с габаритами 6000 × 2000 × 140 мм под инвентарные подкладки 1500 × 1500 × 250 мм. Тогда картина деформаций изменится (рис. 8).

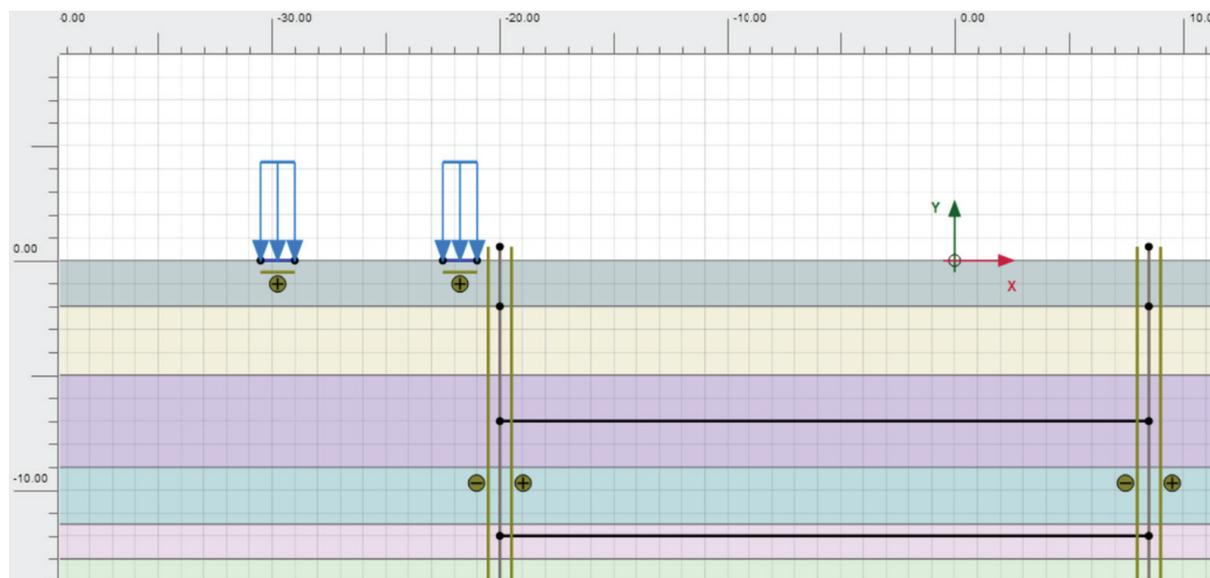


Рис. 4. Расчетная схема для исследования с помощью программного комплекса PLAXIS 2D применения подъемных средств при разработке котлована

Fig. 4. Calculation scheme for the study of lifting devices application during excavation using the PLAXIS 2D software package

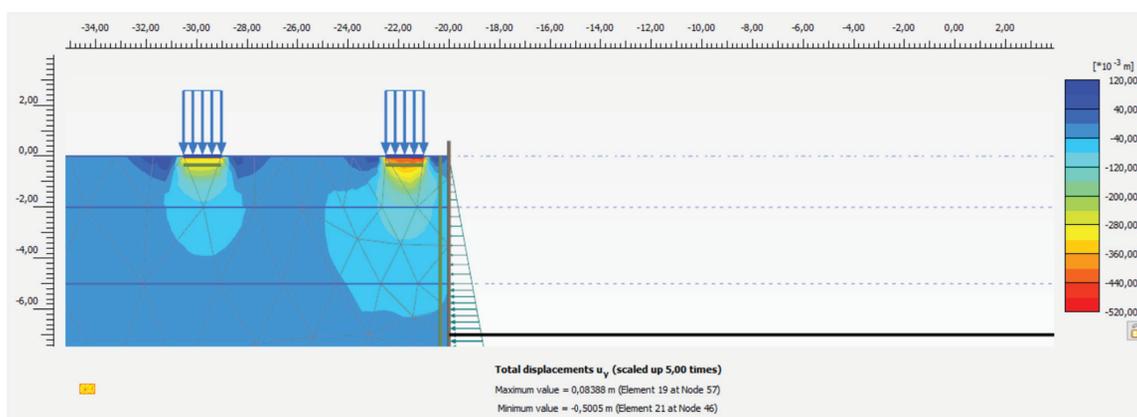


Рис. 5. Эпюра вертикальных перемещений

Fig. 5. Vertical displacement diagram

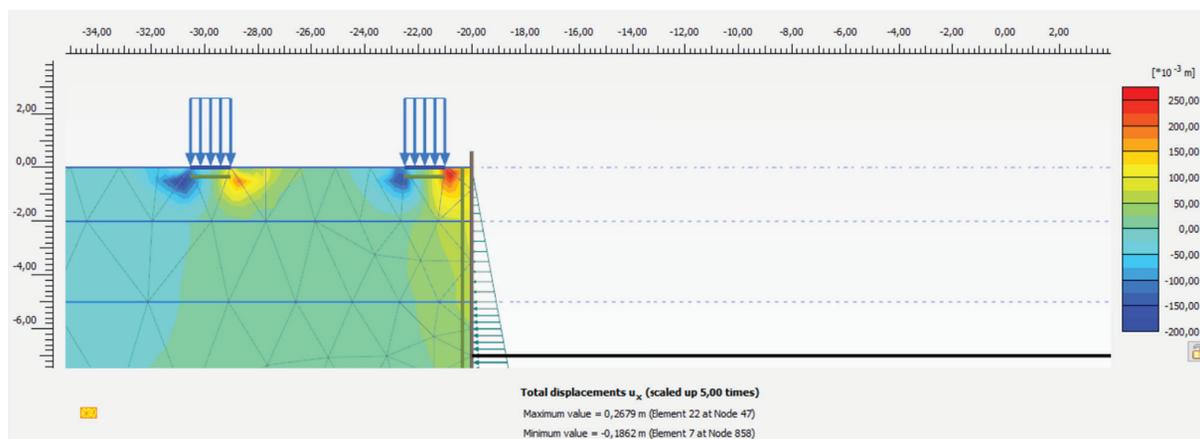


Рис. 6. Эпюра горизонтальных перемещений

Fig. 6. Horizontal displacement diagram

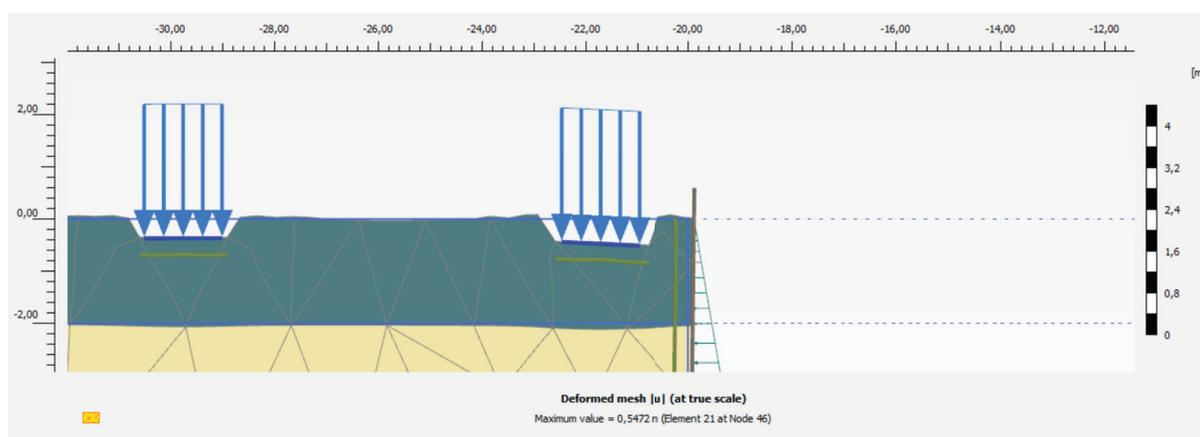


Рис. 7. Эпюра общих деформаций

Fig. 7. Total deformation diagram

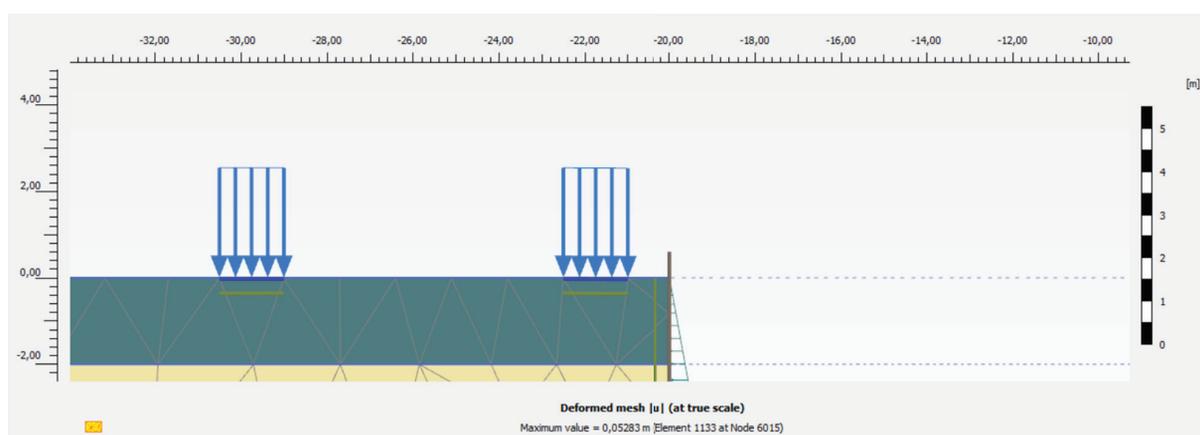
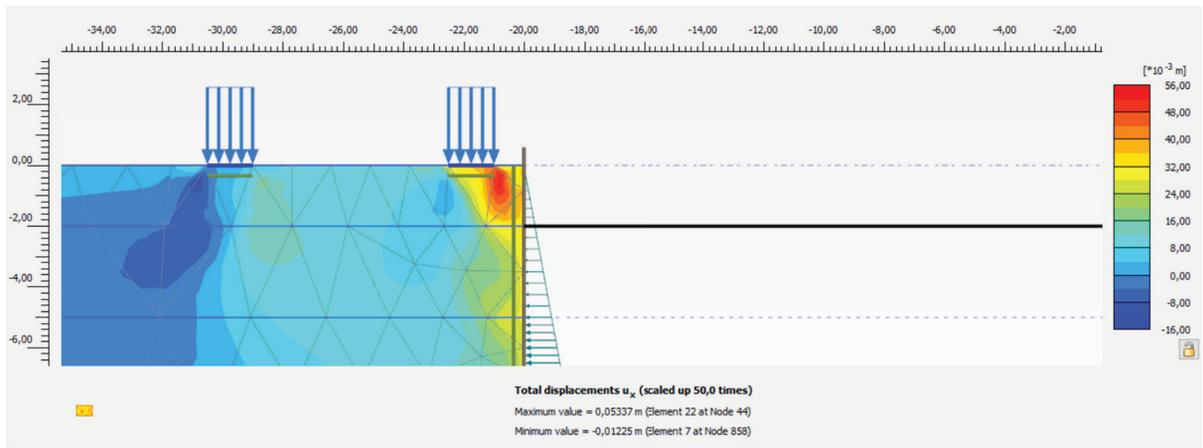


Рис. 8. Эпюра общих деформаций при использовании ПАГ

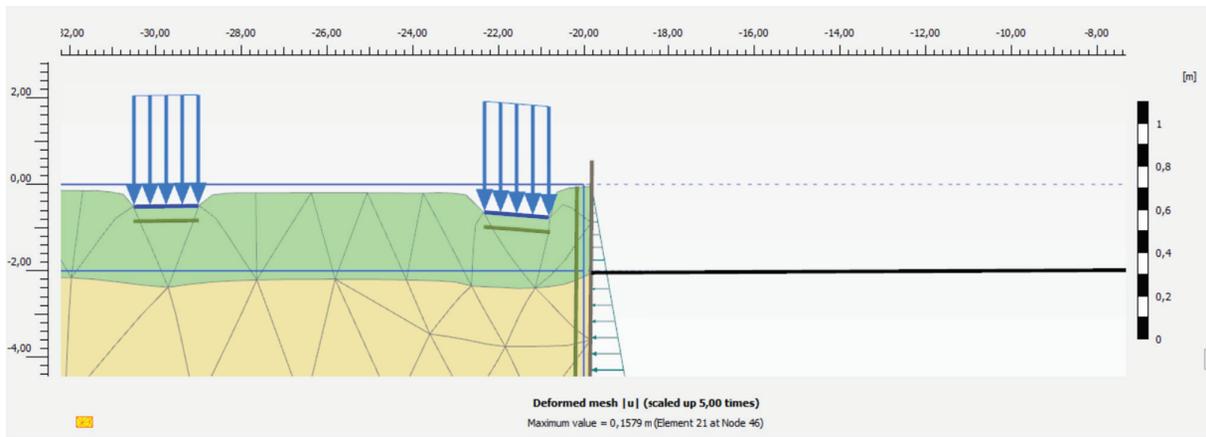
Fig. 8. Total deformation diagram for the use of PAG slabs

Ввиду распределения нагрузки, равной 78 т, на жесткую плиту 6×2 м максимальная деформация массива под выносной опорой уменьшилась до 50 мм, однако на практике не всегда имеется возможность установки дополнительных бетонных плит. В случае их отсутствия обязательным мероприятием

является подготовка площадки под установку крана посредством замены верхнего слоя насыпного грунта на более плотный, имеющий более высокий модуль деформации. Например, это может быть песок средней крупности с обязательным послойным уплотнением. Коэффициент уплотнения — не менее 0,95.



a



b

Рис. 9. Эпюры горизонтальных перемещений (a) и общих деформаций (b) при устройстве верхнего яруса распорной системы с использованием инвентарных плит $1,5 \times 1,5$ м

Fig. 9. The diagram of horizontal displacements (a) and total deformation diagram (b) during the construction of the top tier of the spacing system using inventory slabs 1.5×1.5 m

Табл. 2. Рекомендации по минимальному безопасному расстоянию при установке ПС вблизи котлованов с устройством ограждения «консольного типа» («стена в грунте», забирка между металлических труб, шпунт Ларсена)

Table 2. Recommendations on the minimum safety distance for installation of the lifting device near excavations with “cantilever type” fencing (“slurry wall”, barrier between metal pipes, Larssen sheet pile)

Минимальное расстояние от края ограждения до оси приложения нагрузки, м Minimum distance from the edge of the fence to the axis of load application, m	Самоходный автокран грузоподъемностью, т Mobile truck crane with lifting capacity, tons		
	100	150	200
На насыпном грунте при использовании ПАГ On bulk soil when using PAG slabs	1,5	1,5	1,5
На подготовленной площадке при использовании инвентарных подкладок On the prepared site using inventory pads	4,0	4,0	5,0

Кроме того, немаловажным фактором служит расстояние от опор до края ограждения котлована. В зависимости от технических характеристик ПС указанное расстояние выбирается индивидуально в зависимости от каждого конкретного случая. Однако зачастую площадка в стесненных условиях имеет ограниченное пространство. В этом случае

необходим анализ, учитывающий несущую способность стенок котлована. По результатам исследования при близком расположении вертикальной нагрузки к краю ограждения, не имеющего верхнего яруса на уровне 2–4 м, возникают большие горизонтальные деформации массива, ведущие к обрушению стенок котлована. Тогда требуется усиление

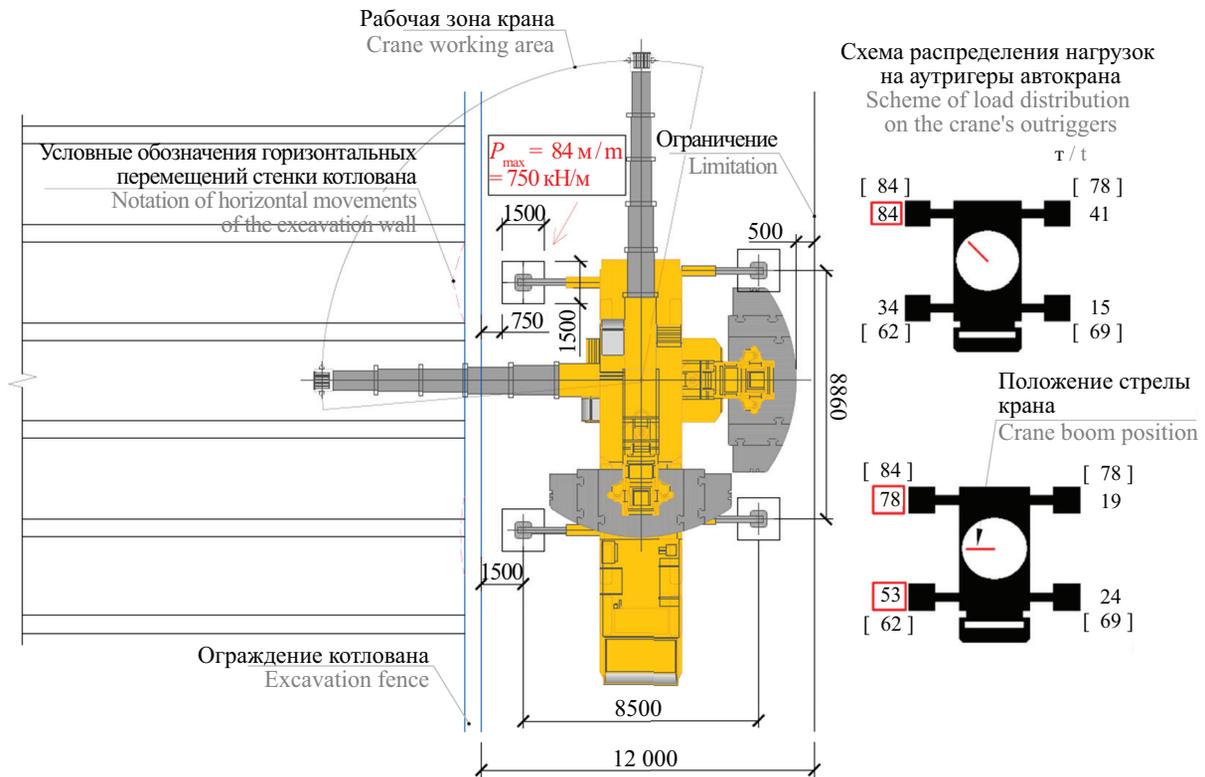


Рис. 10. Схема размещения ПС относительно распорных труб. Вид сверху

Fig. 10. Layout of the lifting device with respect to the spacing pipes. Top view

верхней части ограждения с помощью дополнительных распорных труб.

При устройстве верхнего яруса распорных труб горизонтальные смещения (рис. 9, а) существенно уменьшаются (до 50 мм) и не влияют на устойчивость ПС в рабочем положении (рис. 9, б).

Расчеты для двух площадок на территории г. Москвы показали, что большее влияние на ре-

зультат расчета устойчивости ПС вблизи котлованов оказывают поверхностные слои грунтов, а нижележащие слои важны для проектирования непосредственно ограждения котлована, а не решения задачи.

Результаты 2D-моделирования свидетельствуют, что установка ПС грузоподъемностью 100–200 т и более вблизи котлованов с ограждением «консольного типа» на неподготовленной площадке не допускается ввиду больших горизонтальных напряжений со стороны грунтового массива. Решением такой задачи является укрепление откоса или смещение ПС на безопасное расстояние (табл. 2).

Расположение ПС близ прилегающего опорного контура также влияет и на существующее запроектированное положение распорных труб котлована. Для моделирования этой задачи с помощью ПК PLAXIS 3D, позволяющего рассматривать пространственную задачу, в качестве исходных данных (стесненные условия, инженерно-геологические характеристики, параметры ограждения котлована, нагрузки от ПС) приняты уже описанные ранее.

Для решения новой задачи разместим один из аутригеров крана между распорными трубами (рис. 10). Исследуем, насколько изменится момент, действующий на ограждение, относительно соседнего и насколько критично такое расположение спецтехники.

Модель и расчетная схема показаны на рис. 11.

Результаты численных расчетов приведены на рис. 12.

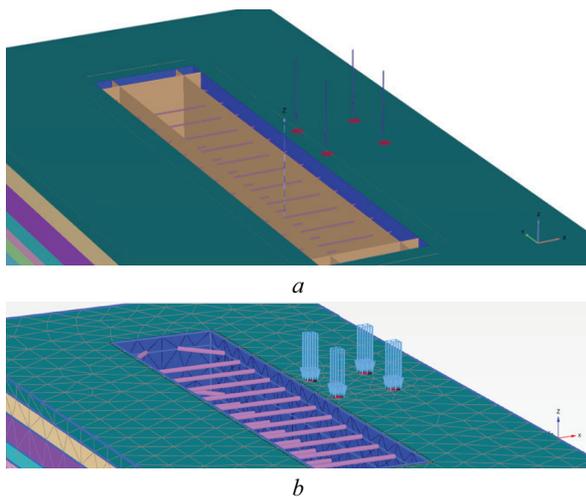


Рис. 11. Общий вид модели в PLAXIS 3D (а) и общая расчетная схема (б) в виде конечно-элементной сетки

Fig. 11. General view of the model in PLAXIS 3D (a) and general calculation scheme (b) in the form of finite element mesh

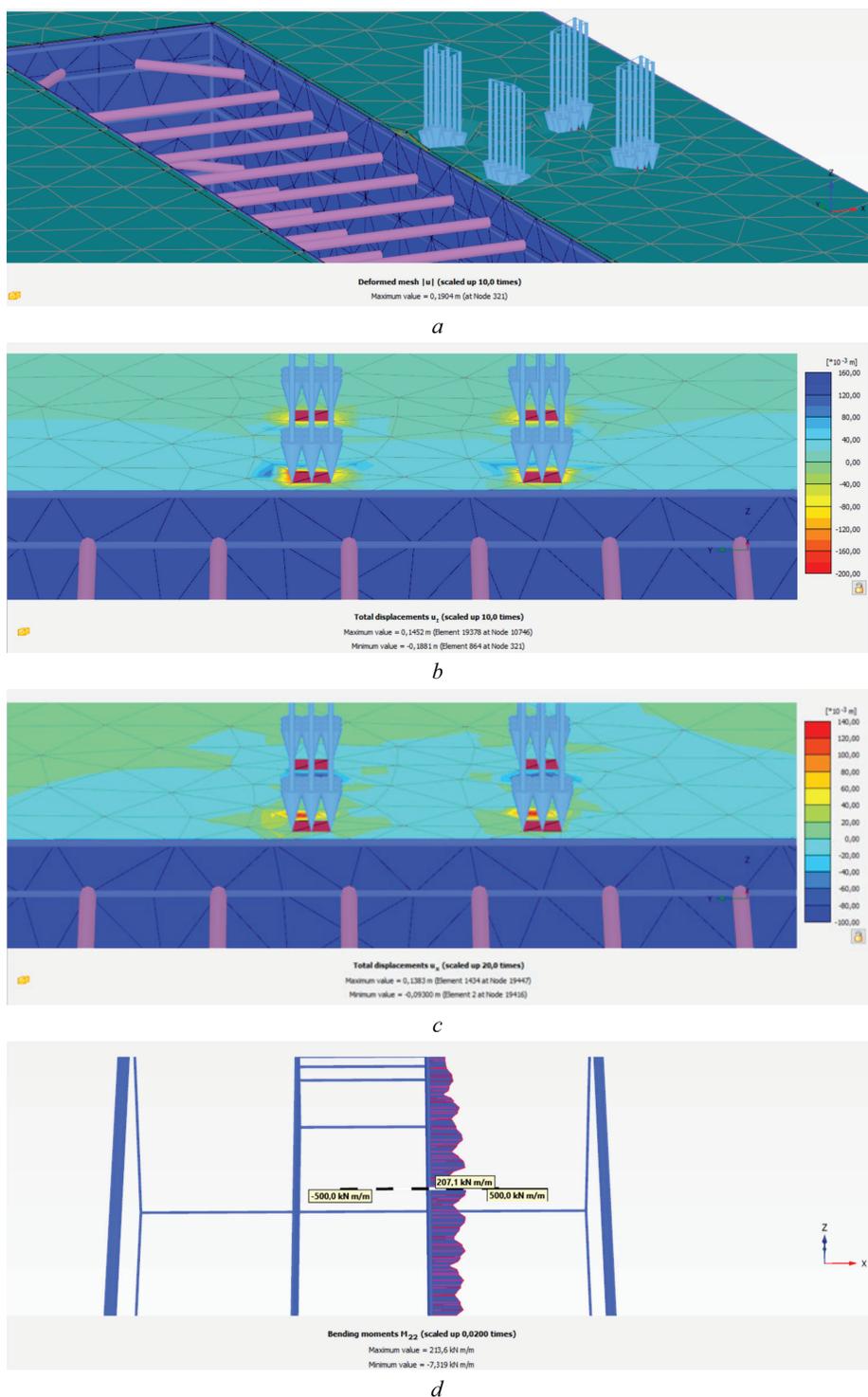


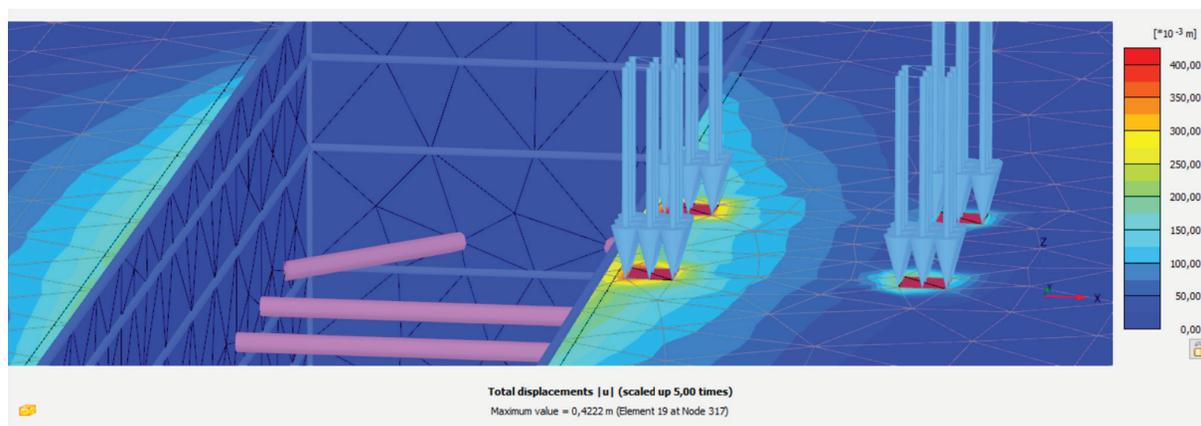
Рис. 12. Результаты численных расчетов: *a* — максимальное перемещение 19 см; *b* — изополя вертикальных перемещений массива грунта при полном нагружении 750 кН; *c* — изополя горизонтальных перемещений; *d* — изгибающий момент ограждения котлована («стена в грунте» $t = 400$ мм) в зоне нагружения

Fig. 12. Results of numerical calculations: *a* — maximum displacement of 19 cm; *b* — isopoles of vertical displacements of the soil mass at total loading of 750 kN; *c* — the same horizontal displacements; *d* — bending moment of the excavation enclosure (“slurry wall” $t = 400$ mm) in the loading zone

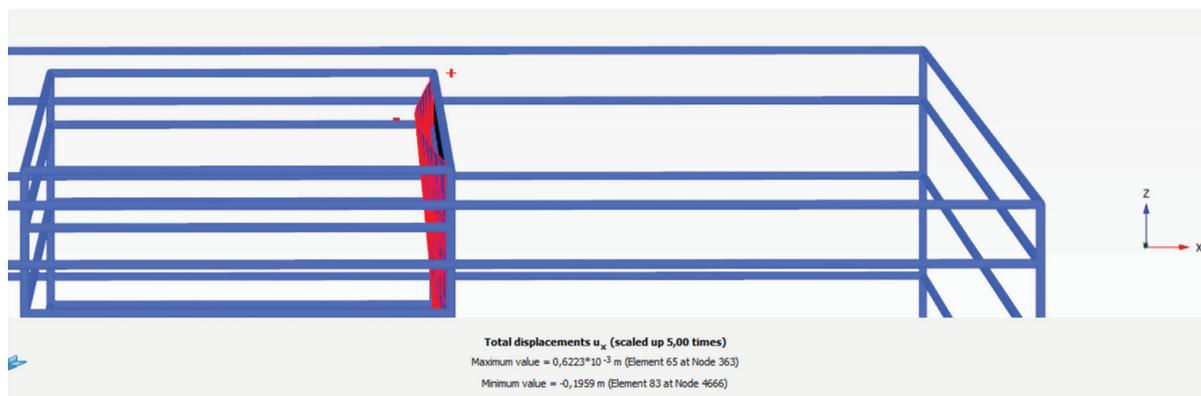
При установке ПС грузоподъемностью до 200 т вблизи ограждений котлована, выполненных толщиной 400 мм, марка бетона В30; при устройстве распорной системы из стальных труб сечением $420 \times 8 \dots 630 \times 8$ мм (в ходе исследований были смо-

делированы несколько типов) выбор расположения силовых опор относительно труб не имеет значения.

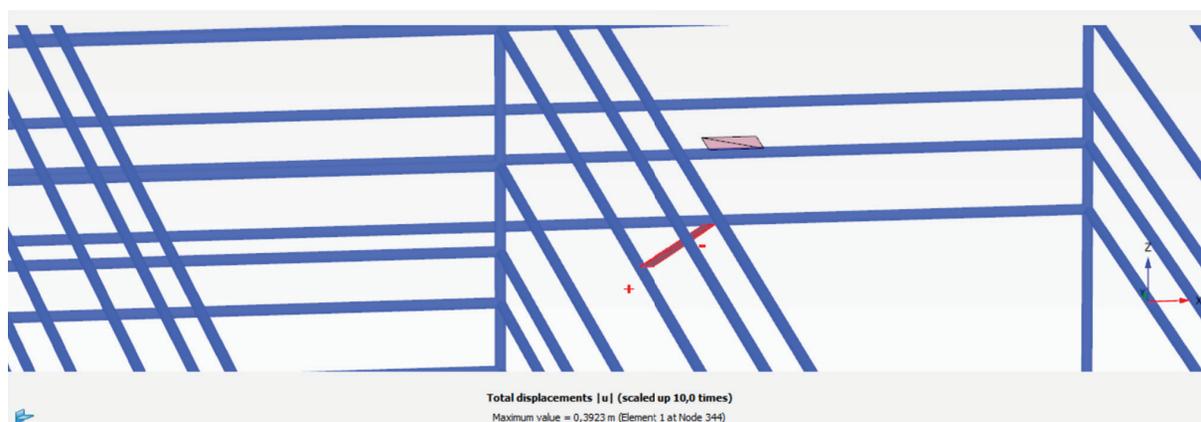
Полученные результаты показывают, что при нагружении с внешней стороны бровки котлована горизонтальные перемещения не критические и меньше вер-



a



b



c

Рис. 13. Результаты численного моделирования для нагружения краном LTM 1250-6.1, нагрузка 970 кН: *a* — изополя общих перемещений; *b* — горизонтальные перемещения ограждения котлована $U_{x(max)} = 19,6$ см; *c* — полное перемещение нагруженной плиты $U_{(x(max))} = 39,2$ см

Fig. 13. Results of numerical modelling for loading by crane LTM 1250-6.1, load 970 kN: *a* — isopotles of total displacements; *b* — horizontal displacements of the excavation fence $U_{x(max)} = 19.6$ cm; *c* — total displacement of the loaded slab $U_{(x(max))} = 39.2$ cm

тикальных. Следовательно, ограждение, не имеющее дополнительный ярус жесткости, обладает необходимой несущей способностью, достаточной для исключения обрушения. Однако для уменьшения вертикальных перемещений до 50–100 мм рекомендуется:

- использовать плиты ПАГ, увеличивающие площадь опирания в 5–6 раз и, соответственно, уменьшающие точечную нагрузку;

- заменять насыпной, рыхлый грунт, имеющий плохие прочностные показатели, на более твердый грунт, с обязательным послойным уплотнением с коэффициентом не менее 0,95.

Для определения критических показателей, при которых расположение ПС недопустимо, исследуем ПС грузоподъемностью 250 т и более. Расположение инвентарных подкладок крана сместим

на расстояние 1,0 м от края ограждения. Результаты расчетов показаны на рис. 13.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенных теоретических исследований и анализа результатов численного расчета, выполненного в геотехнических ПК PLAXIS 2D и PLAXIS 3D соответственно в двухмерной и пространственной постановках, вытекают следующие основные выводы:

- ввиду отсутствия в нормативных источниках рекомендаций по установке ПС вблизи котлована с ограждением актуален вопрос аналитического расчета для ситуаций, которые могут возникать при решении практических задач, в частности при разработке проекта производства работ;

- при проектировании нулевого цикла особое внимание необходимо уделять проработке условий на площадке в зоне котлована;

- особое и первостепенное влияние на результат расчета оказывают поверхностные слои грунтов (до 6 м). При установке ПС в условиях насыпного грунта природного происхождения обязательна его замена на более твердый или укладка дополнительных бетонных плит большей площади, уменьшающих непосредственную нагрузку на грунт;

- в особых случаях, при применении тяжелых автокранов грузоподъемностью 250 т и более, при условии, что ограждение выполнено без распорной системы («консольного типа»), проведение численного моделирования выполняется индивидуально.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голубев Г.Е. Метрополитены и город // Подземное пространство мира. 1995. № 2. С. 21–22.

2. Зерцалов М.Г., Конюхов Д.С., Меркин В.Е. Комплексное освоение подземного пространства. М. : Изд-во АСВ, 2015.

3. Конюхов Д.С. Основные принципы комплексного освоения подземного пространства при реновации жилой застройки Москвы // Метро и тоннели. 2019. № 2. С. 38–40. EDN HRVIXW.

4. Конюхов Д.С., Андреев А.А., Вдовин А.А., Петунина Д.С. Освоение подземного пространства — как решение градостроительных проблем // Метро и тоннели. 2017. № 3–4. С. 2–5. EDN ZJTGQJ.

5. Admiral H., Cornado A. Dankable and investment-ready underground space developments // 16th World Conference of the Associated Research Centers for the Urban Underground Space (ACUUS 2018). 2018.

6. Tang H., Behbahani S.S., Iseley T. Utility tunnelling: A solution for managing the urban underground space in China // ITA — AITES World Tunnel Congress, 21–26 April 2018. 2018. Pp. 348–354.

7. Конюхов Д.С. Критериальный анализ современных технологий подземного строительства // Геотехника. 2021. Т. 13. № 1. С. 40–55. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-40-54. EDN QGZRZK.

8. Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства. М. : Изд-во АСВ, 2017. 160 с.

9. Мангушев Р.А., Никифорова Н.С., Конюшков В.В., Осокин А.И., Сатин Д.А. Проектирование

и устройство подземных сооружений в открытых котлованах. М. : Изд-во АСВ, 2017. 256 с.

10. Atzl G. Challenges and solutions for large scale tunnelling in urban environment // Proceeding of the World Tunnel Congress 2017. Surface challenges — Underground solutions. 2017.

11. Perminov N., Perminov A. Geotechnical protection of engineering infrastructure objects in large cities under intense anthropogenic impact and long term operation // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 455–460. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.720. EDN WIJHUR.

12. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А., Конюхов Д.С. Исследование влияния разработки котлована на окружающую застройку // Вестник МГСУ. 2014. № 6. С. 77–86. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.6.77-86

13. Пачурин Г.В., Филиппов А.А., Шевченко С.М. Организация безопасной эксплуатации подъемных сооружений на строительном предприятии // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-прак. конф. 2018. С. 73–77. EDN YRIXLC.

14. Эпов Д.А. Использование приборов и устройств безопасности на подъемных сооружениях // Вестник современных исследований. 2021. № 3–5 (41). С. 12–15. EDN LUJGBD.

15. Yang T., Sun N., Chen H., Fang Y. Motion trajectory-based transportation control for 3-D boom cranes: Analysis, design, and experiments // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. Vol. 66. Issue 5. Pp. 3636–3646. DOI: 10.1109/tie.2018.2853604

Поступила в редакцию 7 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 28 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 26 ноября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Надежда Сергеевна Никитина — кандидат технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; Национальный исследовательский Московский государственный строитель-

ный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1138117; ORCID: 0000-0002-8309-8511; nsnikitina@mail.ru;

Николай Константинович Мельников — магистрант кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; k.wethepeople@yandex.ru.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

REFERENCES

1. Golubev G.E. *Metropolitans and the City. Underground Space of the World*. 1995; 2:21-22. (rus.).
2. Zertsalov M.G., Konyukhov D.S., Merkin V.E. *Comprehensive Development of Underground Space*. Moscow, ASV Publishing House, 2015. (rus.).
3. Konyukhov D.S. Basic principles of comprehensive development of underground space in the renovation of residential areas in Moscow. *Metro and Tunnels*. 2019; 2:38-40. EDN HRVIXW. (rus.).
4. Konyukhov D.S., Andreev A.A., Vdovin A.A., Petunina D.S. Development of Underground Space as a Solution to Urban Planning Problems. *Metro and Tunnels*. 2017; 3-4:2-5. EDN ZJTGQJ. (rus.).
5. Admiral H., Coronado A. Dankable and investment-ready underground space developments. *16th World Conference of the Associated Research Centers for the Urban Underground Space (ACUUS 2018)*. 2018.
6. Tang H., Behbahani S.S., Iseley T. Utility tunnelling: A solution for managing the urban underground space in China. *ITA — AITES World Tunnel Congress, 21–26 April 2018*. 2018; 348-354.
7. Konyukhov D.S. *Criteria analysis of contemporary technologies of underground construction. Geotechnics*. 2021; 13(1):40-55. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-40-54. EDN QGZRZK. (rus.).
8. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. *Technological Settlements of Buildings and Structures in the Zone of Influence of Underground Construction*. Moscow, ASV Publishing House, 2017; 160. (rus.).
9. Mangushev R.A., Nikiforova N.S., Konyushkov V.V., Osokin A.I., Sapin D.A. *Design and Construction of Underground Structures in Open Excavations*. Moscow, ASV Publishing House, 2017; 256. (rus.).
10. Atzl G. Challenges and solutions for large scale tunnelling in urban environment. *Proceeding of the World Tunnel Congress 2017. Surface challenges — Underground solutions*. 2017.
11. Perminov N., Perminov A. Geotechnical protection of engineering infrastructure objects in large cities under intense anthropogenic impact and long term operation. *Procedia Engineering*. 2016; 165:455-460. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.720. EDN WIJHUR.
12. Zertsalov M.G., Kazachenko S.A., Konyukhov D.S. Investigation of foundation pit excavation influence on adjacent buildings. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 6:77-86. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.6.77-86 (rus.).
13. Pachurin G.V., Filippov A.A., Shevchenko S.M. Organization of safe operation of lifting structures at a construction enterprise. *Current Issues of Technical Sciences in Modern Conditions : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2018; 73-77. EDN YRIXLC. (rus.).
14. Eпов D.A. Use of safety devices and devices on lifting structures. *Bulletin of Modern Research*. 2021; 3-5(41):12-15. EDN LUJGBD. (rus.).
15. Yang T., Sun N., Chen H., Fang Y. Motion trajectory-based transportation control for 3-D boom cranes: Analysis, design, and experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019; 66(5):3636-3646. DOI: 10.1109/tie.2018.2853604. (rus.).

Received September 7, 2023.

Adopted in revised form on September 28, 2023.

Approved for publication on November 26, 2023.

B I O N O T E S: **Nadezhda S. Nikitina** — Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1138117, ORCID: 0000-0002-8309-8511; nsnikitina@mail.ru;

Nikolay K. Melnikov — master's student of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; k.wethepeople@yandex.ru.

*Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве

Александр Сергеевич Иноземцев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Выполнен анализ научных трудов, посвященных разработке и исследованию строительных материалов, изделий и конструкций в технологии 3D-печати. Целью является выявление актуальных тенденций развития, текущих преимуществ и недостатков на основе анализа международного теоретического и практического опыта в изготовлении изделий и конструкций, достигаемых свойств материалов, используемых критериев качества и методов их оценки.

Материалы и методы. Использован комплекс общенаучных логических методов исследования, основанных на теоретическом анализе технологических решений, представленных в научно-технической литературе и средствах массовой информации, в том числе научных статьях, отчетах и материалах конференций.

Результаты. Ключевые вопросы, которые необходимо решать для развития 3D-печати, связаны с удобоукладываемостью смеси, деформацией и прочностью экструдированного слоя. Существует множество примеров составов чернил преимущественно тяжелого бетона для 3D-принтеров различного устройства. Усредненный состав такого бетона содержит по массе 25–45 % вяжущего вещества, 40–65 % заполнителя — кварцевый песок с размером зерна 2–4 мм и воду в количестве не более 15–35 %, а также минеральные добавки, пластификатор и армирующие волокна. Масштабное внедрение технологии требует разработки методик печати конструкций с учетом анизотропии их свойств в зависимости от направления печати.

Выводы. Показано, что в технологии 3D-печати сложным вопросом в реализации остается армирование конструкций. Для достижения максимальных механических свойств напечатанных конструкций требуется многокритериальная оптимизация, учитывающая реологические требования к смесям, особенности армирования и прочность сцепления слоев. Сложная оптимизация реологии бетонных смесей, особенно наполненных армирующими волокнами, дополняется факторами времени и меняющихся условий окружающей среды, которые на текущем этапе развития технологии игнорируются или принимаются как незначимые. Применение «умных» материалов в технологии послойного возведения строительных конструкций формирует пути для ее совершенствования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: 3D-технологии, аддитивные технологии, 3D-печать, аддитивное производство, аддитивное строительство, 3D-принтер, экструзия, строительные чернила, материалы для 3D-печати

Благодарности. Автор выражает благодарность Е.В. Иноземцевой за помощь при подготовке текста статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иноземцев А.С. Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 216–245. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Иноземцев, InozemcevAS@mgsu.ru.

Modern theory and practice of concrete technology for 3D printing in construction

Aleksandr S. Inozemtcev

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

ABSTRACT

Introduction. The analysis of scientific works devoted to the development and research of building materials, products and structures in 3D printing technology was carried out in this work. The purpose of the research is to identify actual development trends, current advantages and disadvantages based on an analysis of international theoretical and practical experience in the manufacture of products and structures, achieved properties of materials, used quality criteria and methods for their evaluation.

Materials and methods. The complex of general scientific logical methods of research based on theoretical analysis of technological solutions presented in scientific and technical literature, information resources from developers and media recourses, including patents, scientific articles and scientific reports are used in this paper.

Results. The key issues that need to be addressed for the development of 3D printing are related to mixture workability, deformation and extruded layer strength. There are many examples of ink compositions for 3D printers of various devices

with high performance. The average composition of concrete for 3D printing contains binder, aggregate, water and mineral additives, plasticizer and reinforcing fibres. Large-scale implementation of the technology requires the development of methods for printing structural elements, taking into account the anisotropy of their properties depending on the printing direction. **Conclusions.** The reinforcement of structures remains a complex issue in 3D printing technology. To achieve maximum mechanical properties of printed structures, multicriteria optimization is required, taking into account rheological requirements for mixtures, reinforcement peculiarities and due to the arrangement of metal elements and the adhesion strength of layers. The complex optimization of the rheology of concrete mixtures, especially those filled with reinforcing fibres, is supplemented by the factors of time and changing environmental conditions, which are ignored or accepted as insignificant at the current stage of technology development. The application of “smart” materials forms the way for its improvement.

KEYWORDS: 3D technology, additive technology, 3D printing, additive production, additive construction, 3D printer, extrusion, building ink, 3D printing materials

Acknowledgements. The author is grateful to E.V. Inozemtseva for help in preparing the text of the paper.

FOR CITATION: Inozemtcev A.S. Modern theory and practice of concrete technology for 3D printing in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):216-245. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr S. Inozemtcev, InozemtcevAS@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом растет интерес к аддитивным технологиям (АТ) в различных отраслях промышленности. Тема 3D-печати, как способа создания объемных объектов из цифровой модели, широко распространена в научной и популярной литературе. Внимание научного сообщества в России к этому направлению существенно изменилось за последние 10 лет. Число публикаций по ключевым словам «3D-печать» и «3D printing» (рис. 1) в отечественных и международных изданиях¹ с единичных статей в 2012 г. увеличилось до 300 и 1300 в год к 2022 г. [1]. В международных публикациях наблюдается схожая тенденция (рис. 1) [2]. Годовая публикационная активность авторов с ключевым словом «3D printing»

¹ По данным РИНЦ (RSCI — Russian Science Citation Index) и Scopus на 20.09.2022.

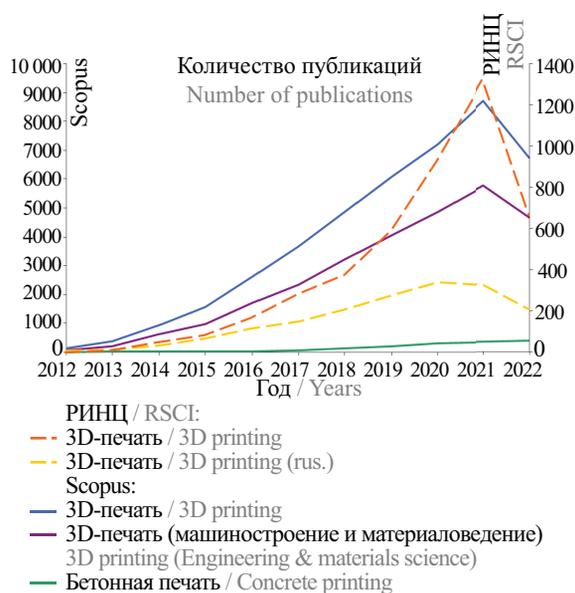


Рис. 1. Количество публикаций, посвященных технологии 3D-печати

Fig. 1. Number of publications dedicated to 3D printing technology

к 2022 г. превысила 6500 материалов. При этом доля статей в области инженерных наук (Engineering sciences) и материаловедения (Materials science) увеличилась с 56 до 69 %. Это свидетельствует о формировании общемирового тренда в исследовательской деятельности в области 3D-печати, как одного из направлений развития цифровых технологий в экономике. Лидерами по научному вкладу в развитие данного тренда являются США и Китай: доля статей составляет 23,1 и 22,1 % (рис. 2) от общемирового публикационного фонда за исследуемый период. Отечественные авторы опубликовали в международных изданиях около 1000 статей (2,4 %) или более 4400 публикаций, индексируемых РИНЦ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель работы — анализ современных технологических решений 3D-печати в строительстве, оценка текущих достижений в теории и практике,

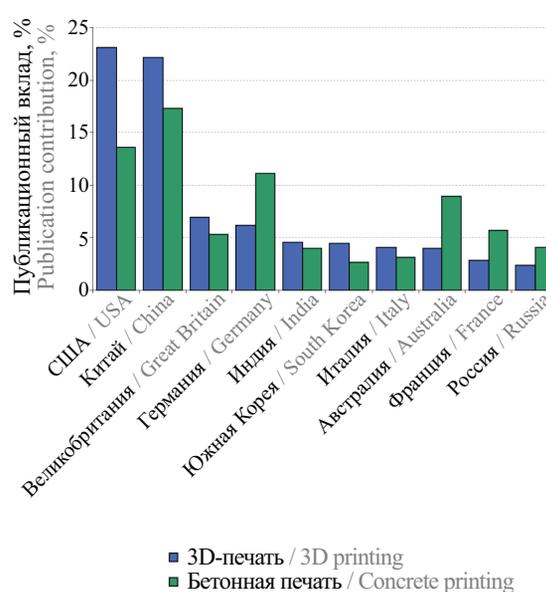


Рис. 2. Публикационный вклад стран по теме 3D-печати

Fig. 2. Publication contributions of countries on the topic of 3D printing

формулировании проблем и тенденций развития. Используется комплекс общенаучных логических методов исследования, основанных на теоретическом анализе технологических решений, представленных в научно-технической литературе, информационных ресурсах разработчиков и средствах массовой информации, в том числе научных статьях, диссертациях, научных отчетах и материалах конференций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Интерес к 3D-печати проявляется и в строительной отрасли. В трудах [3–6] описывается множество преимуществ, которые позволяет реализовать новая технология: персонализация строительства, сокращение времени строительства, трудозатрат и требований к материалам. Наибольшую распространенность в строительной сфере получают публикации с исследованиями АТ, где в качестве чернил для 3D-печати применяются бетоны [7–10] (рис. 1). Отечественные авторы публикаций в международных изданиях с ключевым словом «concrete printing» входят в ТОП-9 в мировом объеме статей, что составляет 4,1 % (рис. 2). За последние 10 лет и в настоящее время более 30 научно-производственных групп занимаются исследованиями по теме 3D-печати [3].

Растущее внимание к технологии 3D-печати в строительстве связано с потенциальными возможностями, которые могут быть реализованы на строительной площадке, а именно автоматизации строительного процесса за счет механизированного создания объекта из цифровой 3D-модели.

3D-печать из бетона организуется за счет реализации подачи и экструзии смеси через движущееся сопло по соответствующим координатам печатающей головки принтера (экструдера). Карта движения сопла экструдера получается путем разбиения на слои 3D-модели будущего здания.

В работе [5] представлена общая схема системы для 3D-печати с применением бетонных материалов (рис. 3). Технологической особенностью является наличие блока управления, осуществляющего контроль выполнения всех операций с использованием программного обеспечения (ПО). Цифровые продукты для управления системами подачи материалов, перемещения экструдера и контроля качества представляют собой отдельную область для разработки, так как подразумевают не только работу с цифровой моделью будущего строительного объекта, но и постоянное использование меняющихся входных параметров на площадке в момент печати. Это могут быть как внешние факторы (вибрации, положение принтера в пространстве, погодные условия и т.д.), так и внутренние, связанные, например, с изменением свойств строительных чернил во времени. Чернила получают на строительной площадке путем смешивания сухих компонентов в установленных пропорциях с водой и добавками. Удобнее это реализуется с помощью сухих строительных смесей. Приготовление смеси непосредственно перед укладкой обусловлено требованиями к реологии, которую нужно обеспечивать за ограниченный период выполнения операции экструзии.

Целевая задача 3D-печати, как и традиционных технологий строительства, — получение строительного изделия заданной формы и размеров. Послойная

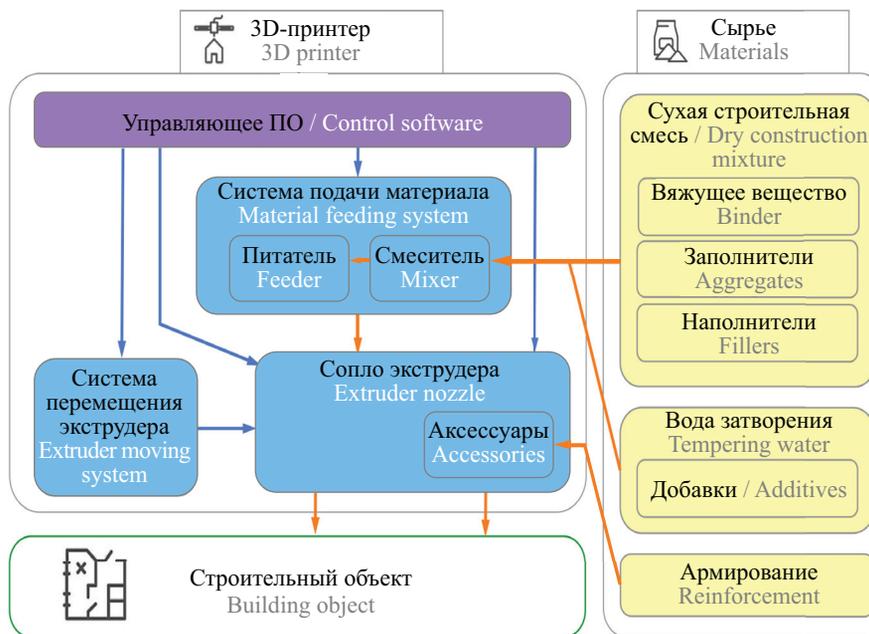


Рис. 3. Общая схема технологии 3D-печати

Fig. 3. General diagram of 3D printing technology

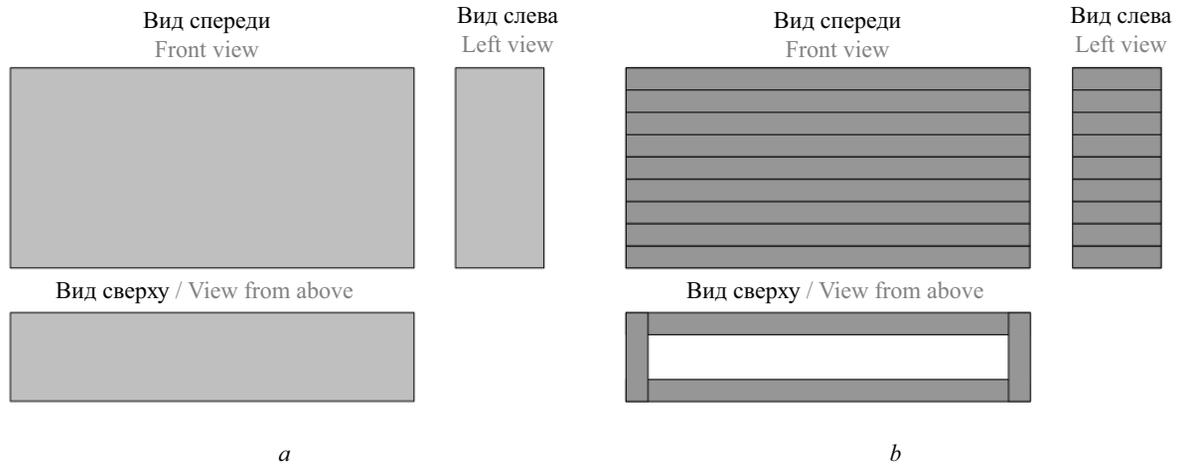


Рис. 4. Общая схема преобразования устройства стеновой монолитной конструкции (а) при использовании технологии 3D-печати (b)

Fig. 4. General scheme for converting a monolithic wall structure (a) using 3D printing technology (b)

экструзия строительных «чернил», как способ изготовления изделий из бетона, приводит к трансформации монолитного объема конструкции (рис. 4, а) в подобие сборного (рис. 4, b). Это ведет к необходимости уделять повышенное внимание границе между слоями для обеспечения качества всей конструкции. При этом увеличение объема экструдированного слоя способствует уменьшению общего количества слоев в изделии одинакового размера. Поэтому определяющим для технологии 3D-печати становятся свойства строительных «чернил».

Большинство исследований послойного создания конструкций использует технологию экструзии небольших (6–50 мм) слоев [3]. При этом «чернила» для 3D-принтеров имеют ограниченную крупность зерен, как правило, составляющую максимальный размер 2–3 мм, подача которых выполняется через сопло круглой, овальной или прямоугольной формы с производительностью 50–500 мм/с.

Реализация процесса печати бетонной смесью обеспечивается за счет подвижного экструдера, перемещение которого выполняется в трех осях (X , Y , Z), не считая дополнительных степеней свободы самого сопла при вращении в горизонтальной и вертикальной плоскостях. При этом в зависимости от конструкции принтера возможности перемещения в пространстве могут быть расширены, например, при использовании роботов-манипуляторов. Согласно публикациям [3, 5] разработки оборудования для печати (3D-принтеров) в настоящее время основываются на реализации следующих конструктивных схем (рис. 5):

- роботы-манипуляторы (примеры [3–23]) (рис. 5, а);
- порталные и рамные системы (примеры [3, 5, 24–32]) (рис. 5, b);
- крановые системы (примеры [3, 5, 33–40]) (рис. 5, с).

Системы робот-манипулятор в настоящее время популярны из-за большого числа степеней свободы и трансформированной из машиностроения инфраструктуры для эксплуатации, адаптированной под строительные нужды. Достоинством такой системы является гибкость настройки и высокая точность движения, недостатками — большая стоимость и сложная система управления. Портальные и рамные системы перемещения печатающей головки легко адаптируются под различные режимы печати в зависимости от вида «чернил». Такие принтеры обладают относительно простой конструкцией, что способствует доступности обслуживания и ремонта, а также легко настраиваемой площадью печати, которая ограничивается размерами несущего портала или рамы. Крановые системы менее распространены, но примеры успешного их использования на практике также существуют. Точность позиционирования печатающей головки в горизонтальной плоскости при максимальном вылете стрелы такого принтера снижается. Несмотря на быстроту сборки и подготовки к началу работы, эти принтеры требуют больше затрат на техническое обслуживание, чем порталные или рамные. Дополнительно выделяют тросовую систему печати, которая основывается на управлении длиной тросов для перемещения сопла экструдера в пространстве. Недостатки такого принтера заключаются в низкой точности и стабильности перемещения по координатам.

Каждая из конструкций устройства принтера имеет преимущества и недостатки. Портальные и крановые принтеры способны обеспечить лучшую масштабируемость процесса печати и производительность изготовления изделий, робот-манипулятор за счет большей степени свободы приспособлен к более сложным задачам при относительно быстрой реализации.

Особенности устройства принтера формируют важную группу технологических факторов (скорость

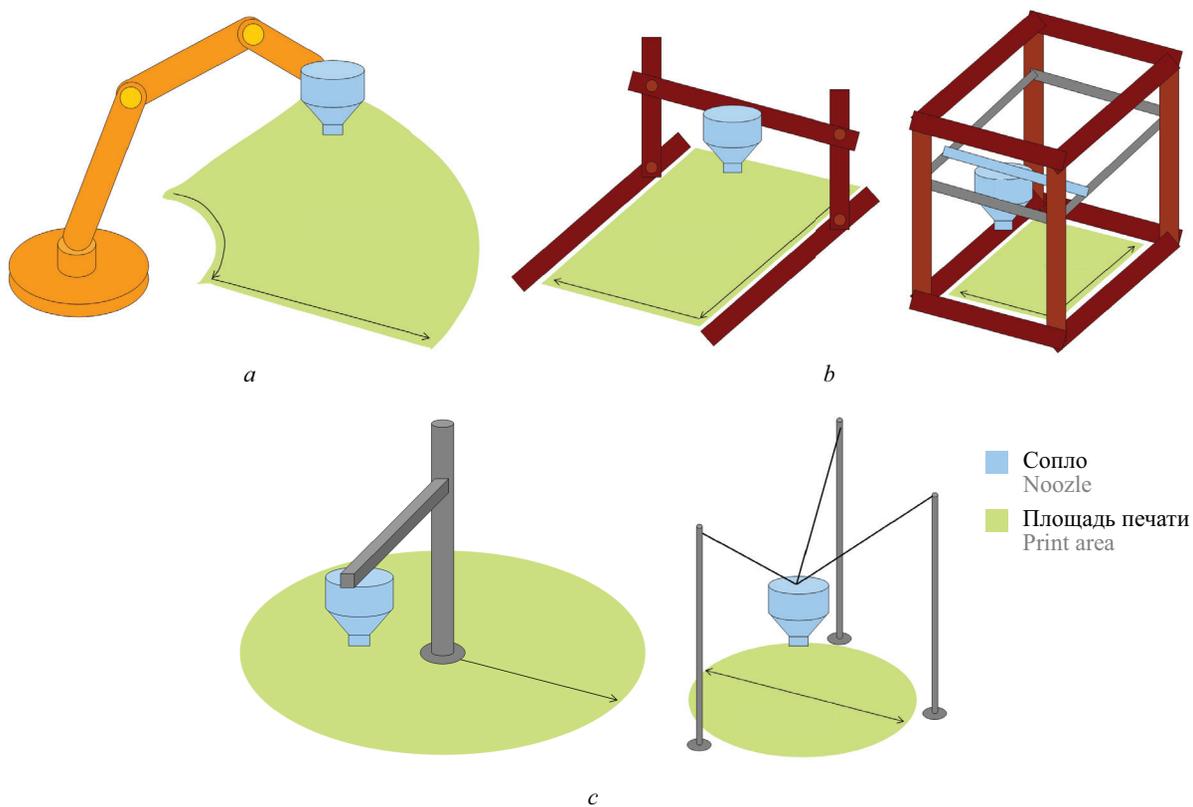


Рис. 5. Конструкционные схемы устройства строительных 3D-принтеров: *a* — роботы-манипуляторы; *b* — порталная/рамная; *c* — крановая

Fig. 5. Structural diagrams of construction 3D printers: *a* — robotic manipulators; *b* — portal/frame; *c* — crane

подачи смеси, размер и форма сопла экструдера, расстояние подачи смеси, давление в системе и др.), влияющих как на качество изготавливаемого изделия и эффективность печати в целом, так и на требования к смесям, которые будут применяться в качестве «чернил». Например, производительность печати, очевидно, зависит от скорости движения сопла экструдера, что в свою очередь должно соотноситься со временем структурирования бетонной смеси и набора прочности, достаточной для восприятия следующего слоя. Варьирование скорости экструзии связано с видом печатаемого изделия и может изменяться в широких диапазонах: от 1–6 м/ч [28] для вертикальных конструкций (столбов) до 15–200 мм/с [30, 41] при изготовлении горизонтальных конструкций (бордюры, плиты и т.д.). При этом интервал нанесения двух слоев составляет 11–60 с. Это формирует рецептурные задачи сочетания как высокой сохраняемости подвижности смеси для выработки большего объема материала, так и достаточной прочности для восприятия верхних слоев без существенной потери формы.

Важнейшую роль для обеспечения качества печатаемой конструкции выполняет сопло экструдера, так как определяет форму и размеры экструдированного слоя. Форма сопла у производителей оборудования может быть реализована в виде эллиптического или прямоугольного сечения, где частными вариантами являются круглые или квадратные. Геометрия сопла оказывает влияние и на скорость его движения.

Так, движение прямоугольного сопла (40 × 10 мм) ограничивалось скоростью 30–35 мм/с [3], а круглого (с диаметром 9 мм) — 50–66 мм/с. Назначение будущих изделий или конструкций, печатаемых на 3D-принтере, определяет выбор формы сопла [30–45]. Очевидно, что при изготовлении конструктивных элементов зданий стоит стремиться к сечению с ровными поверхностями и прямыми углами [5], чтобы минимизировать последующую отделку. В случаях, когда слоистость изделий выполняет дополнительно декоративную функцию, применимы варианты с обтекаемой формой сопла. При этом угол экструдирования так же стоит учитывать. Круглые и эллиптические сопла независимо от угла подачи смеси неспособны обеспечить ровность вертикальных поверхностей изделия вследствие так называемого *sausage effect*² [3], что требует использования выравнивающих направляющих. Это фактически преобразует форму такого сечения сопла в квадратную или прямоугольную. В таком случае изменение угла подачи бетонных «чернил» с 90 до 0° к поверхности печати будет способствовать достижению лучшей сохраняемости формы слоя при равных свойствах материала.

Описаны поршневой и шнековый способы экструзии материала через сопло [5]. В первом слу-

² Деформация слоя в вертикальном направлении, придающая ему обтекаемую форму.

чае строительные «чернила» подаются напрямую за счет выдавливания металлическим толкателем (поршнем) из цилиндра. Во втором — проталкивание материала обеспечивается вращающимся винтом в цилиндре (или роторно-статорное устройство). Такая система подачи дополнительно может быть интегрирована насосом для давления бетонной смеси сжатым воздухом.

Послойное возведение конструкций является непрерывным технологическим процессом, необходима постоянная подача печатаемого материала в большом количестве, что с учетом ограниченной вместимости печатающей головки требует удаленного накопителя. Существует четыре типа систем подачи материала [36, 46–54] к соплу экструдера, которые можно разделить на 2 части: системы с удаленным и местным питателем.

В первом типе система оснащена насосом, который из удаленного от места экструзии накопителя с помощью трубопровода подает бетонную смесь (рис. 6, *a*). Во втором (рис. 6, *b*) — дополнительно оснащается местным питателем для накопления рабочего объема смеси, обеспечивающего непрерывную его подачу через сопло. Отдельно стоит выделить поршневую систему (рис. 6, *c*), где питатель служит частью экструзионного сопла, в котором давление создается подвижным плунжером. Четвертый тип системы характеризуется наличием локального питателя, расположенного в зоне экструзии (рис. 6, *d*).

Выбор системы подачи обосновывается сложностью печатаемой конструкции и составом смеси. Так, локального питателя экструзионной головки может быть достаточно для небольших объемов производства, например при изготовлении архитектурных

форм. Кроме того, в питателе может дополнительно содержаться шнек или вращающиеся лопадки, позволяющие поддерживать однородность смеси и сохранять требуемую текучесть. При этом такой локальный питатель может выполнять функцию смесителя, где в основную смесь вводятся добавки, например ускоритель твердения или фибра [55].

Однако для реализации полномасштабного объемного возведения конструкций по технологии 3D-печати наличие локального питателя не является управляющим фактором. Определяющими для производительности экструдирования будут характеристики удаленного питателя. Но локальный питатель помогает компенсировать технологические задержки времени реакции (корректировки) системы подачи на изменение внешних условий. То есть изменение давления в трубопроводе от удаленного питателя к головке отразится на качестве печати с временным интервалом, что при отсутствии локального питателя затрудняет контроль и управление процессом экструзии.

Транспортировка бетонной смеси требует использования насосного оборудования с относительно высоким давлением 10–40 бар [56], которое зависит от вязкости «чернил». Поэтому на этапе подачи бетонной смеси необходимо обеспечивать стойкость смеси к расслоению при таком давлении. При этом управление стойкостью осуществляется крупностью заполнителя, В/Ц отношением или наличием добавок. Таким образом, качество печати складывается из баланса между технологическими и рецептурными факторами, обеспечивающими процесс послойного возведения конструкции из бетонной смеси.

Технология 3D-печати из-за особенностей формирования строительных конструкций требует ис-

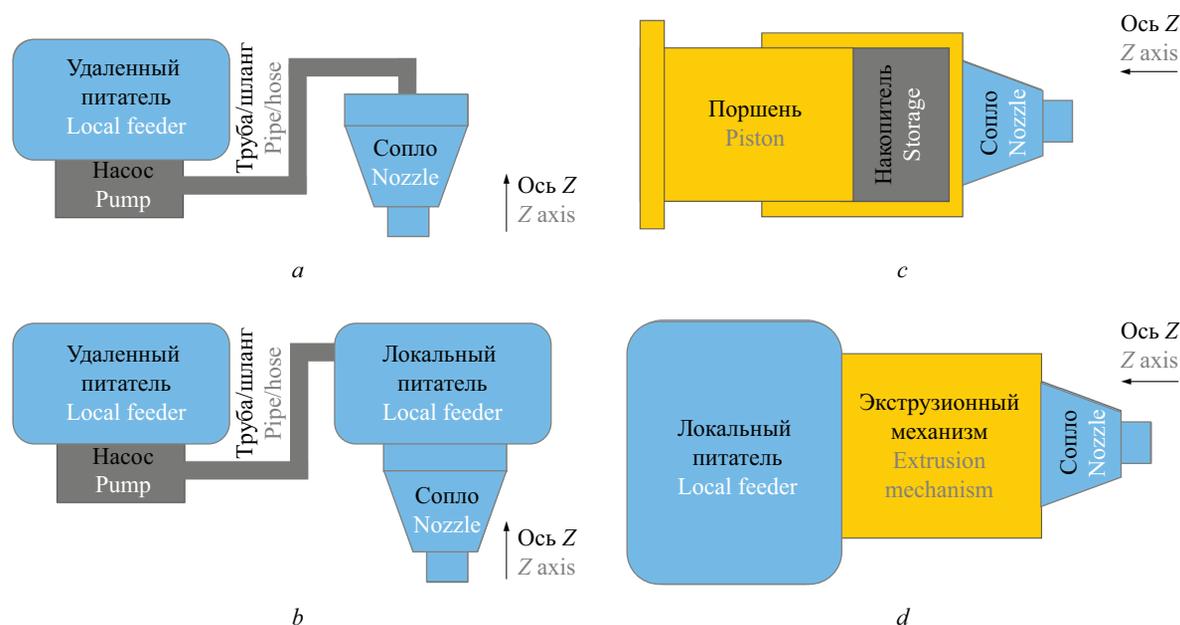


Рис. 6. Возможные схемы устройства системы подачи и экструзии в 3D-принтерах [5]

Fig. 6. Possible options for the design of the feeding and extrusion system in 3D printers [5]

пользования в качестве чернил материалов с высокими эксплуатационными свойствами. Кроме того, отсутствие опалубки, как при сборном или монолитном строительстве, не позволяет использовать традиционный бетон. В связи с этим низкая или нулевая осадка конуса выглядит ключевым требованием к подвижности бетонной смеси. Однако закономернее обозначить тиксотропность реологического поведения дисперсной системы для аддитивного строительного производства. При этом управление реологией таких смесей обеспечивается рецептурными решениями, например варьированием крупностью дисперсной фазы, расходом воды или применением специальных добавок.

Ключевым наполнителем в технологии 3D-печати является песок [57]. Использование песчаной фракции (до 5 мм) природных каменных материалов, в основном кварцевых и известняковых, обусловлено необходимостью наполнения объема плотной и прочной фазой, уменьшающей пустотность, усадку и ползучесть, а следовательно, повышающей прочность всего композита. Комбинирование различных фракций песка позволяет оптимизировать состав бетонных смесей для достижения максимальной плотности. Микрокремнезем как пуццолановая добавка получил широкое распространение как компонент для бетона, поэтому его использование в цементных составах для 3D-печати не менее обосновано. Представляя собой тонкодисперсные частицы SiO₂ (менее 1 мкм) сферической формы, такая добавка обладает низкой насыпной плотностью 130–600 кг/м³ и высокой истинной плотностью 2200–2300 кг/м³, а площадь удельной поверхности

достигает 15–30 тыс. м². Зола уноса представляет собой пылевидную фракцию (0,5–300 мкм) сферических частиц в основном из SiO₂, Al₂O₃ и CaO. Использование суперпластификаторов в бетонных смесях для 3D-печати обусловлено не только необходимостью снижения В/Ц отношения для повышения прочности бетона, но, прежде всего, возможностью управления вязкостью системы [5]. Для повышения механических свойств затвердевшего бетона применяются армирующие волокна. Это могут быть полипропиленовая, стеклянная или металлическая фибра.

По данным исследования [58], в сравнении с традиционными и самоуплотняющимися бетонами состав бетонных смесей для 3D-печати можно охарактеризовать большим содержанием мелкого заполнителя (более 40–45 % по массе) (табл. 1). При этом особенности устройства оборудования для подачи и экструзии полностью исключают крупный заполнитель, кроме единичных попыток [48], где применялся заполнитель размером зерен до 10 мм. Вследствие этого доля вяжущего вещества может достигать 25–30 %. Высокое В/Ц отношение требует применения пластификаторов, что позволяет достичь значений 0,30–0,40. Опыт получения смесей для 3D-печати показывает, что для их приготовления могут использоваться различные вяжущие вещества и мелкие заполнители, варьируемое отношение В/Ц и П/Ц, различный расход добавок, в том числе волокна, наноматериалы или глины. Большинство не содержит крупного заполнителя для предотвращения блокировки подачи смеси на этапах перекачки и экструзии. Управ-

Табл. 1. Примеры некоторых составов для 3D-печати

Table 1. Examples of some compositions for 3D printing

Содержание компонентов, мас. % Component content, wt. %			В/Ц W/C	Источник Reference
Вяжущее вещество Binder	Минеральные добавки Mineral additives	Заполнитель Aggregate		
30,6	30,5 (2 вида) / (2 types)	–	0,41	[28]
24,0	21,1	45,3	0,13	
21,3	7,5 (2 вида) / (2 types)	43,0	0,35	[29]
13,9	15,4 (2 вида) / (2 types)	46,8	0,42	[30]
21,0	37,9	15,7	0,39	[43]
18,7	10,8 (2 вида) / (2 types)	46,8	0,40	[44]
25,0	10,5 (2 вида) / (2 types)	54,5	0,13	
25,0	10,0	53,0	0,16	[62]
15,0	11,0 (2 вида) / (2 types)	65,5	0,18	[63]
16,0	18,0 (2 вида) / (2 types)	57,0	0,18	[64]
14,0	18,5 (2 вида) / (2 types)	54,5	0,30	[65]
40,0	40,0	–	0,30	[66]
42,0	–	43,0	0,12	[67]
26,0	11,0 (2 вида) / (2 types)	51,0	0,15	[68]
25,0	3,0	60,0	0,16	[69]

ление реологией осуществляется за счет введения функциональных добавок: модификаторов вязкости, пластификаторов, ускорителей твердения или наноматериалов [59–61].

В табл. 1 представлены некоторые примеры вариаций соотношения компонентов для приготовления бетонов для 3D-печати. При этом они могут быть в виде базовых соотношений, где массовым содержанием добавок и модификаторов можно пренебречь. Видно, что массовая доля заполнителя в смесях для 3D-печати в большинстве исследований находится в диапазоне 45–55 %. Это свидетельствует о высокой доле цементно-минеральной составляющей, которая достигает около половины состава всей смеси, что существенно больше в сравнении с традиционным тяжелым бетоном, где доля заполнителя обычно более 75 % [70]. Усредненное соотношение компонентов по массе для получения строительных чернил для 3D-печати можно представить в следующем виде:

- вяжущее вещество — 36 ± 10 %;
- вода — 11 ± 5 %;
- заполнитель — 53 ± 13 %.

Также в состав вяжущего вещества для экономии портландцемента входят минеральные добавки — микрокремнезем, зола уноса или их комбинация в количестве около 20 и 10 % соответственно [71]. Функция первого из них заключается в улучшении тиксотропии и повышении пригодности к печати, золы уноса — в улучшении прокачиваемости и экструдированности бетонной смеси. Среднее В/В отношение составляет 0,3. Отметим, что большинство составов имеет высокую плотность — до 2300 кг/м^3 , как у традиционных тяжелых бетонов, так как в качестве заполнителя используются плотные пески. Однако существует опыт получения составов легкого бетона для 3D-печати, наполненных полими микросферами [72–75]. Авторами предложены составы мелкозернистого бетона со средней плотностью $1400 \pm 100 \text{ кг/м}^3$. При этом для обеспечения внутреннего ухода за гидратацией портландцемента в составе таких бетонов используются растворы суперабсорбирующих полимеров, что позволяет управлять процессом их полимеризации, гелеобразования и, как следствие, удерживающей способностью воды.

Для описания течения бетонных смесей для 3D-печати, согласно работе [57], зачастую применяется модель Бингама [76–83]:

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma},$$

описывающая зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ с учетом предела текучести τ_0 и пластической вязкости μ . При этом для бетонных «чернил» для 3D-принтеров необходимо учитывать величину напряжения сдвига, способствующую как начальному течению смеси из состояния покоя, так и поддержанию ее течения, или статического и динамического предела текучести соответственно.

Кроме того, как любая дисперсная система на цементной основе, бетонные смеси для экструдирования обладают тиксотропией и структурированием, которые вследствие флокуляционного взаимодействия частиц и гидратационных процессов вяжущего способствуют изменению их реологических свойств. Так, ключевыми факторами для управления способностью к прокачиванию (pumpability) и экструдированию (extrudability) являются динамический предел текучести и пластическая вязкость, а для сохранения формы напечатанного слоя и пригодности к печати (buildability) — статический предел текучести, тиксотропия и скорость структурирования.

Кроме того, для строительных «чернил» для 3D-принтеров применимо свойство «открытое время» (open time) или время печати, которое обычно определяется с помощью прибора Вика как период времени от начала (иногда от завершения приготовления смеси) до конца схватывания [3]. Определение напряжения сдвига или вязкости осуществляется с помощью вискозиметра или косвенно через осадку конуса [27], прочность свежего бетонного слоя может устанавливаться на отформованных цилиндрах по величине деформации и времени до разрушения от воздействия плиты известной массы [28].

Разработка бетонной смеси для 3D-печати представляет собой итерационный процесс (рис. 7 [58]). Каждые рецептурные изменения приводят к последовательной оптимизации бетонной смеси по способности ее к прокачиванию, экструдированию, формованию, времени и пригодности к печати путем оценки соответствия требованиям. В случае несоответствия состава одному из требований смесь корректируется и подвергается оценке соответствия по указанным показателям качества [69].

Таким образом, к бетонным смесям для аддитивного строительного производства предъявляются полярные реологические требования. С одной стороны такие системы должны обладать высокой удобоукладываемостью, чтобы обеспечить подачу материала к месту экструзии, с другой — высокой вязкостью и тиксотропией сразу после формования через сопло экструдера [67–100].

В труде [58] представлены обобщающие сведения о рабочих диапазонах статического и динамического предела текучести смесей для строительной 3D-печати. Так, границы статического предела текучести описаны в диапазоне 0,16–6,8 кПа, где высокая степень наполнения тонкими компонентами (например, наноглины или зола уноса) обеспечивает получение более вязких чернил. При этом динамический предел текучести варьируется от 0,05 до 0,76 кПа, а пластическая вязкость — от 1,6 до 5,8 Па·с. Однако автором отмечается отсутствие единого подхода при разработке бетонных смесей для 3D-печати и общих абсолютных значений указанных реологических показателей, которые были пригодны к применению. Это связано как с отсут-

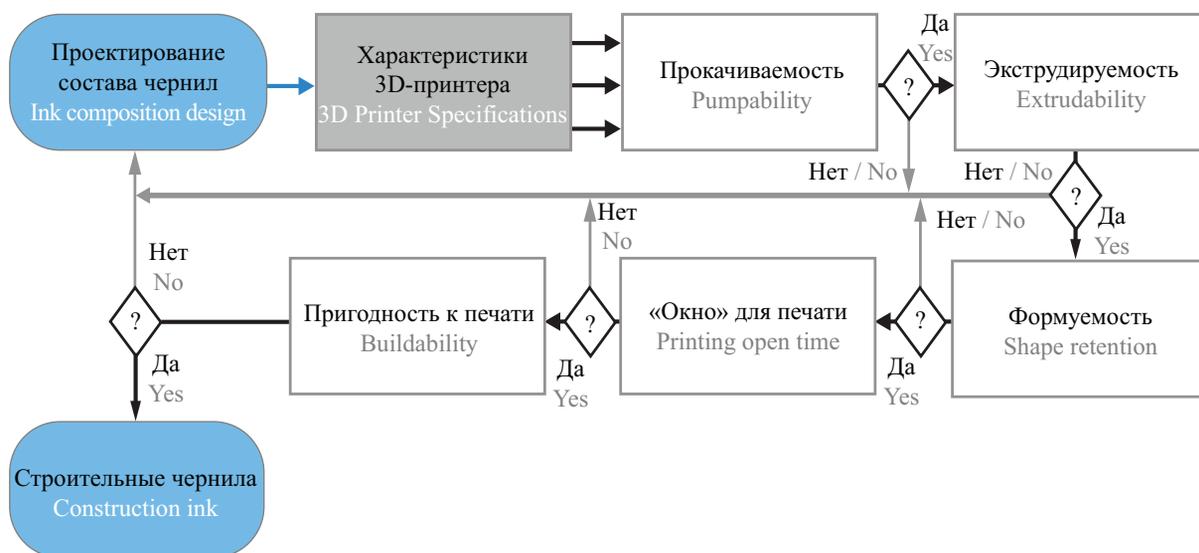


Рис. 7. Итерационный процесс проектирования состава бетонной смеси для 3D-печати [58]

Fig. 7. Iterative process of designing the composition of a concrete mixture for 3D printing [58]

ствием работ, где исследовались одновременно все три характеристики, так и с варьируемой методикой их измерения, в том числе из-за измерительных систем (реометров). Таким образом, разработанные бетонные смеси не обладают универсальностью применения. То есть строительные «чернила», применимые для одного 3D-принтера, являются не совместимыми для экструзионного оборудования другого производителя.

Важно также отметить, что большинство работ [52, 98, 101–103] посвящено исследованиям без учета множества особенностей печатающего оборудования, таких как форма и размер сопла экструдера, расстояние и давление в системе подачи смеси и др. Такие технологические факторы должны учитываться в зависимости от кинетических преобразований бетонных смесей на цементном вяжущем, вызванных процессами гидратации. В работах [98, 104, 105] интенсивность структурообразования ограничивается широким диапазоном приращения прочности 12–27 Па/мин при В/Ц = 0,2–0,4, а в некоторых случаях [106] средней величиной — 43 Па/мин.

Прокачиваемость³, как свойство бетонной смеси, связана с обеспечением требуемой реологии при сохранении первоначальных свойств [107]. При этом в системе трубопроводов требуется относительно подвижная смесь, а в зоне экструзии (у сопла) — жесткая для сохранения формы. Для обеспечения такого сочетания свойств выделяют [108] 2 подхода:

- увеличение доли цементно-минерального теста, обеспечивающего равномерность распределения по поверхности частиц заполнителя;

³ Прокачиваемость (от англ. pumpability) определяется как способность смеси транспортироваться под давлением по системе трубопроводов.

- управление вязкостью цементно-минерального теста для контроля однородности и предотвращения расслоения.

Для измерения прокачиваемости строительных «чернил» используют реометр, а также контролируют консистенцию с помощью прибора Вика [109]. В публикации [110] показано, что смеси с пределом текучести и пластической вязкостью $0,59 \pm 0,08$ кПа $38,7 \pm 4,5$ Па·с имели удовлетворительную прокачиваемость и экструдированность.

Как показано выше, структурирующиеся бетонные смеси изменяют вязкость во времени вследствие гидратации портландцемента, что сказывается на их прокачиваемости [3]. При подаче такой смеси к соплу экструдера будет возникать повышенное давление. Подбор оборудования для прокачивания бетонной смеси связан с ее рецептурой. Так, давление в системе может быть снижено за счет уменьшения отношения количества заполнителя к вяжущему веществу в составе чернил [111, 112]. Бетонная смесь представляет собой дисперсную систему с заполнителем в качестве дисперсной фазы и цементно-минеральной матрицей — дисперсной среды. То есть обеспечение требуемой прокачиваемости достигается оптимизацией каждой из составляющей такой системы. Например, добавление известняковой муки, согласно исследованию [113], позволит ускорить прокачивание смеси или снизить давление в трубопроводе. С этой же целью можно использовать способность бетонной смеси на портландцементе разжижаться при внешнем воздействии за счет интеграции системы подачи «чернил» с вибрационными механизмами.

Традиционно при изготовлении железобетонных изделий в сборной или монолитной технологии формование осуществляется из подвижных смесей

или с применением принудительного разжижения (вибрирования). В технологии 3D-печати наряду с необходимостью обеспечить поставку бетонной смеси через систему трубопроводов требуется сохранить форму изделия после его подачи из сопла экструдера. Экструдирруемость⁴ достигается за счет тиксотропности бетонной смеси, так как после снятия внешнего воздействия на смеси в момент формования (экструдирования) «чернила» восстанавливают высокую вязкость. При этом важно с учетом типа принтера, размера сопла экструдера и других технологических особенностей конкретного принтера осуществлять подбор компонентов и их соотношения для предотвращения расслоения и блокировки течения в трубопроводе и печатающей головке.

Согласно работе [107] экструдирруемость бетонных смесей нарушается при превышении предела текучести 0,9 кПа вследствие протекания гидратационных процессов. Увеличение доли песка в составе «чернил», как и увеличение размера зерен заполнителя, приводит к ухудшению экструдирруемости [107, 100]. Однако жесткие смеси, которые хорошо сохраняют форму после экструзии, склонны к разрывам слоя, нарушению сплошности и образованию пустот, что отражается на прочности при изгибе затвердевшего бетона. Улучшение экструдирруемости возможно за счет использования более подвижных бетонных смесей, структурирование которых интенсифицируется за счет применения ускорителей непосредственно перед подачей, т.е. у сопла печатающей головки.

Таким образом, к ключевым рецептурным факторам, влияющим на экструдирруемость, можно отнести В/Ц отношение, соотношение количества заполнителя к вяжущему веществу, свойства заполнителя, расход функциональных добавок, которые позволяют управлять реологией; к технологическим факторам — характеристики печатающего оборудования, 3D-принтера: давление подачи, длина и диаметр трубы в этой системе, размер и форма отверстия сопла экструдера.

Пригодность к печати⁵ — важный показатель для бетонных смесей, так как деформация слоя может привести к разрушению конструкции или изделия после последовательного нанесения нескольких слоев. В отличие от опалубочного формования в технологии 3D-печати бетонная смесь должна выполнять самонесущую функцию. Технологическими способами повышения пригодности к печати яв-

ляются использование экструдера с прямоугольной формой сопла, что позволяет увеличить площадь контакта слоев и распределить нагрузку, или увеличение количества смежных слоев, обеспечивающих боковую поддержку в плоскости формования [24].

Обеспечение процесса 3D-печати бетоном требует более тщательного контроля за реологией смеси, учитывающего взаимосвязь несколько параметров. Известны попытки исследовать влияние различных компонентов смеси для 3D-печати на статический предел текучести. Так, в публикации [77] авторами использовалось математическое уравнение, демонстрирующее взаимосвязь статического предела текучести и крупности частиц дисперсной фазы, а в трудах [78, 79] были предприняты попытки связать предел текучести цементного теста с пределом текучести строительного раствора. В работе [76], используя теорию Фуллера – Томпсона и модель Марсона – Перси, показано влияние гранулометрии кварцевого песка на улучшение пригодности к печати (buildability). Авторами [80] показано, что предел текучести в составах бетонных смесей для 3D-печати может существенно варьироваться в широком диапазоне, и предложено уравнение:

$$\frac{\tau_f}{\tau_i} = \frac{H}{h}, \quad 25 \leq \frac{\tau_f}{\tau_i} \leq 150,$$

где τ_f и τ_i — конечный и начальный предел текучести в нижнем слое соответственно; h — высота печатаемого слоя.

Таким образом, реология бетонных смесей является ключевой для реализации технологии 3D-печати. Особенно важно прогнозирование изменения этих свойств во времени. В исследовании [28] предложена модель для предела текучести:

$$\tau_0(t) = A_{thix} t_c (e^{t/t_c} - 1) + \tau_{0,0}$$

и критического периода деформативности, как периода ожидания между экструзией соседних слоев, необходимого для предотвращения разрушения:

$$t_f = \frac{\tau_{0,0}}{\rho g R / \alpha_{geom} - A_{thix}},$$

где

$$\alpha_{geom} = 2 \left(1 + \frac{D}{2\sqrt{3}h} \right),$$

где A_{thix} — постоянная скорость увеличения предела текучести во времени; t_c — характеристика времени (корректировочная величина); t_r — время покоя слоя (т.е. $t_r = 0$); $\tau_{0,0}$ — предел текучести первого экструдированного слоя; ρ — средняя плотность бетона; g — ускорение свободного падения; R — постоянная, зависящая от скорости экструзии в диапазоне 1,1–6,2 м/ч; α_{geom} — геометрический фактор, зависящий от формы строительной конструкции; D — диаметр конструкции; h — высота конструкции на уровне первого слоя [28].

⁴ Экструдирруемость (от англ. extrudability) определяется как способность смеси формироваться в слое под давлением при сохранении геометрии и формы.

⁵ Пригодность к печати (от англ. buildability) определяется как способность смеси в напечатанном слое сопротивляться деформациям и разрушению как под действием собственного веса, так и последующими при печати слоями.

Предел текучести τ_c можно оценить по распы-
ву бетонной смеси из цилиндра:

$$\tau_c = \frac{\rho g (h_0 + h_R)}{\sqrt{3}},$$

где h_0 — начальная высота цилиндра радиусом R_0 (вискозиметра); h_R — высота бетонной смеси после истечения из цилиндра (вискозиметра) до радиуса R .

Для оценки деформативности используется ко-
нус с диаметром $d_0 = 100$ мм, который рассчиты-
вается по формуле [93]:

$$\Gamma = \frac{d_1 d_2 - d_0^2}{d_0^2},$$

где d_1 — максимальный диаметр расплыва; d_2 —
диаметр, перпендикулярный d_1 .

Альтернативной мерой деформативности явля-
ется пластическая вязкость бетонной смеси, изме-
нение которой во времени можно выразить следую-
щим образом [91]:

$$\mu_m(t) = \mu_m(0, T) + \Delta\mu_{eq} \left(\frac{t}{t_f} \right),$$

где $\mu_m(0, T)$ — начальная пластическая вязкость
при температуре T ; $\Delta\mu_{eq}$ — приращение по линейной
регрессии; t_f — время завершения укладки бетон-
ной смеси. При этом необходимо учитывать фактор
температуры бетонной смеси и времени окончания
ее укладки.

В настоящее время распространенной практи-
кой является экструзия слоя с постоянной высотой.

Однако в процессе печати слой стремится деформи-
роваться как под собственным весом, так и под весом
каждого последующего слоя сверху. Это приводит
к увеличению расстояния между соплом экструдера
и поверхностью формования [3], что в результате
нарушает технологию укладки слоя, которая выра-
жается в кручении и нарушении сплошности слоя,
а также ухудшении адгезии между ними. Подобный
эффект накапливается с увеличением общей высо-
ты напечатанной конструкции и может приводить
к разрушению. Поэтому актуален вопрос ускорения
набора прочности слоев, обеспечивающей скорость
возведения объекта по высоте.

Механические свойства экструдированных ма-
териалов в большей степени вызывают интерес
в конструкции. Прочность конструкции опреде-
ляет эффективность строительных «чернил»
при послойном устройстве. Вследствие послойно-
го нанесения материала для конструкций, напеча-
танных на 3D-принтере, характерна анизотропия
свойств [57]. При оценке прочностных характери-
стик такого материала в конструкции следует учи-
тывать направление приложения нагрузки относи-
тельно плоскости формования (рис. 8).

Стандартной анизотропией напечатанного бе-
тона при определении прочности на сжатие счита-
ется 18–35 % [57]. При этом средняя прочность со-
ставляет 75–105 МПа.

Как известно [92], В/Ц отношение является
важнейшим фактором для достижения требуемой
прочности бетона как для обеспечения достаточной

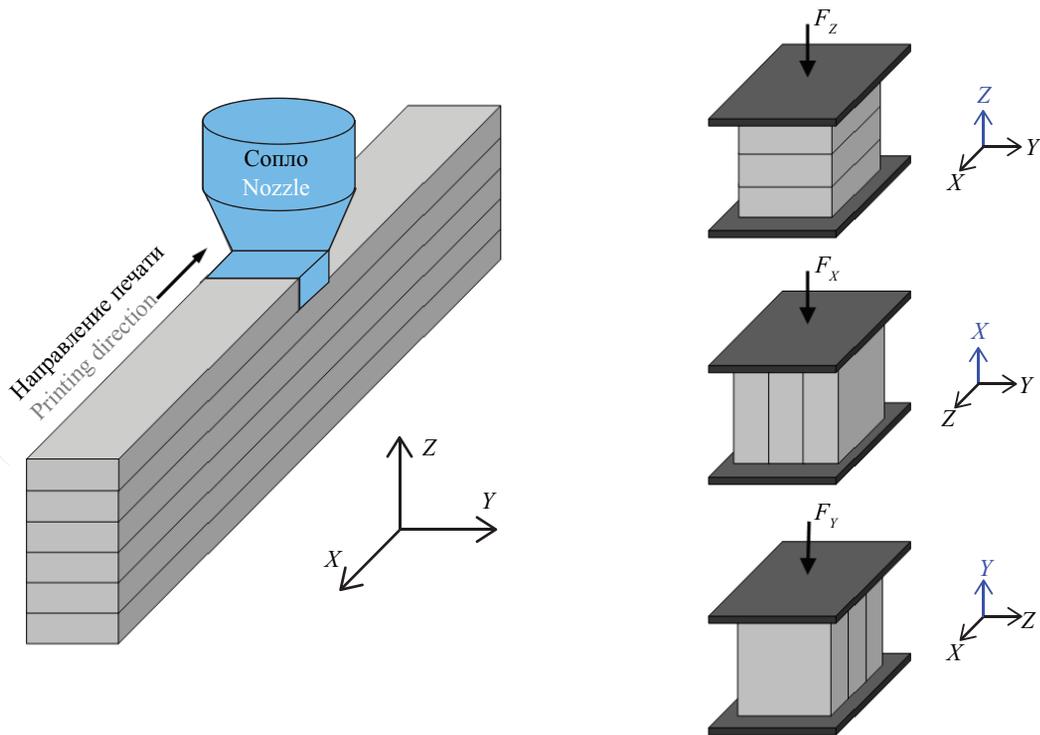


Рис. 8. Направление приложения нагрузки при испытании образцов бетона на прочность, отобранных из напечатанных конструкций

Fig. 8. Direction of load application during strength testing of concrete specimens selected from printed structures

гидратации вяжущего, так и для ограничения вовлечения воздуха. В технологии 3D-печати подача бетонной смеси под давлением приводит к снижению количества вовлеченного воздуха, что выражается в увеличении прочности относительно образцов, изготовленных формованием [94]. Кроме того, положительный эффект наблюдается для строительных чернил с фиброй, в которых под давлением происходит ориентирование волокон преимущественно вдоль направления экструзии. Это приводит к увеличению прочности при изгибе в соответствующих направлениях испытания.

Из множества исследований [68–95, 114–116] анизотропии свойств в конструкциях, напечатанных из бетона, следует, что направление печати и ее продолжительность оказывают значительное влияние на общую несущую способность, что необходимо учитывать при проектировании объектов. Средняя величина прочности при изгибе составляет 10–15 % от прочности на сжатие и лежит в диапазоне 6–17 % [57]. При этом анизотропия прочности на изгиб в разных направлениях достигает 50 %.

Очевидным технологическим отличием 3D-печати от сборного или монолитного способа изготовления железобетонных изделий является послойность конструкций. Поэтому высокая прочность на границе между экструдированными слоями бетона, обеспечивающая достаточное сопротивление сдвиговым и растягивающим нагрузкам, служит основным требованием к строительным «чернилам».

Проблема в основном возникает при увеличении времени нанесения последующего слоя, что вызывает формирование так называемых «холодных швов» [44, 117]. Однако рецептура строительных чернил, в большей степени связанная с образованием шероховатости поверхности, зависит от размера частиц заполнителя, а также влияет на прочность сцепления слоев [118].

Прочность сцепления слоев, исследованная в работах [5, 6, 87], по растяжению образцов в цилиндрах из напечатанной конструкции, показала важность контроля паузы между нанесением соседних слоев. Варьирование промежутка печати между слоями от единиц минут до 7 суток и сравнение со стандартными образцами показало значительные потери прочности в связи ухудшением сцепления между слоями вследствие формирования холодных швов. То есть для достижения наибольшего сцепления между слоями необходимо стремиться к сокращению задержки печати последовательных слоев.

Особенности составов для 3D-печати связаны с отсутствием, как правило, крупного заполнителя (более 5 мм). Максимальный размер зерен для строительных «чернил» не превышает 2–3 мм [114, 115]. В связи с этим для полного смачивания таких дисперсных систем требуется больше воды, что в свою очередь может приводить к повышению усадки при высыхании.

Усадка бетонных образцов с фиброй, отобранных из напечатанной конструкции, в среднем изменяется в диапазоне 0,177–0,855 мм/м в зависимости от условий твердения [87]. Минимальную усадку имеют образцы, твердеющие в воде, а при выдерживании при относительной влажности 60 % и температуре 20 °С величина усадки находится в верхней границе указанного диапазона.

Технология 3D-печати как альтернатива традиционным способам строительного производства для повышения надежности конструкций требует армирования. Устройство металлической арматуры в послойно нанесенных конструкциях вызывает наибольшие технологические сложности в 3D-печати бетонных материалов.

В работе [98] для армирования конструкций разработали специальное устройство печатающей головки, которое заключается в наличии двух отверстий с противоположенной (задней) стороны от сопла экструдера, позволяющих протягивать металлические стержни параллельно с подачей бетонной смеси. В этом случае арматура располагается на границе между слоями печати. Существуют разработки конструкции сопла экструдера [3], где протягивание металлической проволоки осуществляется в слое экструдированной бетонной смеси. Важным условием в таком случае является достаточная гибкость арматуры для повторения маршрута движения печатающей головки без разрушения формы экструдированного материала. Указанный подход позволяет решить задачу горизонтального армирования, при том что устройство вертикальной арматуры сложное. Возможна ручная подготовка и монтаж арматурных стержней или каркасов, причем как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении [99, 101, 102, 106, 119, 120]. Однако подобный подход снижает технологичность всего процесса строительства с помощью 3D-принтера. Кроме того, расположение арматуры на границе между двумя экструдированными слоями может способствовать формированию «слабой» зоны в конструкции, понижая эффективность армирования [121–123]. Увеличение сцепления между слоями бетонной смеси может быть также реализовано с помощью дополнительного роботизированного механизма, который выполняет внедрение коротких стальных стержней непосредственно перед нанесением бетонной смеси [57]. Альтернативным способом армирования служит использование объемного армирования волокном [6, 33, 93, 124–126] (рис. 9 [5]). При этом используются короткие, тонкие и мягкие волокна (базальтовые, стеклянные, полимерные, углеродные и т.д.), чтобы предотвратить блокировку системы подачи или экструдера вследствие комкования смеси. Для лучшего распределения волокон в смеси фибру добавляют до смешивания сухих компонентов с водой. При подаче бетонной смеси с фиброй происходит выравнивание волокон вдоль

направления экструдирования, что способствует продольному армированию слоя. Это влияет на анизотропию механических свойств. Благодаря высокой площади контакта фибры с цементным камнем обеспечивается высокая прочность сцепления, что также отражается в повышении прочности при изгибе и сжатии до 30 и 100 МПа соответственно [33, 44, 5, 127].

Для продольного армирования, выполненного в процессе формирования слоя, могут применяться леска, металлическая проволока, трос или цепь [55, 128, 129], которые увеличивают прочность на растяжение в конструкции на 82,5 %. При реализации данного метода армирующий материал подается параллельно экструдированному слою бетона через сопло экструдера [57]. Устройство такого подхода представляет собой катушку с проволокой или тросом, закрепленной к печатающей головке. Свободный конец армирующего материала подается через специальное отверстие в сопле, позволяя равномерно разматываться с катушки в момент подачи смеси [129]. Однако первые испытания этого способа армирования свидетельствуют о недостатках, например низкой прочности сцепления с бетоном или проскальзывания при испытании на изгиб, но при достижении больших значений, чем для монолитного бетона [129, 130]. Использование анкерного крепления при такой технологии армирования позволяет избавиться от указанных недостатков [55]. При этом наиболее эффективными являются анкеры из металла наряду с использованием полиэтиленовых, нейлоновых, углеродных и др. Механические характеристики при реализации параллельной подачи армирующего материала могут достигать улучшения до 290 %. В публикациях [124, 131] отмечается, что такой подход приводит к дополнительному воздухововлече-

нию, что выражается в пористой границе между бетоном и армирующим материалом.

Армирование напечатанных бетонных конструкций может быть реализовано введением металлических стержней, монтаж которых осуществлялся с помощью специального устройства — инжектора — возле экструзионного сопла. При этом устройство такой арматуры может выполняться как сонаправленно пути печатающей головки, так и разнонаправленно, что позволяет добиваться различного характера и эффекта армирования [37, 132]. Существует опыт использования U-образной, спиральной или криволинейной формы таких стержней [133, 134]. Такое армирование обеспечивало до 142–184 % увеличения прочности на изгиб. Подобный подход может быть эффективен, но реализуется в основном путем ручного введения стержней, особенно неправильной формы.

Армирование напечатанных конструкций возможно с применением стальной сетки, которая с помощью специальной насадки монтируется и удерживается вертикально в продольном направлении, позволяя соплу экструдировать бетонную смесь с двух внешних сторон [135]. Такой подход позволил обеспечить основную функцию армирования конструкций — повысить прочность на изгиб до 170–290 %. Существует опыт [135] возведения вертикального армирующего каркаса мобильным роботом с последующим заполнением пространства внутри него и последующим торкретированием внешних поверхностей. Однако это в большей степени демонстрирует возможности создания металлических каркасов, а бетонирование конструкции в данном случае проведено вручную. То есть автоматизация выполнена лишь частично. При этом имеются примеры [136, 137] использования металлической или полимерной сетки при ручном монтаже между напечатанными на 3D-принтере слоями.

Устройство армирующего материала в межслойном пространстве представляется наиболее простым в реализации на данный момент. Укладка арматурных стержней таким образом обеспечивает требуемую прочность сцепления с бетоном, но выполняется, как правило, вручную и лишь в горизонтальном направлении. Однако устройство металлической составляющей напечатанных конструкций также может быть осуществлено по технологии послойного нанесения [138].

Таким образом, согласно работам [55, 57], исследования по разработке решений для армирования бетонных конструкций, возводимых по технологии 3D-печати, выполнены, как правило, с использованием ручного способа. Большинство попыток автоматизации этого процесса связаны с устройством дополнительных устройств (насадок) к соплу экструдера бетонной смеси. Реализация армирования параллельно процессу экструзии бетона требует проработки ПО и оптимизации цифровых 3D-моделей для генерации металлической составляющей аддитивным способом.

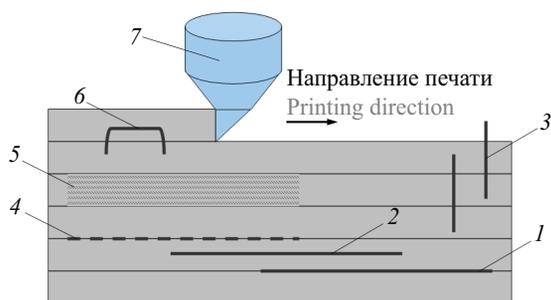


Рис. 9. Способы армирования конструкций, напечатанных 3D-принтером [5]: 1 — стержневая или проволочная арматура между слоями; 2 — стержневая или проволочная арматура внутри слоев; 3 — короткие вертикальные арматурные стержни; 4 — сетка между слоями; 5 — микроволокно (фибра); 6 — U-образные стержни проволоки; 7 — сопло

Fig. 9. Methods of reinforcing 3D printing structures [5]: 1 — rod or wire reinforcement between layers; 2 — rod or wire reinforcement inside the layers; 3 — short vertical reinforcing bars; 4 — mesh between layers; 5 — microfibre (fibre); 6 — U-shaped wire rods; 7 — nozzle

Анализ международных источников позволяет представить общее состояние развития технологии 3D-печати в настоящее время и обозначить пути развития и возникающие при этом проблемы (табл. 2).

Представленные в табл. 2 области совершенствования технологии 3D-печати, технологические решения и возникающие проблемы позволяют сделать следующие важные выводы:

- каждый из существующих способов реализации армирования экструдированных конструкций

имеет свои недостатки и связанные с ними проблемы. Выбор конкретного технологического решения по армированию напечатанных конструкций носит субъективный характер и требует индивидуальной проработки в зависимости от особенностей устройства 3D-принтера;

- для достижения максимальных механических свойств напечатанных конструкций необходима многокритериальная оптимизация, учитывающая реологические требования к смесям (например,

Табл. 2. Основные проблемы технологических решений для 3D-печати в строительстве [4]

Table 2. Main problems of technological solutions for 3D printing in construction [4]

Область совершенствования Area of improvement	Технологическое решение Technological solution	Проблема Problem
Прочность на изгиб и растяжение Flexural and tensile strength	Использование металлической фибры Using metal fibre	Повышается прочность на изгиб, но требуется дополнительное армирование для улучшения сопротивления растяжению Flexural strength is increased, but additional reinforcement is required to improve tensile strength
		Прочность существенно зависит от ориентации волокон в объеме Strength depends significantly on the orientation of the fibres in the volume
		Отсутствует объективный способ выбора армирующего волокна There is no objective way to select reinforcing fibres
		Требуется корректировка состава для обеспечения требуемой реологии смесей Adjustment of the composition is required to ensure the required rheology of the mixtures
	Использование углеродной или полимерной фибры Using carbon or polymer fibre	При повышенных температурах волокна плавятся, теряя прочность Fibres melt and lose strength at elevated temperatures
	Укладка/протяжка стержней или проволоки в процессе печати Laying or pulling rods or wires during the printing process	Необходимо обеспечить высокую прочность сцепления арматуры и бетона It is necessary to ensure high adhesion strength between reinforcement and concrete
	Межслойное армирование путем прямого внедрения стержней в напечатанную конструкцию Interlayer reinforcement by direct embedding of bars into the printed structure	В зоне контакта образуются пустоты и искривления напечатанного слоя In the contact area, voids and curvatures of the printed layer are formed
		Нарушается сплошность контакта при увеличении длины внедряемого стержня The continuity of the contact is disrupted when the length of the introduced rod increases
	Управление ориентацией волокон в экструдированном слое Control of fibre orientation in the extruded layer	Устройство армирующих элементов приводит к увеличению времени и сложности печати Installation of reinforcing elements increases the time and complexity of printing
	Использование скоб, колочей проволоки, гвоздей для армирования Use of staples, barbed wire, nails for reinforcement	
Использование армирующих сеток Use of reinforcing mesh	Усложняется печать криволинейных конструкций Printing curved structures becomes more difficult	
	Требуется устройство и связывание сеток во время печати Requires device and mesh binding during printing	
Внешнее армирование External reinforcement	Снижение во времени стойкости к нагрузкам и огню Reduction in resistance to stress and fire over time	

Область совершенствования Area of improvement	Технологическое решение Technological solution	Проблема Problem
Прочность сцепления слоев Layer adhesion strength	Использование в составе крупного заполнителя с размером частиц до 5–12 мм для повышения шероховатости поверхности и увеличения площади контакта между ними Use of coarse aggregate with particle sizes up to 5–12 mm to increase surface roughness and increase the contact area between them	Требуется больший размер сопла экструдера и сечения в системе подачи смеси A larger extruder nozzle and cross-section in the mixture supply system are required Повышенный риск блокирования подачи смеси в системе трубопроводов Increased risk of blocking the mixture supply in the piping system Меняется размер и форма печатаемого слоя, что влияет на прочность конструкции The size and shape of the printed layer changes, which affects the strength of the structure
	Использование суперпластификаторов, освобождающих воду в объеме слоев для увеличения влажности на его поверхности Use of superplasticizers that release water in the volume of layers to increase humidity on its surface	Нарушает реологию смеси с заданной удобоукладываемостью, снижается ее формуемость The rheology of the mixture with a given workability is disrupted and its formability is reduced Размеры и геометрия напечатанного образца существенно влияют на время печати и прочность сцепления. Требуется подробные исследования по проектированию и планированию маршрута The dimensions and geometry of the printed sample have a significant impact on print time and adhesion strength. Detailed studies on route design and planning are required
Проектирование составов с заданными механическими свойствами Design of compositions with specified mechanical properties	Разработка высококачественных бетонов с высоким содержанием цемента и более мелкими заполнителями Development of high quality concrete with high cement content and finer aggregates	Повышаются деформации усадки Shrinkage deformations are increased Изменяются режимы приготовления смеси, что влияет на прочностные характеристики Mixture preparation modes are changed, which affects the strength characteristics Требуется решения по частичной замене портландцемента для снижения его расхода без потери прочности Solutions to partially replace Portland cement to reduce its consumption without losing strength are required Требуется повышение размера частиц заполнителя для снижения усадки An increase in aggregate particle size to reduce shrinkage is required
Оптимизация топологии смесей, контроль оплывания и геометрии слоев Optimization of mixture topology, control of slumping and layer geometry	Оптимизация топологии смесей Mix topology optimization	Необходима комплексная оптимизация свойств смесей, обеспечивающая сцепление слоев и учитывающая усадочные и термические деформации A comprehensive optimization of the properties of the mixtures, ensuring adhesion of the layers and taking into account shrinkage and thermal deformations is required Требуется исследование поведения напечатанных конструкций, в том числе на анизотропию из смесей с оптимизированной топологией Investigation of the behavior of printed structures, including anisotropy, from topology-optimized mixtures is required Необходим поиск компромисса между сложностью печатаемой конструкции и простотой устройства арматуры Finding a compromise between the complexity of the printed structure and the simplicity of the fittings is required

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Область совершенствования Area of improvement	Технологическое решение Technological solution	Проблема Problem
Оптимизация топологии смесей, контроль оплывания и геометрии слоев Optimization of mixture topology, control of slumping and layer geometry	Печать купольных и навесных конструкций Printing of dome and hanging structures	Снижается несущая способность и эстетика из-за ступенчатого вида конструкции Load-bearing capacity and aesthetics are reduced due to the stepped design
	Оптимизация несущих конструкций за счет сочетания при печати материалов разной прочности Optimization of load-bearing structures by combining materials of different strengths when printing	Требуется наличие нескольких сопел или материалов для печати различных элементов составных конструкций Multiple nozzles or materials are required to print various elements of composite structures
	3D-печать опалубки 3D printing of formwork	Сложность организации армирования с использованием металлических стержней или проволоки Difficulty in organizing reinforcement using metal rods or wire
		Сложность транспортировки и монтажа на строительной площадке Difficulty in transportation and installation on a construction site
		Требуется высокая сохраняемость тонкостенной опалубки под влиянием внешней среды High stability of thin-walled formwork under the influence of the external environment is required
	Торкретирование для 3D-печати (роботизированное торкретирование) Shotcrete for 3D printing (robotic shotcrete)	В геометрически сложных конструкциях возрастает сложность размещения арматуры In geometrically complex structures, the complexity of placing reinforcement is increased
Требуется исследование свойств конструкций, изготовленных методом торкретирования 3D-принтером A study of the properties of structures manufactured by shotcrete using a 3D printer is required		
Крупноразмерные системы 3D-печати (3D-принтеры) Large-scale 3D printing systems (3D printers)	Мобильная 3D-печать, передвижной 3D-принтер Mobile 3D printing, mobile 3D printer	1. Точность позиционирования и отклонения при печати протяженных слоев. 2. Сложность совмещения армирования, требований безопасности и погодных условий при организации печати 1. Positioning accuracy and deviations when printing extended layers. 2. The difficulty of combining reinforcement, safety requirements and weather conditions when organizing printing
	3D-печать системой робот-манипулятор 3D printing with a robotic arm system	Конфликт положения между элементами «руки» робота, напечатанными конструкциями и окружающей средой Position conflict between robot arm elements, printed structures, and the environment
	Портальные 3D-принтеры Portal 3D printers	1. Ресурсоемкость сборки/разборки принтера. 2. Ограниченная подвижность экструзионной головки 1. Resource-intensive assembly/disassembly of the printer. 2. Limited mobility of the extrusion head



Рис. 10. Примеры строительных объектов, напечатанных на 3D-принтере компаний Icon Corp. (a); Apis Cor (b) и Cobod Int. (c) [140–142]

Fig. 10. Example of 3D printed construction objects by Icon Corp. (a); Apis Cor (b) and Cobod Int. (c) [140–142]

сочетание экструзируемости и стойкость к оплыванию), особенности армирования (как в объеме слоя (введение фибры), так и устройство металлических элементов (стержней, проволоки и т.д.)) и прочности сцепления слоев (площади поверхности в зоне контакта). При этом усугубляющим фактором является отличие фактической геометрии слоя от проектной, усиливающее анизотропию свойств;

- несмотря на множество вариаций армирования конструкций лишь часть из них может быть автоматизирована и синхронизирована с процессом печати, что также требует совершенствования устройства принтеров для повышения эффективности 3D-печати;

- сложная оптимизация реологии бетонных смесей, особенно наполненных армирующими волокнами, дополняется факторами времени и меняющимися условиями окружающей среды, которые на текущем этапе развития технологии игнорируются или принимаются как незначимые.

В настоящее время одним из существенных вопросов, решение которого будет способствовать развитию технологии 3D-печати, является нормативное регулирование. В большинстве стран, где исследователи демонстрируют успехи в реализации 3D-печати, действующие стандарты формируют консервативную среду нормативного регулирования, ограничивающую внедрение нового подхода к возведению зданий. Несмотря на выдающиеся примеры строительства с использованием 3D-принтеров в США и Европе, таких компаний как Icon Corp., Cobod Int. или Apis Cor (рис. 10), использование таких объектов для жилого назначения без существенных изменений в системе регулирования целесообразнее в странах Африки и Азии, например в Эквадоре или Малайзии, где нормативное регулирование менее строгое [139].

В России уже введены нормативные стандарты, которые направлены в первую очередь на легитимизацию нового подхода к строительству — 3D-печати или аддитивного строительного производства. Новые ГОСТ 59095, 59096 и 59097 «Материалы для аддитивного строительного производства» устанавливают термины и определения, регла-

ментируют технические требования к материалам для 3D-печати и методы оценки их качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленный анализ дает возможность сделать выводы о том, что развитие технологии 3D-печати в настоящее время направлено на реализацию надежного масштабирования послойного способа возведения конструкций и его повторяемости с сохранением геометрии и свойств. Ключевые вопросы, которые при этом необходимо решать, связаны с удобоукладываемостью смеси, деформацией и прочностью экструдированного слоя.

Стандартное оборудование для 3D-печати состоит из четырех основных частей: управляющей системы, системы перемещения, системы подачи материала и узла экструдирования (сопла). При этом траектория движения сопла влияет на качество печати, поэтому разработка экструзионных устройств должна основываться на требованиях контролируемой подачи смеси.

Сегодня существует множество примеров составов, преимущественно тяжелого бетона, для 3D-принтеров различного устройства, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками. Усредненный состав такого бетона содержит по массе 25–45 % вяжущего вещества, как правило портландцемента; 40–65 % заполнителя, представляющего собой кварцевый песок с размером зерна 2–4 мм; воду в количестве не более 15–35 %; а также минеральные добавки, пластификатор и армирующие волокна.

Для повышения эксплуатационных свойств напечатанных конструкций требуется комплексный подход к оптимизации, который бы учитывал реологию смесей, способ армирования и прочность сцепления слоев с учетом изменяющихся внешних факторов.

Общая практика применения технологии 3D-печати, наряду с мелкоштучными архитектурными изделиями, обогащается примерами возведения полноразмерных строительных объектов — зданий в сборном и особенно монолитном исполнении. При этом масштабное внедрение технологии требует разработки методик печати элементов конструк-

ций с учетом анизотропии их свойств в зависимости от направления печати. Для повышения надежности

напечатанных конструкций требуется разработка автоматизированных методов армирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Научная электронная библиотека eLibrary.ru. URL: <https://www.elibrary.ru>
2. Scopus. URL: <https://www.scopus.com>
3. *Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J.* 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006
4. *Raphael B., Senthilnathan S., Patel A., Bhat S.* A review of concrete 3D printed structural members // *Frontiers in Built Environment*. 2023. Vol. 8. DOI: 10.3389/fbuil.2022.1034020
5. *Paul S.C., Zijl G.P.A.G., Tan M.J., Gibson I.* A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects // *Rapid Prototyping Journal*. 2018. Vol. 24. Issue 4. Pp. 784–798. DOI: 10.1108/RPJ-09-2016-0154
6. *Cao X., Yu S., Cui H., Li Z.* 3D printing devices and reinforcing techniques for extruded cement-based materials : a review // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 4. P. 453. DOI: 10.3390/buildings12040453
7. *Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А. и др.* 3D-печать в строительстве // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. № 1 (52). С. 27–46. DOI: 10.18720/CUBS.52.3. EDN YNESHX.
8. *Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К.* Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876
9. *Славчева Г.С.* Строительная 3D-печать сегодня: потенциал, проблемы и перспективы практической реализации // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 28–36. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36. EDN WACJMY.
10. *Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В.* Технология и контроль качества строительной 3D-печати // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. № 1 (59). С. 64–79. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_64. EDN BZJGUO.
11. *Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudilliere N., Dirrenberger J., Morel P.* Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete — A new processing route for architects and builders // *Material & Design*. 2016. Vol. 100. Pp. 102–109. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.097
12. *Panda B., Paul S.C., Hui L.J., Tay Y.W.D., Tan M.J.* Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 167. Pp. 281–288. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.165
13. *Anton A., Reiter L., Wangler T., Frangez V., Flatt R.J., Dillenburger B.* A 3D concrete printing pre-fabrication platform for bespoke columns // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 122. P. 103467. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103467
14. *Weng Y., Li M., Ruan S., Wong T.N., Tan M.J., Yeong K.L.O. et al.* Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 261. P. 121245. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121245
15. *Reiter L., Wangler T., Anton A., Flatt R.J.* Setting on demand for digital concrete — Principles, measurements, chemistry, validation // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 132. P. 106047. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106047
16. *Reiter L., Wangler T., Roussel N., Flatt R.J.* The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 86–95. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.011
17. *Ashrafi N., Duarte J.P., Nazarian S., Meisel N.A.* Evaluating the relationship between deposition and layer quality in large-scale additive manufacturing of concrete // *Virtual and Physical Prototyping*. 2018. Vol. 14. Issue 2. Pp. 135–140. DOI: 10.1080/17452759.2018.1532800
18. *Vantghem G., De Corte W., Shakour E., Amir O.* 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 112. P. 103084. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103084
19. *Furet B., Poullain P., Garnier S.* 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete // *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 28. Pp. 58–64. DOI: 10.1016/j.addma.2019.04.002
20. *Weng Y., Lu B., Li M., Liu Z., Tan M.-J., Qian S.* Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 189. Pp. 676–685. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.039
21. *Lim J.H., Weng Y., Pham Q.-C.* 3D printing of curved concrete surfaces using Adaptable Membrane Formwork // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 232. P. 117075. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117075
22. *Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., da Silva W.R.L., Nerella V.N., Fataei S. et al.* Extrusion-

based additive manufacturing with cement-based materials — Production steps, processes, and their underlying physics : a review // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 132. P. 106037. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106037

23. *Craveiro F., Nazarian S., Bartolo H., Bartolo P.J., Duarte J.P.* An automated system for 3D printing functionally graded concrete-based materials // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 33. P. 101146. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101146

24. *Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., Thorpe T.* Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // *Materials and Structures*. 2012. Vol. 45. Issue 8. Pp. 1221–1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z

25. D-Shape — steriolithography 3D printing technology. URL: <https://www.d-shape.com>

26. *Wolfs R.J.M.* 3D printing of concrete structures : MSc thesis. Department of Built Environment, Eindhoven University of Technology, 2015. 110 p.

27. *Pierre A., Lanos Ch., Estelle P.* Extension of spread-slump formulae for yield stress evaluation // *Applied Rheology*. 2013. Vol. 23. Issue 6. P. 63849. DOI: 10.3933/applrheol-23-63849

28. *Perrot D., Rangeard A.J.M., Pierre A.* Structural built-up of cement-based materials used for 3D printing extrusion techniques // *Materials and Structures*. 2016. Vol. 49. Issue 4. Pp. 1213–1220. DOI: 10.1617/s11527-015-0571-0

29. *Anell L.H.* Concrete 3D printer : MSc thesis. Civil Engineering, Lund University, Sweden, 2015. 77 p.

30. *Nerella V.N., Mechtcherine V.* Studying the printability of fresh concrete for formwork-free concrete onsite 3D printing technology (CONPrint3D) // *3D Concrete Printing Technology*. 2019. Pp. 333–347. DOI: 10.1016/b978-0-12-815481-6.00016-6

31. *Arunothayan A.R., Nematollahi B., Ranade R., Bong S.H., Sanjayan J.* Development of 3D printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 257. P. 119546. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119546

32. *Ding T., Xiao J., Zou S., Wang Y.* Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand // *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 113. P. 103724. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103724

33. *Hambach M., Volkmer D.* Properties of 3D printed fiber-reinforced portland cement paste // *Cement and Concrete Composites*. 2017. Vol. 79. Pp. 62–70. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001

34. *Grassi G., Spagnolo S.L., Paoletti I.* Fabrication and durability testing of a 3D printed facade for desert climates // *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 28. Pp. 439–444. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.023

35. *Strano M., Rane K., Herve G., Tosi A.* Determination of process induced dimensional variations of

ceramic parts, 3D printed by extrusion of a powder-binder feedstock // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 34. Pp. 560–565. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.220

36. *Villacis N., Gualavisi M., Narvaez-Munoz C., Carrion L., Loza-Matovelle D., Naranjo F.* Additive manufacturing of a theological characterized cement-based composite material // *Proceedings of the 2017 European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS)*. Bern, Switzerland, 2017. Pp. 326–331.

37. *Perrot A., Jacquet Y., Rangeard D., Courteille E., Sonebi M.* Nailing of layers: a promising way to reinforce concrete 3D printing structures // *Materials*. 2020. Vol. 13. P. 1518. DOI: 10.3390/ma13071518

38. *Asprone D., Auricchio F., Menna C., Mercuri V.* 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 165. Pp. 218–231. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018

39. *Tho T.P., Thinh N.T.* Using a cable-driven parallel robot with applications in 3D concrete printing // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 2. P. 563. DOI: 10.3390/app11020563

40. *Moieni M.A., Hosseinpoor M., Yahia A.* Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 257. P. 119551. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119551

41. *Visser C.R.* Mechanical and structural characterisation of extrusion moulded SHCC : MSc thesis. Stellenbosch : Stellenbosch University, 2007. 116 p.

42. *Kwon H., Bukkapatnam S., Khoshnevis B., Saito J.J.R.P.J.* Effects of orifice shape in contour crafting of ceramic materials // *Rapid Prototyping*. 2002. Vol. 8. Issue 3. Pp. 147–160. DOI: 10.1108/13552540210430988

43. *Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., El Zarwi N., Hamzeh F.* 3D concrete printing: machine and mix design // *International Journal of Civil Engineering*. 2015. Vol. 6. Issue 6. Pp. 14–22.

44. *Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F. et al.* Hardened properties of high-performance printing concrete // *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42. Pp. 558–666. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003

45. *Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G.F. et al.* Development in construction-scale additive manufacturing processes // *Automation in Construction*. 2012. Vol. 21. Issue 1. Pp. 262–268. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010

46. *El Cheikh K., Remond S., Khalil N., Aouad G.* Numerical and experimental studies of aggregate blocking in mortar extrusion // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 145. Pp. 452–463. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.032

47. *Olivas A., Hesel M.A., Martys N., Ferraris C., George W.L., Ferron R.* Rheological measurement of

suspensions without slippage: Experiment and model. National Institute of Standards and Technology, 2016. DOI: 10.6028/NIST.TN.1946

48. *Soltan D.G., Li V.C.* A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing // *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 90. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017

49. *Vergara L.A., Colorado H.A.* Additive manufacturing of Portland cement pastes with additions of kaolin, super plasticant and calcium carbonate // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 248. P. 118669. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118669

50. *Panda B., Singh G.V.P.B., Unluer C., Tan M.-J.* Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion based 3D concrete printing // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 220. Pp. 610–619. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.185

51. *Alchaar A.S., Al-Tamimi A.K.* Mechanical properties of 3D printed concrete in hot temperatures // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 266. P. 120991. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120991

52. *Nair S.A.O., Panda S., Santhanam M., Sant G., Neithalath N.* A critical examination of the influence of material characteristics and extruder geometry on 3D printing of cementitious binders // *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 112. P. 103671. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103671

53. *He L., Chow W.T., Li H.* Effects of interlayer notch and shear stress on interlayer strength of 3D printed cement paste // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 36. P. 101390. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101390

54. *Bong S.H., Nematollahi B., Nazari A., Xia M., Sanjayan J.* Method of optimisation for ambient temperature cured sustainable geopolymers for 3D printing construction applications // *Materials*. 2019. Vol. 12. P. 902. DOI: 10.3390/ma12060902

55. *Li Z., Wang L., Ma G.* Mechanical improvement of continuous steel microcable reinforced geopolymer composites for 3D printing subjected to different loading conditions // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 187. P. 107796. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107796

56. *Lin J.C., Wang J., Wu X., Yang W., Zhao R.X., Bao M.* Effect of processing parameters on 3d printing of cement based materials // *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 38. P. 03008. DOI: 10.1051/e3s-conf/20183803008

57. *Krishnaraja A.R., Guru K.V.* 3D printing concrete : a review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1055. P. 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/1055/1/012033

58. *Rehman A.U., Kim J.-H.* 3D concrete printing: a systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics // *Materials*. 2021. Vol. 14. P. 3800. DOI: 10.3390/ma14143800

59. *Marchon D., Kawashima S., Bessaies-Bey H., Mantellato S., Ng S.* Hydration and rheology control of

concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. Pp. 96–110. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.014

60. *Qian Y., De Schutter G.* Enhancing thixotropy of fresh cement pastes with nanoclay in presence of polycarboxylate ether superplasticizer (PCE) // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 111. Pp. 15–22. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.06.013

61. *Lee H., Kim J.-H.J., Moon J.-H., Kim W.-W., Seo E.-A.* Experimental analysis on rheological properties for control of concrete extrudability // *Advances in Concrete Construction*. 2020. Vol. 9. Pp. 93–102. DOI: 10.12989/acc.2020.9.1.093

62. *Rahul A.V., Santhanam M.* Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates // *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 109. P. 103570. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103570

63. *Mechtcherine V., Nerella V.N., Will F., Nather M., Otto J., Krause M.* Large-scale digital concrete construction — CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D printing // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 107. P. 102933. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102933

64. *Nerella V.N., Beigh M.A.B., Fataei S., Mechtcherine V.* Strain-based approach for measuring structural build-up of cement pastes in the context of digital construction // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 115. Pp. 530–544. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.08.003

65. *Bong S.H., Nematollahi B., Nazari A., Xia M., Sanjayan J.G.* Fresh and hardened properties of 3D printable geopolymer cured in ambient temperature // In *Proceedings of the RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Zurich, Switzerland, 2018*. Pp. 3–11.

66. *Tay Y.W.D., Qian Y., Tan M.J.* Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 174. P. 106968. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106968

67. *Zhang Y., Zhang Y., Liu G., Yang Y., Wu M., Pang B.* Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 174. Pp. 263–271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115

68. *Kruger J., Zeranka S., van Zijl G.* An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 224. Pp. 372–386. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.078

69. *Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B.* Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 145. Pp. 639–647.

70. Jiao D., Shi C., Yuan Q., An X., Liu Y., Li H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete : a review // *Cement and Concrete Composites*. 2017. Vol. 83. Pp. 146–159. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016

71. Zhang Ch., Nerella V.N., Krishna A., Wang Sh., Zhang Y., Mechtcherine V. et al. Mix design concepts for 3D printable concrete : a review // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 122. P. 104155. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104155

72. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Высокопрочные легкие бетоны : монография. СПб. : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. 192 с. EDN UCJRAZ.

73. Inozemtcev A., Korolev E., Duong T.Q. Lightweight concrete for 3D printing with internal curing agent for Portland cement hydration // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. No. 1 (109). P. 10915. DOI: 10.34910/MCE.109.15. EDN EPQPUI.

74. Королев Е.В., Зыонг Т.К., Иноземцев А.С. Способ обеспечения внутреннего ухода за гидратацией цемента в составах для 3D-печати // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 6. С. 834–846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846

75. Inozemtcev A., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D printing in construction on the example of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete // *E3S Web of Conferences*. 2019. P. 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/20199702010

76. Weng Y., Li M., Tan M.J., Qian S. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 163. Pp. 600–610. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112

77. Mahaut F., Mokeddem S., Chateau X., Roussel N., Ovarlez G. Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials // *Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38. Issue 11. Pp. 1276–1285. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.06.001

78. Toutou Z., Roussel N. Multi scale experimental study of concrete rheology: from water scale to gravel scale // *Materials and Structures*. 2006. Vol. 39. Issue 2. Pp. 189–199. DOI: 10.1617/s11527-005-9047-y

79. Noor M.A., Uomoto T. Rheology of high flowing mortar and concrete // *Materials and Structures*. 2004. Vol. 37. Issue 272. Pp. 513–521. DOI: 10.1617/13965

80. Wangler T., Lloret E., Reiter L., Hack N., Gramazio F., Kohler M. et al. Digital concrete: opportunities and challenges // *RILEM Technical Letters*. 2016. Vol. 1. Pp. 67–75. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2016.16

81. Weng Y., Lu B., Li M., Liu Z., Tan M.J., Qian S. Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 189. Pp. 676–685. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.039

82. Chen M., Li L., Zheng Y., Zhao P., Lu L., Cheng X. Rheological and mechanical properties of admixtures modified 3D printing sulphoaluminate cementitious materials // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 189. Pp. 601–611. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.037

83. Roussel N., Ovarlez G., Garrault S., Brumaud C. The origins of thixotropy of fresh cement pastes // *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42. Issue 1. Pp. 148–157. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.09.004

84. Ma G., Li Y., Wang L., Zhang J., Li Z. Real-time quantification of fresh and hardened mechanical property for 3D printing material by intellectualization with piezoelectric transducers // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 241. P. 117982. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117982

85. Wang L., Tian Z., Ma G., Zhang M. Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar: Experiments and molecular dynamics studies // *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 110. P. 103571. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103571

86. Suiker A.S.J., Wolfs R.J.M., Lucas S.M., Salet T.A.M. Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 135. P. 106016. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106016

87. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing // *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 104. P. 103344. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103344

88. Chen Y., Figueiredo S.C., Li Z., Chang Z., Jansen K., Copuroglu O. et al. Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 132. P. 106040. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106040

89. Vaitkevicius V., Serelis E., Kersevicius V. Effect of ultra-sonic activation on early hydration process in 3D concrete printing technology // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 169. Pp. 354–363. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.007

90. Xiao J., Zou S., Yu Y., Wang Y., Ding T., Zhu Y. et al. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 32. P. 101779. DOI: 10.1016/j.job.2020.101779

91. Perrot A., Rangeard D. 3D printing in concrete: techniques for extrusion/casting // *3D Printing of Concrete*. 2019. Pp. 41–72.

92. Баженев Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны. М. : Изд-во АСВ, 2006. 368 с. EDN QNMNZZ.

93. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K.F., Tan M.J. et al. A systematical review of 3D printable cementitious materials // *Construction and Building Ma-*

- terials. 2019. Vol. 207. Pp. 477–490. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144
94. *Wangler T.* Digital concrete: research and applications // Proceedings of the 10th International Concrete Congress. 2019. Vol. 35. Pp. 2–12.
95. *Al Rashid A., Khan S.A., Al-Ghamdi S.G., Koc M.* Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment // Automation in Construction. 2020. Vol. 118. P. 103268. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103268
96. *Roussel N.* A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications // Cement and Concrete Research. 2006. Vol. 36. Pp. 1797–1806. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.05.025
97. *Panda B., Unluer C., Tan M.J.* Investigation of the rheology and strength of geopolymers for extrusion-based 3D printing // Cement and Concrete Composites. 2018. Vol. 94. Pp. 307–314. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.10.002
98. *Panda B., Tan M.J.* Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing // Ceramics International. 2018. Vol. 44. Pp. 10258–10265. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.03.031
99. *Rahul A.V., Santhanam M., Meena H., Ghani Z.* 3D printable concrete: Mixture design and test methods // Cement and Concrete Composites. 2019. Vol. 97. Pp. 13–23. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014
100. *Nerella V., Nather M., Iqbal A., Butler M., Mechtcherine V.J.C.* Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction // Cement and Concrete Composites. 2019. Vol. 95. Pp. 260–270. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.09.015
101. *Panda B., Mohamed N., Ahamed N., Paul S.C., Bhagath Singh G., Tan M.J. et al.* The effect of material fresh properties and process parameters on buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete // Materials. 2019. Vol. 12. P. 2149. DOI: 10.3390/ma12132149
102. *Chen M., Yang L., Zheng Y., Huang Y., Li L., Zhao P. et al.* Yield stress and thixotropy control of 3D printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 252. P. 119090. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119090
103. *Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G., Thorpe T.J.M.* Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // Materials and Structures. 2012. Vol. 45. Pp. 1221–1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z
104. *Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L., Liu G., Yang Y.* Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 201. Pp. 278–285. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061
105. *Keita E., Bessaies-Bey H., Zuo W., Belin P., Roussel N.* Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: Measurement and physical origin // Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 123. P. 105787. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105787
106. *Kruger J., Cho S., Zeranka S., Viljoen C., van Zijl G.* 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse // Composites Part B: Engineering. 2020. Vol. 183. P. 107660. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107660
107. *Jolin M., Burns D., Bissonnette B., Gagnon F., Bolduc L.S.* Understanding the pumpability of concrete // Proceedings for the conference Shotcrete for Underground Support (XI). Davos, Switzerland. 2009.
108. *Mechtcherine V., Nerella V.N., Kasten K.* Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 53. Pp. 312–323. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.037
109. *Tay Y.W.D., Qian Y., Tan M.J.* Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 174. P. 106968. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106968
110. *Thrane L.N., Pade C., Nielsen C.V.* Determination of rheology of self-consolidating concrete using the 4C-Rheometer and how to make use of the results // Journal of ASTM International. 2009. Vol. 7. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1520/JAI102003
111. *Mohan M.K., Rahul A.V., Van Tittelboom K., De Schutter G.* Evaluating the influence of aggregate content on pumpability of 3D printable concrete // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 333–341.
112. *Mohan M.K., Rahul A.V., Van Tittelboom K., De Schutter G.* Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content // Cement and Concrete Research. 2021. Vol. 139. P. 106258. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106258
113. *Matthaus C., Back D., Weger D., Krankel T., Scheydt J., Gehlen C.* Effect of cement type and limestone powder content on extrudability of lightweight concrete // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 312–322.
114. *Zhou C., Chen R., Xu J., Ding L., Luo H., Fan J. et al.* In-situ construction method for lunar habitation: Chinese Super Mason // Automation in Construction. 2019. Vol. 104. Pp. 66–79. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.03.024
115. *Burry J., Sabin J.E., Sheil B., Skavara M.* Fabricate 2020. UCL Press: London, UK. 2020. 140 p.
116. *Jeong H., Han S.-J., Choi S.-H., Lee Y.J., Yi S.T., Kim K.S.* Rheological property criteria for buildable 3D printing concrete // Materials. 2019. Vol. 12. P. 657. DOI: 10.3390/ma12040657
117. *Panda B., Paul S.C., Mohamed N.A.N., Tay Y.W.D., Tan M.J.* Measurement of tensile bond

strength of 3D printed geopolymers mortar // Measurement. 2018. Vol. 113. Pp. 108–116. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.08.051

118. *Zareiyani B., Khoshnevis B.* Interlayer adhesion and strength of structures in contour crafting — effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thickness // Automation in Construction. 2017. Vol. 81. Pp. 112–121. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.06.013

119. *Katzer J., Szatkiewicz T.* Properties of concrete elements with 3D printed formworks which substitute steel reinforcement // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 210. Pp. 157–161. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.204

120. *Salazar B., Aghdasi P., Williams I.D., Ostertag C.P., Taylor H.K.* Polymer lattice-reinforcement for enhancing ductility of concrete // Materials & Design. 2020. Vol. 196. P. 109184. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109184

121. *Sanjayan J.G., Nematollahi B., Xia M., Marchment T.* Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 172. Pp. 468–475. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232

122. *Van Der Putten J., Deprez M., Cnudde V., De Schutter G., Van Tittelboom K.* Microstructural characterization of 3D printed cementitious materials // Materials. 2019. Vol. 12. P. 2993. DOI: 10.3390/ma12182993

123. *Van Der Putten J., De Schutter G., Van Tittelboom K.* Surface modification as a technique to improve inter-layer bonding strength in 3D printed cementitious materials // RILEM Technical Letters. 2019. Vol. 4. Pp. 33–38.

124. *Ma G., Li Z., Wang L., Wang F., Sanjayan J.* Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 202. Pp. 770–783. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008

125. *Ogura H., Nerella V.N., Mechtcherine V.* Developing and testing of strain-hardening cement-based composites (SHCC) in the context of 3D printing // Materials. 2018. Vol. 11. P. 1375. DOI: 10.3390/ma11081375

126. *Farina I., Fabbrocino F., Carpentieri G., Modano M., Amendola A., Goodall R. et al.* On the reinforcement of cement mortars through 3D printed polymeric and metallic fibers // Composites Part B: Engineering. 2016. Vol. 90. Pp. 76–85. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.12.006

127. *Rubio M., Sonebi M., Amziane S.* Fresh and rheological properties of 3D printing bio-cement-based materials // Academic Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 35. Pp. 283–290.

128. *Bos F.P., Ahmed Z.Y., Wolfs R.J., Salet T.A.* 3D printing concrete with reinforcement // High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet. 2018. Pp. 2484–2493.

129. *Bos F.P., Ahmed Z.Y., Jutinov E.R., Salet T.A.M.* Experimental exploration of metal cable as

reinforcement in 3D printed concrete // Materials. 2017. Vol. 10. P. 1314. DOI: 10.3390/ma10111314

130. *Mechtcherine V., Michael A., Liebscher M., Schmeier T.* Extrusion-based additive manufacturing with carbon reinforced concrete: concept and feasibility study // Materials. 2020. Vol. 13. P. 2568. DOI: 10.3390/ma13112568

131. *Bos F., Dezaire S., Ahmed Z., Hoekstra A., Salet T.* Bond of reinforcement cable in 3D printed concrete // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 584–600.

132. *Bester F., van den Heever M., Kruger J., Cho S., van Zijl G.* Steel fiber links in 3D printed concrete // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 398–406.

133. *Geneidy O., Kumarji S., Dubor A., Sollazzo A.* Simultaneous reinforcement of concrete while 3D printing // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 895–905.

134. *Marchment T., Sanjayan J.* Penetration reinforcing method for 3D concrete printing // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 680–690.

135. *Marchment T., Sanjayan J.* Mesh reinforcing method for 3D concrete printing // Automation in Construction. 2020. Vol. 109. P. 102992. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102992

136. *Wang W., Konstantinidis N., Austin S.A., Buswell R.A., Cavalaro S., Cecinia D.* Flexural behaviour of AR-glass textile reinforced 3D printed concrete beams // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. 2020. Pp. 728–737.

137. *Lin A., Tan Y.K., Wang C.-H., Kua H.W., Taylor H.* Utilization of waste materials in a novel mortar-polymer laminar composite to be applied in construction 3D printing // Composite Structures. 2020. Vol. 253. P. 112764. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112764

138. *Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V.N., Spaniol E., Hertel M., Fussel U.* 3D printed steel reinforcement for digital concrete construction — Manufacture, mechanical properties and bond behavior // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 179. Pp. 125–137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202

139. Regulation and permitting for 3D printed construction — automate construction. URL: <https://automate.construction/2020/03/29/regulation-and-permitting-for-3d-printed-construction>

140. ICON — 3D Technology. ICON develops advanced construction technologies that advance humanity by using 3D printing robotics, software and advanced materials. URL: <https://www.iconbuild.com>

141. Apis Cor. We print buildings. URL: <https://apis-cor.com>

142. COBOD. COBOD is the world leader in 3D construction printing solutions. We are continuously adding wider automation and robotics to construction. URL: <https://cobod.com>

Поступила в редакцию 11 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 1 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Александр Сергеевич Иноземцев — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2444-1204, Scopus: 55889834500, ResearcherID: K-6341-2013, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemcevAS@mgsu.ru.

REFERENCES

1. *Scientific electronic library eLibrary.ru*. URL: <https://www.elibrary.ru> (rus.).
2. *Scopus*. URL: <https://www.scopus.com>
3. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018; 112:37-49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006
4. Raphael B., Senthilnathan S., Patel A., Bhat S. A review of concrete 3D printed structural members. *Frontiers in Built Environment*. 2023; 8. DOI: 10.3389/fbuil.2022.1034020
5. Paul S.C., Zijl G.P.A.G., Tan M.J., Gibson I. A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects. *Rapid Prototyping Journal*. 2018; 24(4):784-798. DOI: 10.1108/RPJ-09-2016-0154
6. Cao X., Yu S., Cui H., Li Z. 3D Printing Devices and Reinforcing Techniques for Extruded Cement-Based Materials : a review. *Buildings*. 2022; 12(4):453. DOI: 10.3390/buildings12040453
7. Vatin N., Chumadova L., Goncharov I., Zyкова V., Karpenya A., Kim A. et al. 3D printing in construction. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017; 1(52):27-46. DOI: 10.18720/CUBS.52.3. EDN YNESHX. (rus.).
8. Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Duong Thanh Qui. Analysis of existing technological solutions of 3D printing in construction. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(7):(118):863-876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876 (rus.).
9. Slavcheva G.S. 3D-build printing today: potential, challenges and prospects for implementation. *Construction Materials*. 2021; 5:28-36. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36. EDN WACJMY. (rus.).
10. Mukhametrakhimov R.Kh., Ziganshina L.V. Technology and quality control of 3DCP. *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022; 1(59):64-79. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_64. EDN BZJGUO. (rus.).
11. Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudilliere N., Dirrenberger J., Morel P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete — A new processing route for architects and builders. *Material & Design*. 2016; 100:102-109. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.097
12. Panda B., Paul S.C., Hui L.J., Tay Y.W.D., Tan M.J. Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 167:281-288. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.165
13. Anton A., Reiter L., Wangler T., Frangez V., Flatt R.J., Dillenburger B. A 3D concrete printing pre-fabrication platform for bespoke columns. *Automation in Construction*. 2020; 122:103467. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103467
14. Weng Y., Li M., Ruan S., Wong T.N., Tan M.J., Yeong K.L.O. et al. Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a pre-cast approach. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 261:121245. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121245
15. Reiter L., Wangler T., Anton A., Flatt R.J. Setting on demand for digital concrete — Principles, measurements, chemistry, validation. *Cement and Concrete Research*. 2020; 132:106047. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106047
16. Reiter L., Wangler T., Roussel N., Flatt R.J. The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research*. 2018; 112:86-95. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.011
17. Ashrafi N., Duarte J.P., Nazarian S., Meisel N.A. Evaluating the relationship between deposition and layer quality in large-scale additive manufacturing of concrete. *Virtual and Physical Prototyping*. 2018; 14(2):135-140. DOI: 10.1080/17452759.2018.1532800
18. Vantighem G., De Corte W., Shakour E., Amir O. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization. *Automation in*

Construction. 2020; 112:103084. DOI: 10.1016/j.aut-con.2020.103084

19. Furet B., Poullain P., Garnier S. 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete. *Additive Manufacturing*. 2019; 28:58-64. DOI: 10.1016/j.addma.2019.04.002

20. Weng Y., Lu B., Li M., Liu Z., Tan M.-J., Qian S. Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2018; 189:676-685. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.039

21. Lim J.H., Weng Y., Pham Q.-C. 3D printing of curved concrete surfaces using Adaptable Membrane Formwork. *Construction and Building Materials*. 2020; 232:117075. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117075

22. Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., da Silva W.R.L., Nerella V.N., Fataei S. et al. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials — Production steps, processes, and their underlying physics : a review. *Cement and Concrete Research*. 2020; 132:106037. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106037

23. Craveiro F., Nazarian S., Bartolo H., Bartolo P.J., Duarte J.P. An automated system for 3D printing functionally graded concrete-based materials. *Additive Manufacturing*. 2020; 33:101146. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101146

24. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*. 2012; 45(8):1221-1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z

25. *D-Shape — steriolithography 3D printing technology*. URL: <https://www.d-shape.com>

26. Wolfs R.J.M. *3D Printing of Concrete Structures : MSc thesis*. Department of Built Environment, Eindhoven University of Technology, 2015; 110.

27. Pierre A., Lanos Ch., Estelle P. Extension of spread-slump formulae for yield stress evaluation. *Applied Rheology*. 2013; 23(6):63849. DOI: 10.3933/applrheol-23-63849

28. Perrot D., Rangeard A.J.M., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D printing extrusion techniques. *Materials and Structures*. 2016; 49(4):1213-1220. DOI: 10.1617/s11527-015-0571-0

29. Anell L.H. *Concrete 3D printer : MSc thesis*. Civil Engineering, Lund University, Wseden, 2015; 77.

30. Nerella V.N., Mechtcherine V. Studying the printability of fresh concrete for formwork-free concrete onsite 3D printing technology (CONPrint3D). *3D Concrete Printing Technology*. 2019; 333-347. DOI: 10.1016/b978-0-12-815481-6.00016-6

31. Arunothayan A.R., Nematollahi B., Ranade R., Bong S.H., Sanjayan J. Development of 3D printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. *Construction and Building Materials*. 2020; 257:119546. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119546

32. Ding T., Xiao J., Zou S., Wang Y. Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 113:103724. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103724

33. Hambach M., Volkmer D. Properties of 3D printed fiber-reinforced portland cement paste. *Cement and Concrete Composites*. 2017; 79:62-70. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001

34. Grassi G., Spagnolo S.L., Paoletti I. Fabrication and durability testing of a 3D printed façade for desert climates. *Additive Manufacturing*. 2019; 28:439-444. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.023

35. Strano M., Rane K., Herve G., Tosi A. Determination of process induced dimensional variations of ceramic parts, 3D printed by extrusion of a powder-binder feedstock. *Procedia Manufacturing*. 2019; 34:560-565. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.220

36. Villacis N., Gualavisi M., Narvaez-Munoz C., Carrion L., Loza-Matovelle D., Naranjo F. Additive manufacturing of a theological characterized cement-based composite material. *Proceedings of the 2017 European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS)*. 2017; 326-331.

37. Perrot A., Jacquet Y., Rangeard D., Courteille E., Sonebi M. Nailing of layers: a promising way to reinforce concrete 3D printing structures. *Materials*. 2020; 13:1518. DOI: 10.3390/ma13071518

38. Asprone D., Auricchio F., Menna C., Mercuri V. 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *Construction and Building Materials*. 2018; 165:218-231. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018

39. Tho T.P., Thinh N.T. Using a Cable-Driven Parallel Robot with Applications in 3D Concrete Printing. *Applied Sciences*. 2021; 11(2):563. DOI: 10.3390/app11020563

40. Moeini M.A., Hosseinpoor M., Yahia A. Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2020; 257:119551. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119551

41. Visser C.R. *Mechanical and structural characterisation of extrusion moulded SHCC : MSc thesis*. Stellenbosch, Stellenbosch University, 2007.

42. Kwon H., Bukkapatnam S., Khoshnevis B., Saito J.J.R.P.J. Effects of orifice shape in contour crafting of ceramic materials. *Rapid Prototyping*. 2002; 8(3):147-160. DOI: 10.1108/13552540210430988

43. Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., El Zarwi N., Hamzeh F. 3D concrete printing: machine and mix design. *International Journal of Civil Engineering*. 2015; 6(6):14-22.

44. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42:558-666. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003

45. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Development in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*. 2012; 21(1):262-268. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.06.010
46. El Cheikh K., Remond S., Khalil N., Auouad G. Numerical and experimental studies of aggregate blocking in mortar extrusion. *Construction and Building Materials*. 2017; 145:452-463. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.032
47. Olivas A., Helsel M.A., Martys N., Ferraris C., George W.L., Ferron R. *Rheological Measurement of Suspensions Without Slippage: Experiment and Model*. National Institute of Standards and Technology, 2016. DOI: 10.6028/NIST.TN.1946
48. Soltan D.G., Li V.C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. *Cement and Concrete Composites*. 2018; 90:1-13. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017
49. Vergara L.A., Colorado H.A. Additive manufacturing of Portland cement pastes with additions of kaolin, super plasticant and calcium carbonate. *Construction and Building Materials*. 2020; 248:118669. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118669
50. Panda B., Singh G.V.P.B., Unluer C., Tan M.-J. Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion based 3D concrete printing. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 220:610-619. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.185
51. Alchaar A.S., Al-Tamimi A.K. Mechanical properties of 3D printed concrete in hot temperatures. *Construction and Building Materials*. 2020; 266:120991. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120991
52. Nair S.A.O., Panda S., Santhanam M., Sant G., Neithalath N. A critical examination of the influence of material characteristics and extruder geometry on 3D printing of cementitious binders. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 112:103671. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103671
53. He L., Chow W.T., Li H. Effects of interlayer notch and shear stress on interlayer strength of 3D printed cement paste. *Additive Manufacturing*. 2020; 36:101390. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101390
54. Bong S.H., Nematollahi B., Nazari A., Xia M., Sanjayan J. Method of optimisation for ambient temperature cured sustainable geopolymers for 3D printing construction applications. *Materials*. 2019; 12:902. DOI: 10.3390/ma12060902
55. Li Z., Wang L., Ma G. Mechanical improvement of continuous steel microcable reinforced geopolymer composites for 3D printing subjected to different loading conditions. *Composites Part B: Engineering*. 2020; 187:107796. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107796
56. Lin J.C., Wang J., Wu X., Yang W., Zhao R.X., Bao M. Effect of processing parameters on 3D printing of cement based materials. *E3S Web of Conferences*. 2018; 38:03008. DOI: 10.1051/e3sconf/20183803008
57. Krishnaraja A.R., Guru K.V. 3D Printing Concrete : a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1055:012033. DOI: 10.1088/1757-899X/1055/1/012033
58. Rehman A.U., Kim J.-H. 3D concrete printing: a systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics. *Materials*. 2021; 14:3800. DOI: 10.3390/ma14143800
59. Marchon D., Kawashima S., Bessaies-Bey H., Mantellato S., Ng S. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 112:96-110. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.014
60. Qian Y., De Schutter G. Enhancing thixotropy of fresh cement pastes with nanoclay in presence of polycarboxylate ether superplasticizer (PCE). *Cement and Concrete Research*. 2018; 111:15-22. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.06.013
61. Lee H., Kim J.-H. J., Moon J.-H., Kim W.-W., Seo E.-A. Experimental analysis on rheological properties for control of concrete extrudability. *Advances in Concrete Construction*. 2020; 9:93-102. DOI: 10.12989/acc.2020.9.1.093
62. Rahul A.V., Santhanam M. Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 109:103570. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103570
63. Mechtcherine V., Nerella V.N., Will F., Nather M., Otto J., Krause M. Large-scale digital concrete construction — CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D printing. *Automation in Construction*. 2019; 107:102933. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102933
64. Nerella V.N., Beigh M.A.B., Fataei S., Mechtcherine V. Strain-based approach for measuring structural build-up of cement pastes in the context of digital construction. *Cement and Concrete Research*. 2019; 115:530-544. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.08.003
65. Bong S.H., Nematollahi B., Nazari A., Xia M., Sanjayan J.G. Fresh and hardened properties of 3D printable geopolymer cured in ambient temperature. *Proceedings of the RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2018; 3-11.
66. Tay Y.W.D., Qian Y., Tan M.J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 174:106968. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106968
67. Zhang Y., Zhang Y., Liu G., Yang Y., Wu M., Pang B. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. *Construction and Building Materials*. 2018; 174:263-271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115
68. Kruger J., Zeranka S., van Zijl G. An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete. *Construction and Building Materials*. 2019; 224:372-386. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.078
69. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D

printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*. 2017; 145:639-647.

70. Jiao D., Shi C., Yuan Q., An X., Liu Y., Li H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete : a review. *Cement and Concrete Composites*. 2017; 83:146-159. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016

71. Zhang Ch., Nerella V.N., Krishna A., Wang Sh., Zhang Y., Mechtcherine V. et al. Mix design concepts for 3D printable concrete : a review. *Cement and Concrete Composites*. 2021; 122:104155. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104155

72. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. *High-strength lightweight concrete*. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2022; 192. EDN UCJRAZ. (rus.).

73. Inozemtcev A., Korolev E., Duong T.Q. Lightweight concrete for 3D printing with internal curing agent for Portland cement hydration. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 1(109):10915. DOI: 10.34910/MCE.109.15. EDN EPQPUI.

74. Korolev E.V., Thanh Qui Duong, Inozemtcev A.S. Method of internal care of cement hydration in 3D printing formulations. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(6):834-846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846 (rus.).

75. Inozemtcev A., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D printing in construction on the example of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete. *E3S Web of Conferences*. 2019; 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/20199702010

76. Weng Y., Li M., Tan M.J., Qian S. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. *Construction and Building Materials*. 2018; 163:600-610. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112

77. Mahaut F., Mokeddem S., Chateau X., Roussel N., Ovarlez G. Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 2008; 38(11):1276-1285. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.06.001

78. Toutou Z., Roussel N. Multi scale experimental study of concrete rheology: from water scale to gravel scale. *Materials and Structures*. 2006; 39(2):189-199. DOI: 10.1617/s11527-005-9047-y

79. Noor M.A., Uomoto T. Rheology of high flowing mortar and concrete. *Materials and Structures*. 2004; 37(272):513-521. DOI: 10.1617/13965

80. Wangler T., Lloret E., Reiter L., Hack N., Gramazio F., Kohler M. et al. Digital concrete: opportunities and challenges. *RILEM Technical Letters*. 2016; 1:67-75. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2016.16

81. Weng Y., Lu B., Li M., Liu Z., Tan M.J., Qian S. Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2018; 189:676-685. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.039

82. Chen M., Li L., Zheng Y., Zhao P., Lu L., Cheng X. Rheological and mechanical properties of admixtures modified 3D printing sulphoaluminate cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2018; 189:601-611. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.037

83. Roussel N., Ovarlez G., Garrault S., Brumaud C. The origins of thixotropy of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(1):148-157. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.09.004

84. Ma G., Li Y., Wang L., Zhang J., Li Z. Real-time quantification of fresh and hardened mechanical property for 3D printing material by intellectualization with piezoelectric transducers. *Construction and Building Materials*. 2020; 241:117982. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117982

85. Wang L., Tian Z., Ma G., Zhang M. Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar: Experiments and molecular dynamics studies. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 110:103571. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103571

86. Suiker A.S.J., Wolfs R.J.M., Lucas S.M., Salet T.A.M. Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing. *Cement and Concrete Research*. 2020; 135:106016. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106016

87. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*. 2019; 104:103344. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103344

88. Chen Y., Figueiredo S.C., Li Z., Chang Z., Jansen K., Copuroglu O. et al. Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture. *Cement and Concrete Research*. 2020; 132:106040. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106040

89. Vaitkevicius V., Serelis E., Kersevicius V. Effect of ultra-sonic activation on early hydration process in 3D concrete printing technology. *Construction and Building Materials*. 2018; 169:354-363. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.007

90. Xiao J., Zou S., Yu Y., Wang Y., Ding T., Zhu Y. et al. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing. *Journal of Building Engineering*. 2020; 32:101779. DOI: 10.1016/j.job.2020.101779

91. Perrot A., Rängeard D. 3D printing in concrete: techniques for extrusion/casting. *3D Printing of Concrete*. Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA, 2019; 41-72.

92. Bazhenov Yu.M. *Modified high quality concretes*. Moscow, ASV publisher, 2006; 368. EDN QNMNZZ. (rus.).

93. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K.F., Tan M.J., et al. A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2019; 207:477-490. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144

94. Wangler T. Digital concrete: research and applications. *Proceedings of the 10th International Concrete Congress*. 2019; 35:2-12.
95. Al Rashid A., Khan S.A., Al-Ghamdi S.G., Koc M. Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. *Automation in Construction*. 2020; 118:103268. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103268
96. Roussel N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*. 2006; 36:1797-1806. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.05.025
97. Panda B., Unluer C., Tan M.J. Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing. *Cement and Concrete Composites*. 2018; 94:307-314. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.10.002
98. Panda B., Tan M.J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. *Ceramics International*. 2018; 44:10258-10265. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.03.031
99. Rahul A.V., Santhanam M., Meena H., Ghani Z. 3D printable concrete: Mixture design and test methods. *Cement and Concrete Composites*. 2019; 97:13-23. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014
100. Nerella V., Nather M., Iqbal A., Butler M., Mechtcherine V.J.C. Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction. *Cement and Concrete Composites*. 2019; 95:260-270. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.09.015
101. Panda B., Mohamed N., Ahamed N., Paul S.C., Bhagath Singh G., Tan M.J. et al. *The effect of material fresh properties and process parameters on buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete*. *Materials*. 2019; 12:2149. DOI: 10.3390/ma12132149
102. Chen M., Yang L., Zheng Y., Huang Y., Li L., Zhao P. et al. Yield stress and thixotropy control of 3D printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up. *Construction and Building Materials*. 2020; 252:119090. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119090
103. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G., Thorpe T.J.M. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*. 2012; 45:1221-1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z
104. Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L., Liu G., Yang Y. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials*. 2019; 201:278-285. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061
105. Keita E., Bessaies-Bey H., Zuo W., Belin P., Roussel N. Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: Measurement and physical origin. *Cement and Concrete Research*. 2019; 123:105787. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105787
106. Kruger J., Cho S., Zeranka S., Viljoen C., van Zijl G. 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse. *Composites Part B: Engineering*. 2020; 183:107660. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107660
107. Jolin M., Burns D., Bissonnette B., Gagnon F., Bolduc L.S. Understanding the pumpability of concrete. *Proceedings for the conference Shotcrete for Underground Support (XI)*. Davos, Switzerland, 2009.
108. Mechtcherine V., Nerella V.N., Kasten K. Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer. *Construction and Building Materials*. 2014; 53:312-323. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.037
109. Tay Y.W.D., Qian Y., Tan M.J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 174:106968. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106968
110. Thrane L.N., Pade C., Nielsen C.V. Determination of rheology of self-consolidating concrete using the 4C-Rheometer and how to make use of the results. *Journal of ASTM International*. 2009; 7(1):1-10. DOI: 10.1520/JAI102003
111. Mohan M.K., Rahul A.V., Van Tittelboom K., De Schutter G. Evaluating the influence of aggregate content on pumpability of 3D printable concrete. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 333-341.
112. Mohan M.K., Rahul A.V., Van Tittelboom K., De Schutter G. Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content. *Cement and Concrete Research*. 2021; 139:106258. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106258
113. Matthaus C., Back D., Weger D., Krankel T., Scheydt J., Gehlen C. Effect of cement type and limestone powder content on extrudability of lightweight concrete. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 312-322.
114. Zhou C., Chen R., Xu J., Ding L., Luo H., Fan J. et al. In-situ construction method for lunar habitation: Chinese Super Mason. *Automation in Construction*. 2019; 104:66-79. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.03.024
115. Burry J., Sabin J.E., Sheil B., Skavara M. *Fabricate 2020*. UCL Press, London, UK, 2020; 140.
116. Jeong H., Han S.-J., Choi S.-H., Lee Y.J., Yi S.T., Kim K.S. Rheological property criteria for buildable 3D printing concrete. *Materials*. 2019; 12:657. DOI: 10.3390/ma12040657
117. Panda B., Paul S.C., Mohamed N.A.N., Tay Y.W.D., Tan M.J. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar. *Measurement*. 2018; 113:108-116. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.08.051

118. Zareiyan B., Khoshnevis B. Interlayer adhesion and strength of structures in contour crafting — effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thickness. *Automation in Construction*. 2017; 81:112-121. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.06.013

119. Katzer J., Szatkiewicz T. Properties of concrete elements with 3D printed formworks which substitute steel reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2019; 210:157-161. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.204

120. Salazar B., Aghdasi P., Williams I.D., Ostagtag C.P., Taylor H.K. Polymer lattice-reinforcement for enhancing ductility of concrete. *Materials & Design*. 2020; 196:109184. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109184

121. Sanjayan J.G., Nematollahi B., Xia M., Marchment T. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 172:468-475. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232

122. Van Der Putten J., Deprez M., Cnudde V., De Schutter G., Van Tittelboom K. *Microstructural characterization of 3D printed cementitious materials*. *Materials*. 2019; 12:2993. DOI: 10.3390/ma12182993

123. Van Der Putten J., De Schutter G., Van Tittelboom K. Surface modification as a technique to improve inter-layer bonding strength in 3D printed cementitious materials. *RILEM Technical Letters*. 2019; 4:33-38.

124. Ma G., Li Z., Wang L., Wang F., Sanjayan J. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2019; 202:770-783. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008

125. Ogura H., Nerella V.N., Mechtcherine V. *Developing and testing of strain-hardening cement-based composites (SHCC) in the context of 3D printing*. *Materials*. 2018; 11:1375. DOI: 10.3390/ma11081375

126. Farina I., Fabbrocino F., Carpentieri G., Modano M., Amendola A., Goodall R. et al. On the reinforcement of cement mortars through 3D printed polymeric and metallic fibers. *Composites Part B: Engineering*. 2016; 90:76-85. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.12.006

127. Rubio M., Sonebi M., Amziane S. Fresh and rheological properties of 3D printing bio-cement-based materials. *Academic Journal of Civil Engineering*. 2017; 35:283-290.

128. Bos F.P., Ahmed Z.Y., Wolfs R.J., Salet T.A. 3D printing concrete with reinforcement. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. 2018; 2484-2493.

129. Bos F.P., Ahmed Z.Y., Jutinov E.R., Salet T.A.M. *Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete*. *Materials*. 2017; 10:1314. DOI: 10.3390/ma10111314

130. Mechtcherine V., Michael A., Liebscher M., Schmeier T. *Extrusion-based additive manufacturing with carbon reinforced concrete: concept and feasibility study*. *Materials*. 2020; 13:2568. DOI: 10.3390/ma13112568

131. Bos F., Dezaire S., Ahmed Z., Hoekstra A., Salet T. Bond of reinforcement cable in 3D printed concrete. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 584-600.

132. Bester F., van den Heever M., Kruger J., Cho S., van Zijl G. Steel fiber links in 3D printed concrete. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 398-406.

133. Geneidy O., Kumarji S., Dubor A., Sollazzo A. Simultaneous reinforcement of concrete while 3D printing. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 895-905.

134. Marchment T., Sanjayan J. Penetration reinforcing method for 3D concrete printing. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 680-690.

135. Marchment T., Sanjayan J. Mesh reinforcing method for 3D concrete printing. *Automation in Construction*. 2020; 109:102992. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102992

136. Wang W., Konstantinidis N., Austin S.A., Buswell R.A., Cavalaro S., Cecinia D. Flexural behaviour of AR-glass textile reinforced 3D printed concrete beams. *Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. 2020; 728-737.

137. Lin A., Tan Y.K., Wang C.-H., Kua H.W., Taylor H. Utilization of waste materials in a novel mortar-polymer laminar composite to be applied in construction 3D printing. *Composite Structures*. 2020; 253:112764. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112764

138. Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V.N., Spaniol E., Hertel M., Fussel U. 3D printed steel reinforcement for digital concrete construction — Manufacture, mechanical properties and bond behavior. *Construction and Building Materials*. 2018; 179:125-137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202

139. *Regulation and Permitting for 3D Printed Construction — Automate Construction*. URL: <https://automate.construction/2020/03/29/regulation-and-permitting-for-3d-printed-construction>

140. ICON — 3D Technology. *ICON develops advanced construction technologies that advance humanity by using 3D printing robotics, software and advanced materials*. URL: <https://www.iconbuild.com>

141. Apis Cor. *We print buildings*. URL: <https://apis-cor.com>

142. COBOD. COBOD is the world leader in 3D construction printing solutions. *We are continuously adding wider automation and robotics to construction*. 2023. URL: <https://cobod.com>

Received September 11, 2023.

Adopted in revised form on December 1, 2023.

Approved for publication on December 1, 2023.

B I O N O T E S: **Aleksandr S. Inozemtcev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2444-1204, Scopus: 55889834500, ResearcherID: K-6341-2013, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemtcevAS@mgsu.ru.

Композиционные материалы на основе строительных и полимерных отходов

Александр Андреевич Баруздин, Любовь Владимировна Закревская

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ); г. Владимир, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование посвящено комплексному изучению рециклинга в строительстве. Приведены анализ опыта переработки отходов строительства и полимерной промышленности, существующие способы и технологии переработки отходов сшитого полиэтилена.

Материалы и методы. Использовано исследовательское и испытательное оборудование с высокой воспроизводимостью результатов. Свойства изготовленных образцов материалов определялись по стандартным методикам, помимо этого, для изучения структуры материалов применялись методы рентгенофазового анализа, оптической и растровой электронной микроскопии.

Результаты. Разработаны составы композиционных материалов плотностью от 1750 до 2000 кг/м³, прочностью на сжатие от 20 до 40 МПа, включающие: портландцемент, отходы сшитого полиэтилена и керамического кирпича, поликарбоксилатный пластификатор, белую сажу и раствор хлорида кальция. Исследована возможность применения тонкомолотого кирпичного боя в качестве частичной замены цемента и измельченного сшитого полиэтилена в качестве заполнителя. Изучена микроструктура полученных композиционных материалов и сделан вывод о том, что заполнитель в виде сшитого полиэтилена армирует матрицу, представляющую собой продукт взаимодействия цемента, кирпичной крошки и белой сажи, в результате которого образуется прочная кристаллическая структура, состоящая из гидросиликатов и карбонатов кальция и кварца.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы в производстве строительных композиционных материалов на основе рециклинга отходов кирпича керамического и сшитого полиэтилена. Благодаря тому, что себестоимость представленных отходов ниже, чем у портландцемента и традиционных заполнителей (примерно на 25 %), а их переработка сопровождается снижением отрицательного воздействия на окружающую среду, композиты на их основе имеют хорошую перспективу внедрения в практику строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рециклинг, сшитый полиэтилен, кирпичный бой, микроструктура, рентгенофазовый анализ, растровая электронная микроскопия, композиционные материалы, механические свойства

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ). Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (Соглашение № 075-15-2021-692 от 05.08.2021).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Баруздин А.А., Закревская Л.В. Композиционные материалы на основе строительных и полимерных отходов // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 246–257. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.246-257

Автор, ответственный за переписку: Александр Андреевич Баруздин, baruzdin98@bk.ru.

Composite materials containing construction and polymer waste

Aleksandr A. Baruzdin, Lyubov V. Zakrevskaya

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VLSU); Vladimir, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This research is a consolidated study of recycling in the construction industry. The recycling of construction and polymer industry waste is analyzed. Currently used methods and technologies of cross-linked polyethylene waste recycling are presented.

Materials and methods. The research and testing equipment with high reproducibility of results is used. Properties of manufactured specimens of materials were determined by standard methods. Methods of X-ray phase analysis, optical and scanning electron microscopy were used to study the structure of materials.

Results. Compositions of composite materials with density from 1,750 to 2,000 kg/m³ and compressive strength from 20 to 40 MPa have been developed. Compositions included Portland cement, waste of cross-linked polyethylene and ceramic bricks, polycarboxylate plasticizer, silica filler and calcium chloride solution. The possibility of using floured broken brick as a partial replacement of cement and crushed cross-linked polyethylene as an aggregate is investigated. The microstructure

of the obtained composite materials was studied and it was concluded that cross-linked polyethylene aggregate is reinforce a homogeneous matrix, which is a product of the interaction of cement, brick powder and silica filler. During the hardening of matrix strong crystal structure consisting of hydrosilicates and calcium and quartz carbonates is formed.

Conclusions. The obtained results can be used in the production of building composite materials based on recycling of ceramic brick waste and cross-linked polyethylene. Due to the fact that the cost of the presented waste is much lower than the cost of Portland cement and traditional aggregates (by about 25 %), and their recycling is accompanied by the reduction of negative impact on the environment, composites based on them have good prospects for implementation in construction practice.

KEYWORDS: recycling, cross-linked polyethylene, broken brick, microstructure, X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, composite materials, mechanical properties

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of the state assignment in the sphere of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2020-0015, state assignment of VLSU). The research was carried out using the equipment of the interregional multispecialty and interdisciplinary centre of collective use of promising and competitive technologies in the areas of development and application in industry/mechanical engineering of domestic achievements in the field of nanotechnology (Agreement No. 075-15-2021-692 of August 5, 2021).

FOR CITATION: Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V. Composite materials containing construction and polymer waste. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):246-257. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.246-257 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr A. Baruzdin, baruzdin982bk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время производство строительных материалов требует повышения уровня ресурсосбережения, энергоэффективности и экологичности. Один из путей решения этого вопроса — рециклинг отходов строительства.

В октябре 2022 г. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации был утвержден паспорт программы «Применение вторичных ресурсов, вторичного сырья из отходов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства на 2022–2030 годы». Цели программы: увеличение количества отходов, вовлекаемых в хозяйственный оборот; уменьшение количества отходов строительства, отправляемых на захоронение; формирование комплексного подхода к обращению с отходами строительства на всех этапах их жизненного цикла.

Рециклинг строительных отходов подразумевает их переработку для повторного применения полученного сырья. Несмотря на то что накоплено достаточно много информации, данная практика в России пока не получила широкого распространения. Тем не менее известно, что большинство отходов строительства можно перерабатывать и использовать повторно в производстве новых материалов. Так, дробленый кирпичный бой, бетонный лом и его отсеvy возможно использовать в качестве заполнителя, наполнителя и добавки в бетонные смеси и растворы [1–7]; переработанные отходы гипсокартона — для производства новых гипсовых изделий [8, 9]; отходы древесины являются сырьем для композитов на основе органических заполнителей, таких как арболит, фибролит, опилкобетон и т.д. [10]; стеклобой применяется как в стекольной промышленности, так и в производстве новых строительных материалов, а также в дорожном строительстве [11–13]. Один из видов строительных отходов, рециклинг которого затруднен и изучен в меньшей сте-

пени, — это отход изоляции силовых кабелей, сантехнических труб и фитингов (сшитый полиэтилен).

Сегодня ведущие ученые говорят о стремительно возрастающей проблеме микропластика, который производится вследствие естественной деградации полимерных отходов. Воздействие микропластика на живые организмы до конца не изучено, но уже сейчас известно, что его частицы могут оказывать как отрицательное механическое воздействие, так и проникать в кровь и клеточные мембраны. Один из способов снижения этого отрицательного воздействия — переработка полимерных отходов.

С каждым годом производство сшитого полиэтилена возрастает. По состоянию на 2019 г. мировой объем выпуска труб из сшитого полиэтилена превысил 260 тыс. т [14]. Связано это с увеличением доли использования сшитого полиэтилена в ряде областей вместо традиционного полиэтилена и поливинилхлорида.

При температурах выше 75 °С полиэтилен размягчается и течет, теряя свои физические свойства. Сшивание полиэтилена позволяет сохранить желаемые свойства в более широком температурном диапазоне [15].

В результате сшивания полиэтилена между его молекулами образуется пространственная структура, благодаря которой он работает при более высоких температурах, имеет высокие механические и диэлектрические показатели, а также химическую стойкость [14].

В табл. 1 приведены основные свойства сшитого полиэтилена.

С другой стороны, из-за своей химической и термической стойкости сшитый полиэтилен плохо поддается переработке методами традиционными для обычного полиэтилена. Поэтому большая часть отходов сшитого полиэтилена подвергается захоронению или сжиганию в виде топлива [14].

Основные методы переработки сшитого полиэтилена направлены на различные способы раз-

Табл. 1. Основные свойства сшитого полиэтилена

Table 1. Main properties of cross-linked polyethylene

Свойства Properties	Значение Value
Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	940
Температура плавления, °С Melting temperature, °C	200
Температура горения, °С Burning temperature, °C	400
Прочность на разрыв, МПа Tensile strength, MPa	22–27
Относительное удлинение при разрыве, % Relative elongation at break, %	350–800
Модуль упругости, МПа Modulus of elasticity, MPa	>550
Теплопроводность, Вт/м·К Thermal conductivity, W/m·K	0,38

рушения трехмерной молекулярной структуры для придания полимеру термопластичности, свойственной исходному полиэтилену.

Первый способ — термическая деструкция сшитого полиэтилена. При температуре до 400 °С сшитый полиэтилен ведет себя стабильно, разложение начинается при повышении температуры до 430 °С и при 500 °С полимер разлагается без образования твердого остатка. Поэтому при поддержании температуры ниже 450 °С можно использовать термодеструкцию сшитого полиэтилена для разрушения пространственной структуры и получения термопластичного полимера для вторичного применения [15].

Другой способ переработки — использование сверхкритического спирта или воды для разрушения связей сшитого полиэтилена. Однако такая переработка сопряжена с высокотехнологическим оборудованием и сложной организацией процесса, а также высокими энергетическими затратами [16].

Авторами работы [17] разработана технология, позволяющая с помощью оптимально подобранной термопластификации получать из сшитого полиэтилена материал, который можно формовать. Также авторы упоминают о том, что есть технологии по измельчению и добавлению сшитого полиэтилена к термопластам и расплавлению смеси для получения вторичного материала.

Существуют технологии, связанные с воздействием на сшитый полиэтилен ультразвука, который дает возможность убрать связи, оставив основную полимерную цепочку полиэтилена. Недостатком данной технологии являются высокие материальные затраты и необходимость высокотехнологического оборудования, поэтому эта технология используется крайне редко.

Учеными во всем мире активно изучается вопрос применения полимерных отходов в производстве строительных материалов.

Так, в труде [18] представлено исследование по улучшению свойств штукатурного раствора порошком из отходов стекла и волокнами из пластиковых отходов типа полиэтилентерефталата. Отмечается увеличение прочности на изгиб у образцов штукатурки, армированных волокнами из пластиковых отходов (1–2 % пластиковых волокон от массы гипса).

Изучены свойства бетонных смесей, в которых мелкий заполнитель из речного песка был заменен на гранулы, изготовленные путем измельчения отходов труб из поливинилхлорида (ПВХ) [19]. Отмечается, что бетоны на основе ПВХ заполнителя имеют пониженную прочность на сжатие и растяжение, однако они обладают меньшей усадкой, плотностью, а также являются более устойчивыми к проникновению хлорид-ионов. Рекомендуется при изготовлении бетонов на основе заполнителей из отходов ПВХ ограничивать их содержание до 15 % по объему. При соблюдении этих ограничений такие бетоны можно использовать для возведения легких не несущих элементов.

В то же время в публикации [20] указывается, что бетоны, содержащие пластмассовые волокна из отходов ПВХ в количестве менее 1 %, имеют повышенную прочность на сжатие и растяжение по сравнению с обычным бетоном, но при увеличении содержания переработанных пластиковых волокон сверх этого уровня происходит снижение механических характеристик бетона.

Авторы работы [21] исследовали возможность частичной замены мелкого заполнителя бетона на пластиковые отходы и сделали вывод о том, что включение пластика в состав бетона снижает его прочность на сжатие и изгиб, но при замене части цемента на микрокремнезем в составе с пластиковыми отходами удается достичь прочности, эквивалентной контрольному составу. Прочность на разрыв, согласно результатам экспериментов ав-

торов, не снижается при замене мелкого заполнителя на пластик вплоть до 6 %.

В Канаде и Индии реализовываются проекты по созданию асфальтобетонных покрытий на основе переработанного пластика, такие дороги не только превосходят по прочности и долговечности традиционные, но и позволяют очистить планету от кубометров пластикового мусора [22].

Вопрос использования отходов сшитого полиэтилена в производстве строительных материалов изучен в меньшей мере, чем применение других полимерных отходов. Тем не менее проведено исследование целесообразности включения отходов сшитого полиэтилена в бетонные смеси [23]. Отмечается, что прочность бетона на сжатие, растяжение и изгиб снижается при увеличении содержания сшитого полиэтилена, особенно это характерно для смесей, содержащих крупногабаритные включения сшитого полиэтилена. Также снижается модуль упругости бетона и увеличивается усадка. Авторы связывают данные отрицательные эффекты со снижением жесткости каркаса бетона при включении сшитого полиэтилена, меньшим удельным весом кусков полиэтиленового заполнителя по сравнению с натуральными заполнителями и их плохой адгезией к цементной матрице. Положительным эффектом от введения сшитого полиэтилена в состав бетонной смеси служит снижение водопоглощения, что связано с незначительным водопоглощением самого полиэтиленового заполнителя.

Специалисты в области дорожного строительства говорят о возможности применения сшитого полиэтилена в полимерно-битумных вяжущих совместно с минеральными компонентами смесей и в качестве модификатора для битума. Отмечается перспективность применения данного вида отходов в несущем основании и дополнительных слоях основания дорожной одежды [24].

Настоящая работа направлена на изучение возможности применения измельченного сшитого полиэтилена в качестве заполнителя бетонов. При таком подходе свойства сшитого полиэтилена, обусловленные его трехмерной структурой, могут положительно повлиять на свойства изготавливаемого композита и отпадет необходимость при переработке использовать сложные технологии. Решение этого вопроса может позволить не только вторично использовать отходы сшитого полиэтилена, но также снизить потребность в природных заполнителях и сократить расходы для получения новых строительных изделий.

Также в качестве частичной замены вяжущего была использована тонкодисперсная кирпичная крошка, получаемая при дроблении кирпичного лома, что увеличивает экономический и экологический эффект предлагаемого решения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на базе кафедры строительного производства ВлГУ имени Алек-

сандра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых с помощью современного оборудования и приборов, таких как пресс П-125, машина для определения прочности при изгибе МИИ-100, смеситель лабораторный ЗУБР-1400, прибор для измерения удельной поверхности и среднего размера частиц ПСХ-10, лабораторная мельница ЛБ-1, стандартный конус ПГР для определения подвижности смеси, прибор Вика, формы для образцов-балочек $16 \times 4 \times 4$ см, набор сит, оптический микроскоп МБС-9, сканирующий электронный микроскоп FIB-SEM LMI-700. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился на порошковом дифрактометре Bruker AXS D8 ADVANCE (модель D8, фирма-производитель Bruker Optik GmdH, Германия).

Для синтеза были использованы измельченные отходы сшитого полиэтилена; тонкодисперсная кирпичная крошка, полученная дроблением отходов кирпичного боя; портландцемент белый ПЦБ 1-500-Д0; белая сажа БС-120; 10 %-ный раствор хлорида кальция; поликарбонатный пластификатор П-17 (рис. 1).

В табл. 2 представлены свойства используемых материалов.

На рис. 2 приведен РФА применяемых отходов сшитого полиэтилена.

Из результатов РФА видно, что в отходах, помимо полиэтилена, присутствуют карбонаты магния и кальция, в меньшей степени доломит, аминокислотные соединения, дикарбоновые кислоты, технический углерод.

В табл. 3 представлен гранулометрический состав используемых отходов сшитого полиэтилена.

Из табл. 3 видно, что измельченные отходы сшитого полиэтилена представлены в основном крупными фракциями 5–10 мм, что, вероятнее всего, связано с трудностью измельчения сшитого по-



Рис. 1. Используемые материалы: *a* — тонкодисперсная кирпичная крошка; *b* — отходы сшитого полиэтилена; *c* — портландцемент белый ПЦБ 1-500-Д0; *d* — белая сажа БС-120; *e* — хлорид кальция технический; *f* — пластификатор П-17

Fig. 1. Used materials: *a* — finely-dispersed broken brick; *b* — waste of cross-linked polyethylene; *c* — white Portland cement; *d* — white carbon black; *e* — technical calcium chloride; *f* — plasticizer

Табл. 2. Свойства используемых материалов

Table 2. Properties of used materials

Материалы Materials	Свойства Properties
Портландцемент ПЦБ 1-500-Д0 Portland Cement PCB 1-500-D0	Цемент белый, без добавок, марки 500; $S_{уд} > 250 \text{ м}^2/\text{кг}$ White cement, without additives, grade 500; $S_{уд} > 250 \text{ м}^2/\text{кг}$
Кирпичная крошка Broken brick	Фракция менее 0,08 мм; $S_{уд} = 2500 \text{ см}^2/\text{г}$; $\rho_{нас} = 820 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\rho_{ист} = 2720 \text{ кг}/\text{м}^3$ Fraction less than 0.08 mm; $S_{уд} = 2,500 \text{ см}^2/\text{г}$; $\rho_{нас} = 820 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\rho_{ист} = 2,720 \text{ кг}/\text{м}^3$
Отходы сшитого полиэтилена Waste of cross-linked polyethylene	Фракция 2,5–5 мм Fraction 2.5–5 mm
Белая сажа БС-120 Silica filler BS-120	$S_{уд} = 12\,000 \text{ см}^2/\text{г}$; массовая доля $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ — 87 % $S_{уд} = 12,000 \text{ см}^2/\text{г}$; mass content of $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ — 87 %
Пластификатор П-17 Plasticizer P-17	50%-ный раствор плотностью $\geq 1,1 \text{ г}/\text{см}^3$ 50 % solution with density $\geq 1.1 \text{ г}/\text{см}^3$
Раствор хлористого кальция Calcium chloride solution	Концентрация CaCl_2 — 10 % Concentration of CaCl_2 — 10 %

Идентификатор командного образца (согласованное два Тета/Тета)

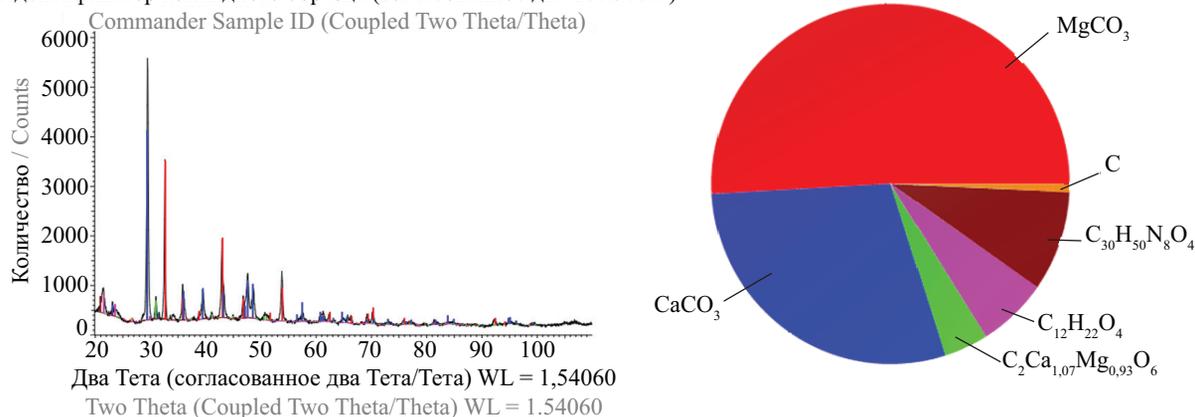


Рис. 2. Рентгенофазовый анализ отходов сшитого полиэтилена

Fig. 2. X-ray phase analysis of cross-linked polyethylene waste

Табл. 3. Гранулометрический состав отходов сшитого полиэтилена

Table 3. Granulometric composition of cross-linked polyethylene waste

Остатки Residues	Размер сит, мм Sieve size, mm							Дно Pallet
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Частные остатки на ситах, % Partial residues on sieves, %	0,70	83,50	14,50	0,50	0,20	0,15	0,30	0,15

лиэтилена до более мелких фракций за счет особенностей его строения и пластинчатой формы частиц.

В данной работе в качестве заполнителя была использована фракция полиэтилена 2,5–5 мм.

Для уменьшения водоцементного (В/Ц) отношения и, как следствие, повышения прочности композитов применен поликарбоксилатный пластификатор П-17.

С целью ускорения процесса гидратации в смесь добавляли раствор хлористого кальция, который вместе с тем уменьшает текучесть, сокращает сроки схватывания и увеличивает раннюю прочность.

Свойства синтезированных композиционных материалов устанавливались на стандартных образцах-балочках размером $16 \times 4 \times 4$ см. Образцы изготавливались по стандартной технологии: компоненты перемешивали в сухом виде, затем затворяли раствором CaCl_2 с добавлением пластификатора, формовали и оставляли во влажных условиях для набора прочности. После этого в возрасте 28 дней определяли плотность образцов, прочность на сжатие и изгиб, а также водопоглощение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки влияния пластификатора на конечную прочность образцов, а также оценки оптимального соотношения цемента и кирпичной крошки было изготовлено несколько образцов, содержащих цемент, кирпичную крошку, пластификатор и воду. Составы и результаты изучения свойств представлены в табл. 4.

Из результатов представленного эксперимента можно сделать вывод, что поликарбоксилатный пластификатор позволяет значительно снизить В/Ц отношение и повысить прочность образцов на 60–90 % по сравнению с образцами без пластификатора.

Также можно отметить, что замена цемента тонкомолотой кирпичной крошкой до 20 % безболезненно сказывается на основных свойствах образцов.

Табл. 4. Составы на основе цемента и кирпичной крошки

Table 4. Compositions based on cement and broken brick

Марка состава Mark of the composition	Состав, % Composition, %	$\frac{В/Ц}{В/Т}$ $\frac{W/C}{W/S}$	Свойства / Properties			
			Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа Compressive strength R_{comp} , MPa	Прочность на изгиб $R_{изг}$, МПа Flexural strength R_{fp} , MPa	Водопоглощение W , % Water absorption W , %
БЦ-1 BC-1	Цемент — 75 Вода — 25 Cement — 75 Water — 25	$\frac{0,33}{0,33}$	2120	87,4	5,9	0,93
БЦК-20 BCK-20	Цемент — 60 Кирпичная крошка — 15 Вода — 25 Cement — 60 Broken brick — 15 Water — 25	$\frac{0,41}{0,33}$	2060	74,0	3,5	1,07
БЦК-40 BCK-40	Цемент — 45 Кирпичная крошка — 30 Вода — 25 Cement — 45 Broken brick — 30 Water — 25	$\frac{0,55}{0,33}$	1990	55,0	6,3	1,37
БЦ — 4(пл) BCK — 4(pl)	Цемент — 83,5 Вода — 15,8 П-17 — 0,7 Cement — 83.5 Water — 15.8 P-17 — 0.7	$\frac{0,19}{0,19}$	2230	140	9,8	0,82
БЦК — 20(пл) BCK — 20(pl)	Цемент — 66,7 Кирпичная крошка — 16,8 Вода — 15,8 П-17 — 0,7 Cement — 66.7 Broken brick — 16.8 Water — 15.8 P-17 — 0.7	$\frac{0,24}{0,19}$	2260	132	10,2	1,11
БЦК — 40(пл) BCK — 40(pl)	Цемент — 50 Кирпичная крошка — 33,5 Вода — 15,8 П-17 — 0,7 Cement — 50 Broken brick — 33.5 Water — 15.8 P-17 — 0.7	$\frac{0,32}{0,19}$	2225	104	6,7	1,62

Табл. 5. Составы синтезированных композитов

Table 5. Compositions of synthesized composites

Марка состава Mark of the composition	Компоненты, мас. % Components, wt. %					
	Портландцемент Portland Cement	Кирпичная крошка Broken brick powder	Белая сажа Silica filler	Сшитый полиэтилен Cross-linked polyethylene	Пластификатор П-17 Plasticizer P-17	10%-ный раствор CaCl ₂ 10 % Calcium chloride solution
КСП-1 KSP-1	48,00	12,00	0,80	22,57	0,43	16,20
КСП-2 KSP-2	49,00	12,25	0,80	20,95	0,45	16,55
КСП-3 KSP-3	50,00	12,50	0,80	19,40	0,45	16,85
КСП-4 KSP-4	52,50	13,13	0,80	15,40	0,47	17,70
КСП-5 KSP-5	55,00	13,75	0,80	11,45	0,50	18,50
КСП-6 KSP-6	56,00	14,00	0,80	9,80	0,50	18,90

Табл. 6. Свойства синтезированных композитов

Table 6. Properties of synthesized composites

Марка состава Mark of the composition	Наименование свойств Name of properties			
	Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа Compressive strength R_{comp} , МПа	Прочность на изгиб $R_{изг}$, МПа Flexural strength R_{fl} , МПа	Водопоглощение W , мас. % Water absorption W , wt. %
КСП-1 KSP-1	1762	20,4	4,0	2,13
КСП-2 KSP-2	1787	23,1	4,3	2,05
КСП-3 KSP-3	1799	26,6	4,3	2,30
КСП-4 KSP-4	1813	37,0	4,6	1,86
КСП-5 KSP-5	1943	41,6	4,5	2,23
КСП-6 KSP-6	1961	43,5	4,8	2,02

В табл. 5 приведены составы синтезированных композитов.

В табл. 6 представлены свойства синтезированных композитов.

Согласно табл. 6, можно сделать вывод, что увеличение содержания заполнителя из сшитого полиэтилена снижает прочность композита на сжатие и изгиб, что согласуется с результатами авторов [16, 18, 20] и, вероятнее всего, связано со сниженными механическими характеристиками сшитого полиэтилена относительно матрицы.

В то же время все испытанные образцы отличались достаточно низким водопоглощением, что со-

ответствует выводам работы [20]. Данный эффект наблюдается как за счет уменьшенного водопоглощения сшитого полиэтилена, так и за счет высокой плотности матрицы и, очевидно, малого количества пор. Сниженное водопоглощение представленных композитов позволяет сделать прогноз о высоких характеристиках морозостойкости материала, что будет изучено в дальнейших исследованиях.

В результате экспериментов замечено, что в момент формирования происходит расслоение матричной фазы (вяжущее) и заполнителя (полиэтилен) за счет низкой плотности последнего, о чем свидетельствуют фото (рис. 3, а). Это явление не может



Рис. 3. Сечение образцов: *a* — присутствует расслоение; *b* — расслоение отсутствует

Fig. 3. Specimen cross-section: *a* — there is stratification; *b* — there is no stratification

не сказаться на объективности и точности определения физико-технических свойств. Испытания с помощью ИПС-МГ4.03 показывают, что прочность матричной фазы превосходит среднюю прочность образца в 1,5 раза. Для объективной оценки свойств композита необходимо обеспечить равномерное распределение заполнителя. Этого можно достичь с помощью:

- технологических приемов (последняя укладка смеси с выдержкой);
- изменения реологических свойств матрицы путем корректировки водоцементного отношения;

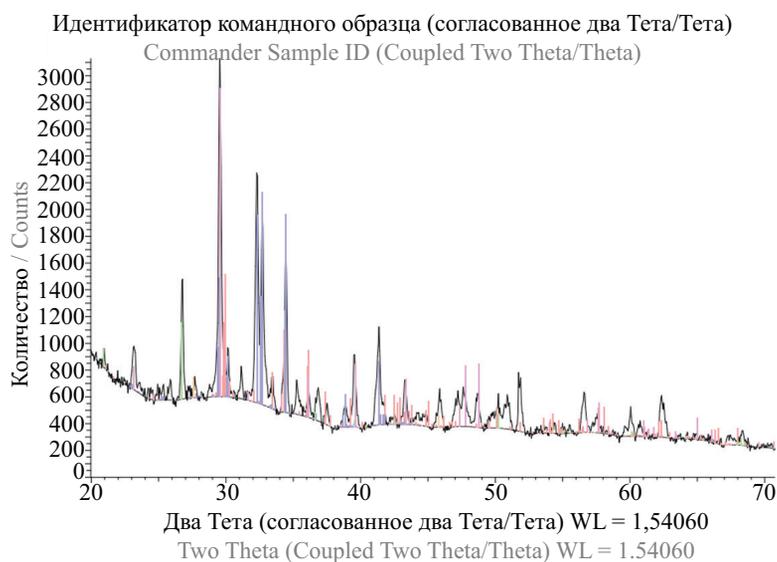


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ матрицы образцов

Fig. 5. X-ray phase analysis of the specimen matrix

Табл. 7. Кристаллический состав матрицы образцов

Table 7. Crystal composition of the specimen matrix

Номер компонента Component No.	1	2	3	4	5
Компонент Component	$\text{Ca}_{27}\text{O}_{45}\text{Si}_9$	CaO_3Si_2	CaCO_3	SiO_2	MnS
Содержание, % Content, %	43,23	37,02	16,40	2,89	0,46

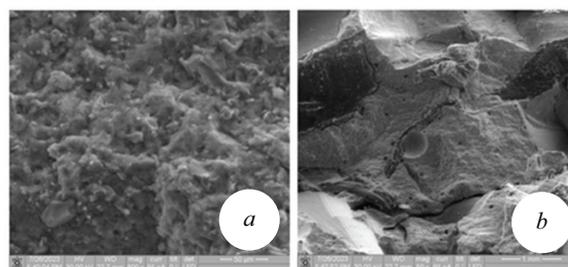
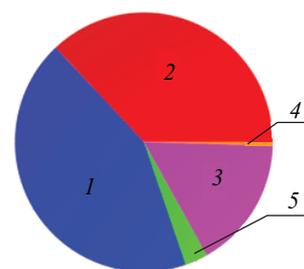


Рис. 4. Исследование микроструктуры образцов с помощью растровой электронной микроскопии: *a* — микроструктура матрицы; *b* — частицы полиэтилена, встроенные в матрицу

Fig. 4. Study of microstructure of specimens using scanning electron microscopy: *a* — matrix microstructure; *b* — polyethylene particles integrated in the matrix

- увеличения концентрации заполнителя до 20 % (рис. 3, *b*).

Изучение микроструктуры с помощью растровой электронной микроскопии говорит о том, что заполнитель в виде сшитого полиэтилена распределяется в однородной матрице (рис. 4, *a*), представляющей собой продукт взаимодействия цемента, кирпичной крошки и белой сажи, в результате которого образуется прочная кристаллическая структура, состоящая из гидросиликатов и карбона-



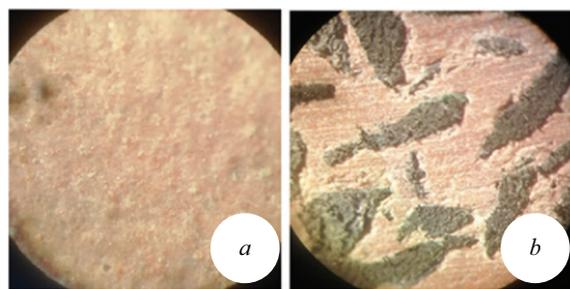


Рис. 6. Исследование микроструктуры образцов с помощью оптической микроскопии: *a* — микроструктура матрицы; *b* — частицы полиэтилена, встроенные в матрицу

Fig. 6. Study of microstructure of specimens using optical microscopy: *a* — microstructure of the matrix; *b* — polyethylene particles integrated in the matrix

тов кальция и кварца (рис. 5 и табл. 7). На рис. 4, *b* отчетливо видны частицы полиэтилена, плотно встроенные в матрицу, очевидно за счет как физического, так и химического взаимодействия, обусловленного присутствием технического углерода в составе полиэтилена.

Данные выводы также подтверждаются снимками с оптического микроскопа (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Замена цемента тонкомолотой кирпичной крошкой до 20 % безболезненно сказывается на основных эксплуатационных свойствах образцов.

Введение в состав поликарбоксилатного пластификатора позволяет значительно снизить В/Ц отношение и прочность образцов на 60–90 % по сравнению с образцами без пластификатора.

Увеличение содержания заполнителя из сшитого полиэтилена снижает прочность композита на сжатие и изгиб, что, вероятнее всего, связано со сниженными механическими характеристиками сшитого полиэтилена относительно матрицы.

Все испытанные образцы отличались достаточно низким водопоглощением. Данный эффект наблюдается как за счет уменьшенного водопоглощения сшитого полиэтилена, так и за счет высокой плотности матрицы и, очевидно, малого количества пор. Сниженное водопоглощение представленных композитов позволяет сделать прогноз о высо-

ких характеристиках морозостойкости материала, что будет изучено в дальнейших исследованиях.

В момент формирования композита происходит расслоение матричной фазы (вяжущее) и заполнителя (полиэтилен) за счет низкой плотности последнего. Это сказывается на объективности и точности определения свойств. Испытания с помощью ИПС-МГ4.03 показывают, что прочность матричной фазы превосходит среднюю прочность образца в 1,5 раза. Для объективной оценки свойств композита необходимо обеспечить равномерное распределение заполнителя по сечению образца.

Изучение микроструктуры с помощью растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа говорит о том, что заполнитель в виде сшитого полиэтилена распределяется в однородной матрице, представляющей собой продукт взаимодействия цемента, кирпичной крошки и белой сажи, в результате которого образуется прочная кристаллическая структура, состоящая из гидросиликатов и карбонатов кальция и кварца.

При исследовании образцов с помощью растровой электронной и оптической микроскопии отчетливо видны частицы полиэтилена, плотно встроенные в матрицу, очевидно за счет как физического, так и химического взаимодействия, обусловленного присутствием технического углерода в составе полиэтилена.

Синтезированные составы могут быть рекомендованы для промышленного использования в качестве кладочного материала для внутренних и наружных работ.

Предварительный экономический расчет позволяет прогнозировать перспективы внедрения композита в практику строительства, так как себестоимость отходов кирпича и сшитого полиэтилена гораздо ниже себестоимости цемента и традиционных наполнителей (примерно на 25 %).

Рециклинг полимерных и строительных отходов с целью производства новых композиционных материалов дает возможность снизить отрицательное воздействие на живые организмы и окружающую среду.

Преимущество данной работы заключается в комплексном рециклинге строительных и полимерных отходов, направленном на достижение синергетического эффекта взаимодействия компонентов и получение высоких технологических и эксплуатационных характеристик материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Романенко И.И., Петровнина И.Н., Еличев К.А., Романенко М.И. Пробуждение гидравлической активности наполнителей и заполнителей из лома глиняного кирпича // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11 (95). С. 563–572. EDN NDFRPP.
2. Aliabdo A.A., Abd-Elmoaty M., Hassan H.H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry //

Alexandria Engineering Journal. 2014. Vol. 53. Issue 1. Pp. 151–168. DOI: 10.1016/j.aej.2013.12.003

3. Магсумов А.Н., Шарипьянов Н.М. Использование бетонного лома в качестве крупного заполнителя для производства бетонных смесей // Символ науки: международный научный журнал. 2018. № 6. С. 29–33. EDN XQHPIT.

4. Ахмед А.А., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Тимохина Р.А., Муралли Г. Использование бетонного лома Ирака в качестве наполнителя и заполнителя тяжелого и легкого бетона // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 3. С. 28–39. EDN NKXOKJ.
5. Хаджиев М.Р. Бетонные композиты на заполнителях из керамического кирпичного боя // Евразийский союз ученых. 2014. № 5–3 (5). С. 37–40. EDN VXLZVN.
6. Larsen O., Samchenko S., Naruts V. Blended binder based on Portland cement and recycled concrete powder // Magazine of Civil Engineering. 2022. No. 5 (113). P. 11306. DOI: 10.34910/MCE.113.6. EDN ZLGLFF.
7. Larsen O.A. Environmental aspects of dismantling of old buildings during the reconstruction in Moscow // SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings. 2019. DOI: 10.5593/sgem2019/6.2/S26.015
8. Bumanis G., Zorica J., Korjamins A., Bajare D. Processing of gypsum construction and demolition waste and properties of secondary gypsum binder // Recycling. 2022. Vol. 7. Issue 3. P. 30. DOI: 10.3390/recycling7030030
9. Hansen S., Perdam S. Application of recycled gypsum wallboards in cement mortar // 7th International Conference on Engineering Mechanics and Materials, CSCE Annual Conference. 2019.
10. Кислицына С.Н., Шитова И.Ю. Способы переработки отходов деревообрабатывающей промышленности : учебное пособие. Пенза : ПГУАС, 2016. 140 с.
11. Минько Н.И., Калатоци В.В. Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 1. С. 82–88. DOI: 10.12737/article_5a5dbf09319de9.71561256. EDN PSPLFC.
12. Бессмертный В.С., Жерновой Ф.Е., Дорохова Е.С., Изотова И.А., Гокова Е.Н. Эффективный материал для зеленого строительства на основе вторичного стекольного боя // Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства : Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика. 2016. С. 111–116. EDN WHQSLP.
13. Samchenko S.V., Zaitseva A.A. Possibility of the use of ground glass break in the production of aerated concrete // Solid State Phenomena. 2022. Vol. 334. Pp. 233–239. DOI: 10.4028/p-354i45
14. Чалов К.В., Луговой Ю.В., Косивцов Ю.Ю., Сульман Э.М. Исследование кинетики термодеструкции сшитого полиэтилена // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. № 12. С. 37–46. DOI: 10.33619/2414-2948/49/04. EDN BYTQCF.
15. Багаутдинов И.З., Кувшинов Н.Е. Преимущества применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Инновационная наука. 2016. № 3–3. С. 51–53. EDN VQBFFB.
16. Goto T. Recycling of silane cross-linked polyethylene for insulation of cables using supercritical alcohol // EINA. 2004. № 13. Pp. 39–40.
17. Tokuda S., Horikawa S., Negishi K., Uesugi K., Hirukawa H. Thermoplasticizing technology for the recycling of crosslinked polyethylene // Furukawa Review. 2003.
18. Salim K., Houssam A., Belaid A., Brahim H. Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 17. Pp. 170–176. DOI: 10.1016/J.PROSTR.2019.08.023
19. Kou S.C., Lee G., Poon C.S., Lai W.L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes // Waste Management. 2009. Vol. 29. Issue 2. Pp. 621–628. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.014
20. Сиков Н.Е., Серёгин А.И., Юркин Ю.В. Использование пластиковых отходов в качестве заполнителя в цементном растворе и приготовлении бетона // Инженерный вестник Дона. 2022. № 8 (92). С. 259–270. EDN OKBHDS.
21. Harini B. Use of recycled plastic waste as partial replacement for fine aggregate in concrete // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2015. Vol. 4. Issue 9. Pp. 8596–8603.
22. Лысянников А.В., Третьякова Е.А., Лысянникова Н.Н. Переработанный пластик в дорожном строительстве // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 7. С. 105–115. EDN ZROUHV.
23. Zéhila G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 226. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.285
24. Бурмицкий М.С., Олихова Ю.В., Ивашкина В.Н. Перспективы применения отходов сшитого полиэтилена в составе полимерно-битумных вяжущих и асфальтобетонных смесей // Успехи в химии и химической технологии. 2020. Т. 34. № 7 (230). С. 87–89. EDN QXCJZV.

Поступила в редакцию 11 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Андреевич Баруздин — аспирант кафедры строительного производства; Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ); 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; РИНЦ ID: 1211011, ORCID: 0000-0002-7391-1396; baruzdin98@bk.ru;

Любовь Владимировна Закревская — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства; Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ); 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; РИНЦ ID: 878855, Scopus: 57163450600, ORCID: 0000-0002-7064-7235; lvzak@mail.ru.

Вклад авторов:

Баруздин А.А. — сбор материала, проведение экспериментальных исследований, написание текста статьи, итоговые выводы.

Закревская Л.В. — научное руководство, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Romanenko I.I., Petrovna I.N., Yelichev K.A., Romanenko M.I. Awakening the hydraulic activity of fillers and aggregates from scrap clay bricks. *Engineering Journal of Don*. 2022; 11(95):563-572. EDN NDFRPP. (rus.).
2. Aliabdo A.A., Abd-Elmoaty M., Hassan H.H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*. 2014; 53(1):151-168. DOI: 10.1016/j.aej.2013.12.003
3. Magsumov A.N., Sharipyanov N.M. The use of concrete scrap as a coarse aggregate for the production of concrete mixtures. *Symbol of Science: International Scientific Journal*. 2018; 6:29-33. EDN XQHPIT. (rus.).
4. Ahmed A.A., Fedyuk R.S., Liseytshev Yu.L., Timokhin R.A., Murali G. Use of Iraq concrete scrap as filler and aggregate of heavyweight and lightweight concrete. *Construction Materials and Products*. 2020; 3(3):28-39. EDN NKXOKJ. (rus.).
5. Khadzhiyev M.R. Concrete composites on aggregates from ceramic brick scrap. *Eurasian Union of Scientists*. 2014; 5-3(5):37-40. EDN VXLZVN. (rus.).
6. Larsen O., Samchenko S., Naruts V. Blended binder based on Portland cement and recycled concrete powder. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 5(113):11306. DOI: 10.34910/MCE.113.6. EDN ZLGLFF.
7. Larsen O.A. Environmental aspects of dismantling of old buildings during the reconstruction in Moscow. *SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings*. 2019. DOI: 10.5593/sgem2019/6.2/S26.015
8. Bumanis G., Zorica J., Korjakins A., Bajare D. Processing of gypsum construction and demolition waste and properties of secondary gypsum binder. *Recycling*. 2022; 7(3):30. DOI: 10.3390/recycling7030030
9. Hansen S., Perdam S. Application of recycled gypsum wallboards in cement mortar. *7th International Conference on Engineering Mechanics and Materials, CSCE Annual Conference*. 2019.
10. Kislitsyna S.N., Shitova I.Yu. *Methods of processing waste from the woodworking industry : text-book*. Penza, PGUAS, 2016; 140. (rus.).
11. Min'ko N.I., Kalatozi V.V. The use of cullet in the technology of materials for construction purposes. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 1:82-88. DOI: 10.12737/article_5a5dbf09319de9.71561256. EDN PSPLFC. (rus.).
12. Bessmertnyy V.S., Zhernovoy F.E., Dorokhova E.S., Izotova I.A., Gokova E.N. An effective material for green construction based on secondary glass scrap. *Intelligent building composites for green construction : international scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of the Honored Scientist of the Russian Federation, corresponding member of the RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor Valery Stanislavovich Lesovik*. 2016; 111-116. EDN WHQSLP. (rus.).
13. Samchenko S.V., Zaitseva A.A. Possibility of the use of ground glass break in the production of aerated concrete. *Solid State Phenomena*. 2022; 334:233-239. DOI: 10.4028/p-354i45
14. Chalov K., Lugovoy Yu., Kosivtsov Yu., Sulman E. Investigation of the kinetics of thermal degradation of cross-linked polyethylene. *Bulletin of Science and Practice*. 2019; 5(12):37-46. DOI: 10.33619/2414-2948/49/04. EDN BYTQCF. (rus.).
15. Bagautdinov I.Z., Kuvshinov N.E. Advantages of using cables with cross-linked polyethylene insulation. *Innovation Science*. 2016; 3-3:51-52. EDN VQBFFB. (rus.).
16. Goto T. Recycling of silane cross-linked polyethylene for insulation of cables using supercritical alcohol. *EINA*. 2004; 13:39-40.
17. Tokuda S., Horikawa S., Negishi K., Uesugi K., Hirukawa H. Thermoplasticizing technology for the recycling of crosslinked polyethylene. *Furukawa Review*. 2003.

18. Salim K., Houssam A., Belaid A., Brahim H. Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass. *Procedia Structural Integrity*. 2019; 17:170-176. DOI: 10.1016/J.PROSTR.2019.08.023
19. Kou S.C., Lee G., Poon C.S., Lai W.L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*. 2009; 29(2):621-628. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.014
20. Sikov N.E., Seryogin A.I. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation. *Engineering journal of Don*. 2022; 8(92):259-270. EDN OKBHDS. (rus.).
21. Harini B. Use of recycled plastic waste as partial replacement for fine aggregate in concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2015; 4(9):8596-8603.
22. Lysyannikov A.V., Tretiakova E.A., Lysyannikova N.N. Recycled plastic in road construction. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2017; 7:105-115. EDN ZROUHV. (rus.).
23. Zéhila G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials. *Construction and Building Materials*. 2019; 226:1-10. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.285
24. Burmitsky M.S., Olikhova Yu.V., Ivashkina V.N. Prospects of application of plastic waste in the composition of polymer-bitumen binders and asphalt mixtures. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2020; 34(7):87-89. EDN QXCJZV. (rus.).

Received September 11, 2023.

Adopted in revised form on October 6, 2023.

Approved for publication on December 1, 2023.

B I O N O T E S : **Aleksandr A. Baruzdin** — postgraduate student of the Department of Construction Production; **Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VLSU)**; 87 Gorky st., Vladimir, 600000, Russian Federation; ID RSCI: 1211011, ORCID: 0000-0002-7391-1396; baruzdin98@bk.ru;

Lyubov V. Zakrevskaya — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Production; **Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VLSU)**; 87 Gorky st., Vladimir, 600000, Russian Federation; ID RSCI: 878855, Scopus: 57163450600, ORCID: 0000-0002-7064-7235; lvzak@mail.ru.

Contribution of the authors:

Aleksandr A. Baruzdin — collecting materials, processing materials, conducting experimental studies, writing the text of the article, final conclusions.

Lyubov V. Zakrevskaya — scientific supervision, scientific text editing, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

Применение техногенного сырья в процессе синтеза пеностекла с гетерогенной микроструктурой

Сергей Викторович Федосов¹, Максим Олегович Баканов²,
Ирина Сергеевна Грушко³

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

² Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России); г. Иваново, Россия;

³ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ)); г. Новочеркасск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Теплоизоляционные материалы, включая пеностекло, применяются для снижения теплопотерь в зданиях. Пеностекло обладает низкой теплопроводностью, высокой прочностью и экологической безопасностью. Исследования ученых, в том числе И.И. Китайгородского и Б.К. Демидовича, направлены на контроль процесса синтеза пеностекла и регулирование процесса кристаллизации. Снижение стоимости пеностекла возможно путем использования отходов промышленного производства. На примере золошлаковых отходов электрической станции в Ростовской области исследована возможность их повторного применения при получении пеностекла.

Материалы и методы. Изучение состава шихты пеностекла включает подготовку сырья, формовку и обжиг. Исследования структуры проводились с помощью автоматического дифрактометра, микротомографа и растрового электронного микроскопа. Проведены испытания свойств образцов пеностекла, таких как теплопроводность, прочность, плотность и воздействие нагрузки.

Результаты. Состав сырьевых материалов для пеностекла: стеклобой, золошлаковая смесь и $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Синтез пеностекла осуществлялся с использованием антрацита, диоксида циркония, оксида хрома и оксида магния. Исследования показали образование кристаллических фаз в аморфном каркасе пеностекла. Подтверждено наличие кварца, пироксена, кристобалита, эсколаита и волластонита в составе пеностекла.

Выводы. Разработаны составы шихты и технологический режим синтеза, получены 9 модификаций пеностекла с равномерной пористой структурой и различным содержанием кристаллических фаз. Кристаллические включения расположены равномерно. В роли центров кристаллизации выступают присутствующие в сырьевых компонентах кристаллические фазы (в составе золошлаковой смеси) и дополнительные инициаторы кристаллизации (оксид хрома, диоксид циркония и оксид магния). Показано соответствие свойств пеностекла требованиям стандарта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплоизоляционные материалы, пеностекло, теплопроводность, прочность, экологическая безопасность, синтез пеностекла, кристаллизация, золошлаковые отходы, сырьевые материалы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С. Применение техногенного сырья в процессе синтеза пеностекла с гетерогенной микроструктурой // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 258–269. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.258-269

Автор, ответственный за переписку: Ирина Сергеевна Грушко, grushkois@gmail.com.

Using anthropogenic raw materials in the process of synthesizing foam glass with heterogeneous microstructure

Sergey V. Fedosov¹, Maksim O. Bakanov², Irina S. Grushko³

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

² Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (IFRA of SFS of EMERCOM of Russia);
Ivanovo, Russian Federation;

³ M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (SRSPU (NPI)); Novocherkassk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Thermal insulation materials, including foam glass, are used to reduce heat losses in buildings. Foam glass has low thermal conductivity, high strength and environmental safety. Researches of scientists, including I.I. Kitaygorodsky and B.K. Demidovich, are aimed at controlling the process of foam glass synthesis and regulating the crystallization process. The cost reduction of foam glass is possible through the utilization of industrial waste.

Materials and methods. The potential for reusing and obtaining foam glass is being studied using ash and slag waste from a power station in the Rostov region. The study of foam glass batch mixture includes preparation of raw materials, molding and firing. The research of the structure was conducted using an automatic diffractometer, micro-tomograph, and scanning electron microscope. Tests were carried out to assess the properties of foam glass specimens, such as thermal conductivity, strength, density, and load impact. The composition of raw materials for foam glass include broken glass, ash and slag mixture and $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Foam glass synthesis was performed using anthracite, zirconium dioxide, chromium oxide, and magnesium oxide.

Results. The research revealed the formation of crystalline phases in the amorphous foam glass framework. The presence of quartz, pyroxene, cristobalite, eskolaite, and wollastonite in foam glass composition was confirmed.

Conclusions. Batch compositions and synthesis parameters were developed, leading to the production of nine modifications of foam glass with uniform porous structure and varying content of crystalline phases. Crystalline inclusions are evenly distributed. The role of crystallization centres is played by the crystalline phases present in the raw materials (in the composition of ash-and-slag mixture) and additional crystallization initiators (chromium oxide, zirconium dioxide and magnesium oxide). The conformity of foam glass properties to standard requirements was demonstrated.

KEYWORDS: thermal insulation materials, foam glass, thermal conductivity, strength, environmental safety, foam glass synthesis, crystallization, ash and slag waste, raw materials

FOR CITATION: Fedosov S.V., Bakanov M.O., Grushko I.S. Using anthropogenic raw materials in the process of synthesizing foam glass with heterogeneous microstructure. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):258-269. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.258-269 (rus.).

Corresponding author: Irina S. Grushko, grushkois@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Пеностекло относится к категории изоляционно-монтажных и изоляционно-строительных материалов, производимых путем спекания смеси стекольного порошка с газообразователями. Оно представляет собой грубодисперсную систему, где газообразная дисперсная фаза, образующаяся в результате вспенивания, распределена в стекломассе, являющейся более мелкодисперсной дисперсионной средой. Основы производства пеностекла были заложены в работах научной школы профессора И.И. Китайгородского и обобщены в монографии [1]. Исследования Б.К. Демидовича также стали весомым вкладом в организацию производства пеностекла [2]. В последующие годы многие отечественные [3–14] и зарубежные [15–26] ученые провели исследования, которые раскрыли особенности

физико-химических процессов получения пеностекла. Кристаллизация — один из важных процессов, определяющих свойства пеностекла. Ее результат зависит от требуемых или желаемых конечных характеристик. Например, частичная кристаллизация аморфной матрицы улучшает технические и эксплуатационные свойства теплоизоляционного строительного материала. Направленная кристаллизация стекла позволяет получить частично кристаллизованное стекло с заданными свойствами и структурой, применимое в различных отраслях промышленности. Понимание эффективных методов контроля процесса кристаллизации оптимизирует лабораторные испытания новых материалов.

Одной из проблем практического применения пеностекла является его высокая цена. Для решения этого вопроса большинство исследователей ставит

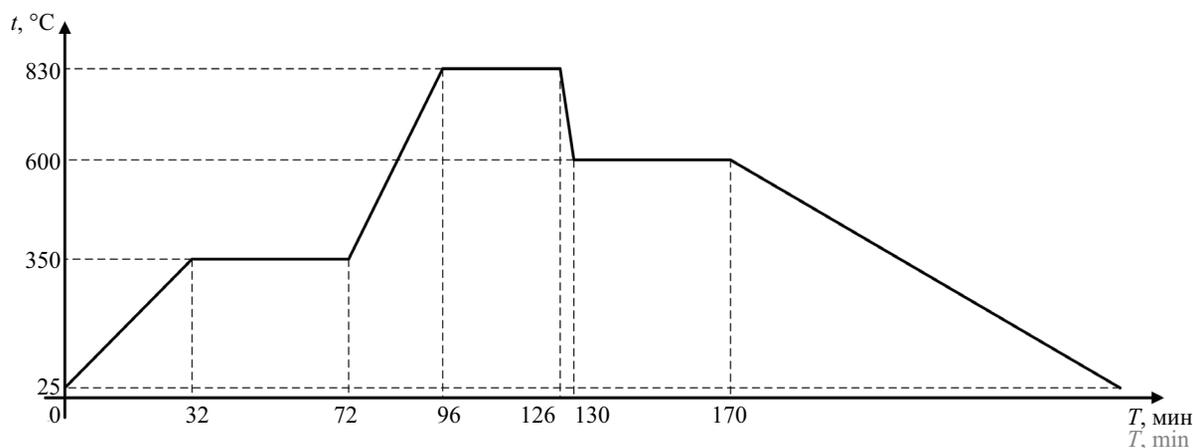


Рис. 1. Температурный режим синтеза образцов пеностекла

Fig. 1. Temperature regime of synthesis of foam glass images

Табл. 1. Химический состав золошлаковой смеси

Table 1. Chemical composition of the ash-and-slag mixture

Оксид Oxide	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Содержание, мас. % Amount, wt. %	57,13	0,88	21,46	10,55	0,12	1,73	2,90	1,11	3,28
Оксид Oxide	P ₂ O ₅	BaO	SO ₃	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	NiO	LOI	SUM	–
Содержание, мас. % Amount, wt. %	0,13	0,14	0,07	0,03	0,02	0,01	0,43	99,99	–

Табл. 2. Химический состав стеклобоя

Table 2. Chemical composition of the broken glass

Оксид Oxide	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO
Отклонения ± Deviations ±	1,45	0,44	1,44	1,88	0,13	1,01	0,13
Содержание, мас. % Amount, wt. %	14,14	3,60	2,02	69,88	0,52	7,99	0,37

Табл. 3. Химический состав компонентов шихты

Table 3. Chemical composition of the batch mixture

Наименование компонента Component name	Содержание, мас. % Amount, wt. %						
	C	SO ₃	Na ₂ O	B ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП** LoI**
Антрацит Anthracite	94	1,5	–	–	–	–	4,5
Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	–	–	16,3	36,5	–	–	47,2
Мел* Chalk*	–	–	–	–	54,6	0,6	44,8

Примечание: * мел природный технический дисперсионный МТД-2; содержание CaCO₃ + MgCO₃ в пересчете на CaCO₃, %, не менее 96,05 (по данным технического паспорта); ** ППП — потери при прокаливании.

Note: * natural technical dispersion chalk MTD-2; amount of CaCO₃ + MgCO₃ in terms of CaCO₃, %, no less 96.05 (according to the technical passport); ** LoI — loss on ignition.

целью снижение себестоимости путем использования отходов промышленного производства различной природы в качестве сырьевой базы [27–31]. Повторное использование золошлаковых отходов (ЗШО) позволит минимизировать их количество, подлежащее захоронению, обеспечивая при этом ресурсоэнергосбережение и экологическую безопасность, повторное вовлечение в хозяйственный оборот утилизируемых компонентов отходов в качестве сырья, превращение отходов в ценные вторичные сырьевые для изготовления конкурентоспособной продукции. Для повторного применения подобных отходов требуется изучение исходных характеристик отходов, физико-химических процессов их взаимодействия с технологическими добавками, а также определение необходимых воздействий, на-

правленных на получение конечного продукта с заданным комплексом свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В процессе разработки состава исходной шихты для синтеза пеностекла проводилась предварительная подготовка золошлаковой смеси (ЗШС) и боя тарного стекла. Эта подготовка включала несколько этапов: грубое измельчение с помощью щековой дробилки ШД 6, дальнейшее измельчение с использованием фарфорового барабана объемом 5 л с мелющими телами и отсев с применением автоматической установки с ситом размером 0,08 мм (в соответствии с ГОСТ 6613–86 «Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия (с Изме-

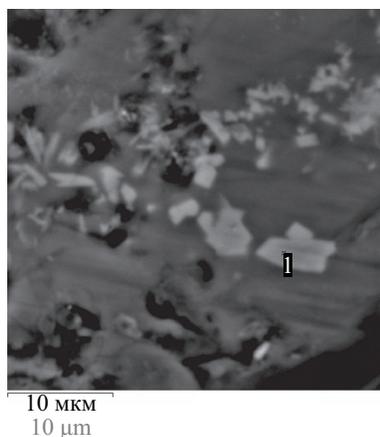


Рис. 2. Фаза пироксенового состава, электронное изображение

Fig. 2. Phase of pyroxene composition, electronic image

нием № 1)»). Подготовленные образцы получены следующим образом: все сырьевые компоненты были взвешены на электронных весах, затем смешаны до получения однородной массы и увлажнены в количестве 5 % от общей массы. Далее шихта упакована в герметичные пакеты и выдержана в течение 2 ч для более равномерного увлажнения. Формовка шихты производилась с использованием гидравлического

пресса в форме цилиндра ЛО 257, приложенная нагрузка составила 70 кгс. Обжиг осуществлялся на металлической подставке без форм в атмосфере печи.

Температурный режим синтеза (рис. 1): холодные образцы загружены в печь при температуре 25 °С, далее со скоростью 20 °С/мин выполнен нагрев до 350 °С. Выдержка при 350 °С составила 40 мин. Затем со скоростью 20 °С/мин осуществлен нагрев до 830 °С, выдержка при 830 °С — 30 мин. Термоударом температура снижена до 600 °С, выдержка при 600 °С — 40 мин. Со скоростью 2 °С/мин выполнен отжиг до температуры 25 °С.

При температурном обжиге использована муфельная печь «ЭКПС-50В» (РФ, 2012 г.) со следующими метрологическими характеристиками: диапазон температур 200–1300 °С; относительная погрешность измерений ±4 °С; дискретность 1 °С.

Исследования кристаллических фаз в полученных образцах пеностекла проведены с применением автоматического порошкового дифрактометра Bruker D2 Phaser. Для микротомографического анализа образцов пеностекла сканирование осуществлялось при помощи микротомографа Skyscan-1172 с параметрами, аналогичными исследованию [32], прикладного ПО CTAn (Bruker), DataViewer и CTVox (Bruker). Исследование микроструктуры и элементного состава образцов выполнено на растровом элек-

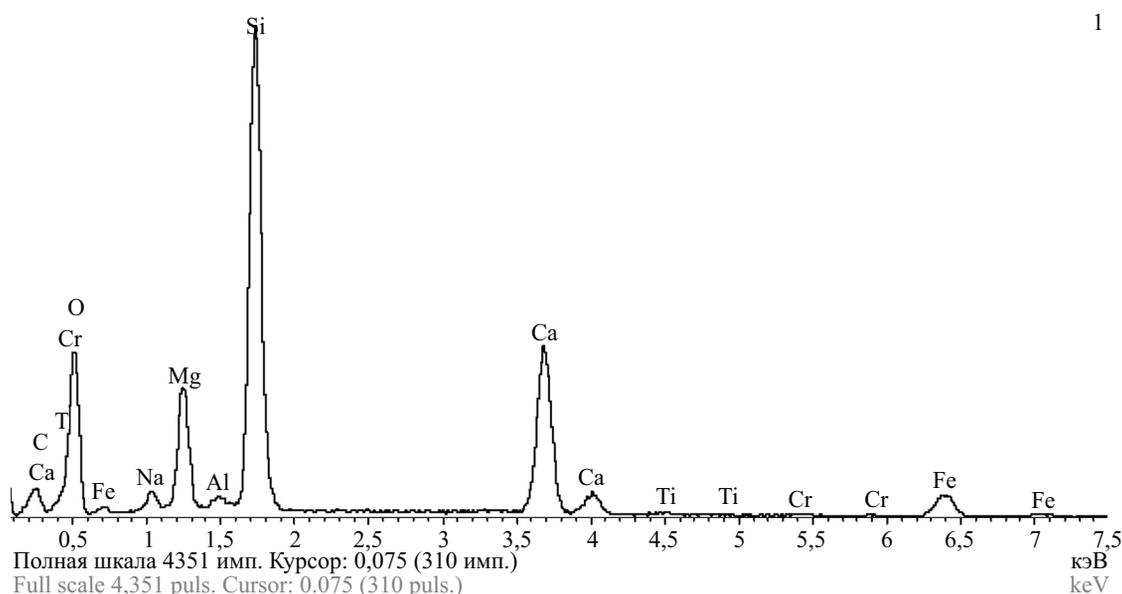


Рис. 3. Фаза пироксенового состава, спектр EDX

Fig. 3. Phase of pyroxene composition, EDX spectrum

Табл. 4. Фаза пироксенового состава (рис. 2, 3). Количественный состав

Table 4. Phase of pyroxene composition (Fig. 2, 3). Quantitative composition

Участок Section	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	Прочие элементы легче Na Other elements lighter than Na	Сумма Sum
1	2,19	13,30	0,86	53,47	20,63	0,52	0,49	7,57	0,96	100,00

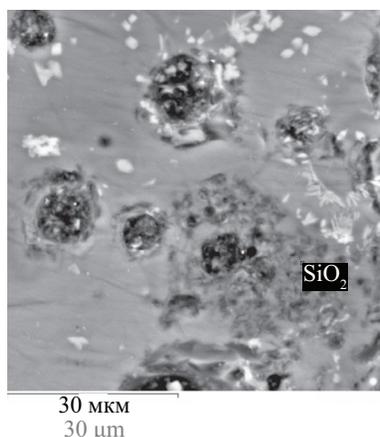


Рис. 4. Фаза кремнеземового состава, электронное изображение

Fig. 4. Phase of silica composition, electronic image

тронном микроскопе VEGA II LMU (фирмы Tescan) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT (детектор Silicon Drift (ADD)). Легкие элементы не определяются данным методом (это касается в том числе В, N и других элементов легче Na).

Испытания эксплуатационных свойств образцов пеностекла проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 7076–99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме», ГОСТ EN 1602–2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения кажущейся плотности», ГОСТ 33949–2016 «Изделия из пеностекла теплоизоляционные для зданий и сооружений (Приложение А)», ГОСТ 17177–94 «Материалы и изделия строитель-

ные теплоизоляционные. Методы испытаний», ГОСТ EN 1607–2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения прочности при растяжении перпендикулярно к лицевым поверхностям», ГОСТ EN 12430–2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения прочности при действии сосредоточенной нагрузки».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сырьевые материалы шихты включают стеклобой, ЗШС и $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Золошлаковая смесь используется для замены стеклобоя и сокращения стоимости продукта, а также снижения воздействия на окружающую среду. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ добавляется для уменьшения температуры плавления из-за высокого содержания Al_2O_3 в ЗШС. В процессе синтеза пеностекла используется антрацит в качестве газообразователя. Для инициации процесса кристаллизации применяются диоксид циркония ZrO_2 и оксид хрома Cr_2O_3 , а в качестве модификатора используется оксид магния MgO . Химические составы компонентов представлены в табл. 1–3.

Для синтеза пеностекла выполнено проектирование составов шихт с разными компонентами. Нулевой состав использован как базовый, без инициаторов кристаллизации. В составах 1 и 2 добавлен оксид хрома в разных количествах для изучения его влияния. Для оценки влияния мела на материал в составы 3–8 он включен в количестве 1 и 2 г. В составах 3 и 4 добавлен диоксид циркония, в составах 5 и 6 — оксид магния, а в составах 7 и 8 — оксид хрома. Количество инициаторов кристаллизации оставалось постоянным (0,15 г), чтобы варьировать только содержание мела.

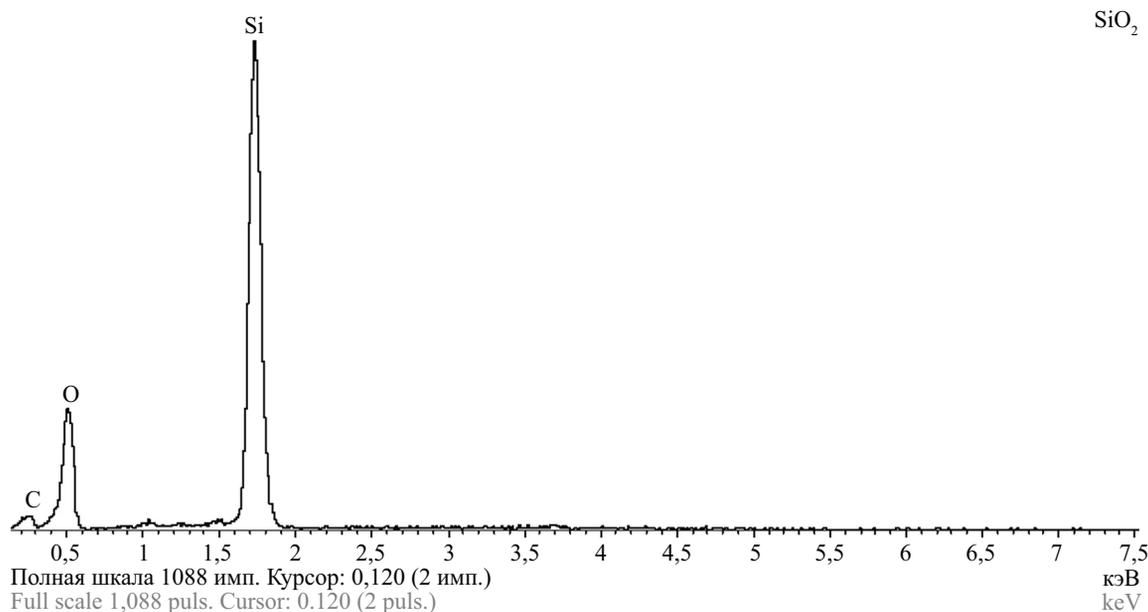


Рис. 5. Фаза кремнеземового состава, спектр EDX

Fig. 5. Phase of silica composition, EDX spectrum

Табл. 5. Количественный фазовый анализ образцов, мас. %, по данным полнопрофильного анализа методом Ритвелда
Table 5. Quantitative phase analysis of specimens, wt. %, according to full-profile analysis by the Rietveld method

Наименование фазы Phase	Состав Composition								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Кварц SiO ₂ Quartz	10,8	7,7	7,6	8,9	6,1	9,7	5,3	6,2	6,0
Пироксен (диопсид) Ca(Mg, Fe)(Si ₂ O ₆) Pyroxene (diopside)	72,4	69,9	67,9	66,6	49,1	67,5	53,8	66,3	44,8
Кристаллит SiO ₂ Cristobalite	15,5	9,2	12,4	5,1	2,2	4,0	1,9	3,8	3,2
Нефелин Na ₃ K(AlSiO ₄) ₄ Nepheline	1,3	5,3	2,0	1,3	6,7	5,0	6,1	5,1	5,8
Эсколаит Cr ₂ O ₃ Eskolaite	–	7,9	10,1	–	–	–	–	4,3	2,3
Волластонит Ca(SiO ₃) Wollastonite	–	–	–	18,0	36,0	13,8	32,9	13,9	37,7
$R_p, \%*$	2,4	2,6	2,6	2,5	2,7	2,6	2,6	2,6	2,6

Примечание: $R_p = \frac{\sum |y_i^{ex} - y_i^{расч}|}{\sum y_i^{ex}} \cdot 100\%$ — фактор сходимости расчетного и экспериментального рентгеновских профилей; y_i — интенсивность в каждой экспериментальной точке рентгенограммы.

Note: $*R_p = \frac{\sum |y_i^{ex} - y_i^{calc}|}{\sum y_i^{ex}} \cdot 100\%$ — convergence factor of calculated and experimental X-ray profiles; y_i — intensity at each experimental point of the X-ray diffraction pattern.

Микроструктура полученных образцов пено-стекла изучена методом растровой электронной микроскопии на примере нулевого состава. Стеклофаза имеет относительно однородное строение с преобладанием высоконатриевого стекла при подчиненной роли «блоков» более низконатриевого, богатого алюминием. Присутствуют участки, обогащенные железом или легкими элементами. По границам

«блоков» стекла и на внутренних поверхностях пор наблюдаются кристаллы, по составу близкие к пироксенам (рис. 2, 3, табл. 4), кремнезему (рис. 4, 5).

Микроструктура дополнительно изучена методом рентгенофазового анализа с целью определения качественного и количественного фазового состава (табл. 5, рис. 6). Результаты подтвердили данные, по-

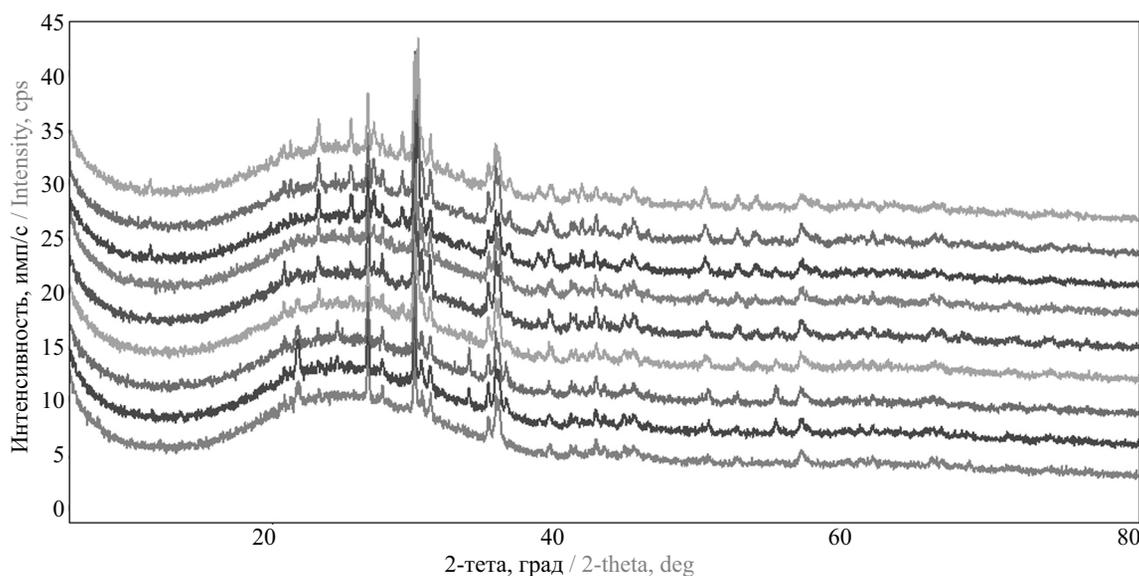


Рис. 6. Сравнение дифрактограмм образцов. Номер образца (табл. 5) указан справа

Fig. 6. Comparison of diffraction patterns of specimens. The specimen number (Table 5) is on the right side

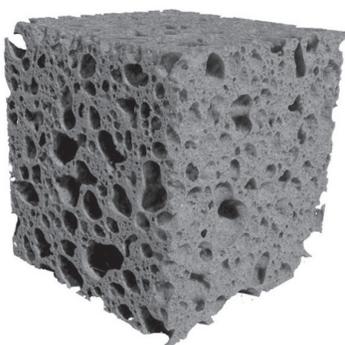


Рис. 7. Визуализация строения образца, красным выделены области с максимальной плотностью

Fig. 7. Visualization of the structure of the specimen, areas with maximum density are highlighted in red

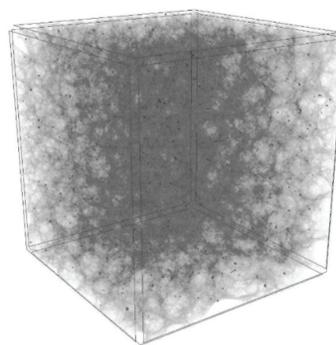


Рис. 8. Визуализация распределения частиц с высокой плотностью в объеме образца

Fig. 8. Visualization of the distribution of particles with high density in the specimen volume

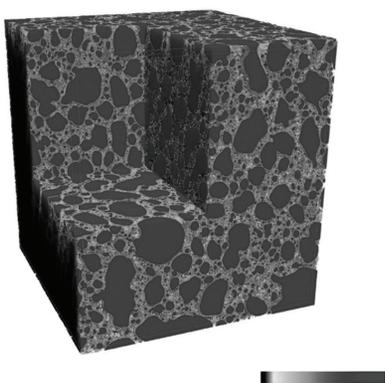


Рис. 9. Визуализация распределения пор в объеме образца, цветом кодируется размер пор от черного (наименьшие) к темно-серому (наибольшие) (цветовая шкала снизу справа)

Fig. 9. Visualization of the distribution of pores in the specimen volume, colour codes the pore size from black (smallest) to dark gray (largest) (colour scale bottom right)

лученные методом растровой электронной микроскопии: обнаружено присутствие пироксена и кварца.

С целью получения данных о пространственной структуре пеностекла выполнено микротомографическое сканирование. Результаты продемонстрированы на нулевом образце (рис. 7–9).

В соответствии с требованиями ГОСТ 33949–2016 «Изделия из стекла теплоизоляционные для зданий и сооружений. Технические условия» определены теплопроводность, плотность, прочность при сжатии, прочность на растяжение при изгибе, прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям, прочность при действии сосредоточенной нагрузки образцов пеностекла (табл. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенного исследования получены результаты микроструктурных модификаций пено-

Табл. 6. Эксплуатационные свойства (параметры) образцов

Table 6. Performance properties (parameters) of specimens

Номер образца Specimen number	Теплопроводность, Вт/м·К Thermal conductivity, W/m·K	Плотность ρ, кг/м ³ Density ρ, kg/m ³	Прочность при сжатии, МПа Compressive strength, MPa	Прочность на растяжение при изгибе, МПа Tensile strength in bending, MPa	Прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям, МПа Tensile strength perpendicular to the front surface, MPa	Коэффициент упругости, МН/м Elasticity coefficient, MN/m
0	0,1580	875,383	12,51	0,90	12,92	23,60
1	0,1694	900,134	7,52	0,85	14,58	27,31
2	0,1508	845,296	10,27	0,79	19,44	25,72
3	0,1231	723,749	17,76	0,45	12,53	9,71
4	0,1362	785,962	25,12	0,51	13,93	11,82
5	0,1121	658,502	16,43	0,34	9,78	6,64
6	0,1207	804,476	29,70	0,58	12,21	11,02
7	0,1242	721,642	22,88	0,51	14,53	15,56
8	0,1305	809,468	19,88	0,58	16,16	7,21

стекла, включая анализ фазового состава (как качественного, так и количественного), а также анализ пространственной макро- и микроструктуры. Выявлен механизм объемной кристаллизации стекла, вызванный химической дифференциацией стекла. В качестве центров кристаллизации установлены кристаллические фазы сырьевых компонентов (в составе золошлака) и дополнительные инициаторы кристаллизации (оксид хрома, диоксид циркония и оксид магния). С целью получения равномерной пористой структуры в состав пеностекла дополнительно введен кальций с помощью технического мела.

Согласно результатам, представленным в табл. 5, в девяти исследуемых составах обнаружены следующие кристаллические фазы, преобладающие количественно: кварц SiO_2 , пироксен (диопсид) $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{Si}_2\text{O}_6)$, кристобалит SiO_2 , нефелин $\text{Na}_3\text{K}(\text{AlSiO}_4)_4$, эсколаит Cr_2O_3 , волластонит $\text{Ca}(\text{SiO}_3)$. Модификации SiO_2 в виде кварца и кристобалита содержат все исследованные образцы пеностекла. Пироксен (диопсид) является количественно преобладающей фазой во всех образцах, его содержание варьируется в пределах 44,8–72,4 %. Эсколаит присутствует во всех образцах, содержащих в качестве инициатора кристаллизации Cr_2O_3 . Волластонит обнаружен только в составах пятой и шестой серии образцов, содержащих технический мел. В образцах второй и третьей серии кальций содержит только основные компоненты (золошлаковая смесь 2,9 %, стеклобой 7,99 %), предположительно, волластонит присутствует в этих материалах в следовых количествах.

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы.

Исследование посвящено разработке составов шихты для синтеза пеностекла. В процессе исследования были использованы ключевые компоненты — стеклобой, золошлаковая смесь, бура, антрацит, мел технический, а также инициаторы кристаллизации — оксид хрома, оксид магния и диоксид циркония. Получено девять различных модификаций пеностекла с равномерной пористой структурой и различными долями кристаллических фаз. Образцы пеностекла сохраняют свою геометрическую форму после обжига и имеют гладкую поверхность с практически отсутствующими открытыми порами. Визуальный анализ макроструктуры показал, что материал обладает пористой и равномерной структурой с удовлетворительным количеством пор, что обеспечивает его оптимальные свойства.

В результате исследования разработан оптимальный температурно-временной режим синтеза пеностекла. Этот режим обеспечивает получение равномерной пористой структуры и различной доли кристаллических фаз в аморфном материале. Процесс синтеза включает следующие этапы: холодные образцы загружались в печь при температуре 25 °С, затем осуществлялся нагрев со скоростью 20 °С/мин до 350 °С с выдержкой в течение 40 мин. Затем температура повышалась до 830 °С со скоростью 20 °С/мин с последующей выдержкой в течение 40 мин. Далее происходило термоударное понижение температуры до 600 °С с последующей выдержкой в течение 40 мин. Наконец происходил отжиг со скоростью 2 °С/мин до температуры 25 °С, завершая процесс синтеза.

Микротомографические исследования показали, что все образцы пеностекла, рассмотренные в данном исследовании, обладают равномерно распределенной пористостью по всему объему. Кроме того, в аморфной матрице материала присутствуют кристаллические включения, которые расположены равномерно. Обнаружено, что поры имеют размеры в нанометровом диапазоне, а межпоровые перегородки имеют толщину, составляющую несколько десятков нанометров. Таким образом, проведенные микротомографические исследования подтверждают, что разработанный пеностекломатериал обладает необходимыми характеристиками равномерной пористой структуры и кристаллическими включениями в аморфной матрице.

Исследования проведены для девяти серий образцов пеностеклового материала с целью оценки их эксплуатационных свойств. Получены значения следующих параметров в указанных диапазонах: эффективная теплопроводность составляет от 0,1121 до 0,1694 Вт/м·К, плотность — от 658,502 до 900,134 кг/м³, прочность при сжатии — от 7,52 до 29,70 МПа, прочность на растяжение при изгибе — от 0,34 до 0,90 МПа, прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям — от 9,78 до 19,44 МПа, прочность при действии сосредоточенной нагрузки (коэффициент упругости) — от 6637,97 до 27 314,43 кН/м, водопоглощение — от 0,746 до 28,127 %, адсорбционная влажность — от 0,011 до 0,059 %. Результаты исследования позволяют оценить эксплуатационные свойства пеностеклового материала для различных серий образцов и выбрать оптимальные параметры в соответствии с конкретными требованиями и условиями применения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Китайгородский И.И., Кешишян Т.Н.* Пеностекло. М. : Промстройиздат, 1953. 80 с.
2. *Демидович Б.К.* Производство и применение пеностекла. Минск : Наука и техника, 1972. 301 с.
3. *Manevich V.E., Subbotin K.Yu.* Foam glass and problems of energy conservation // Glass and Ceramics. 2008. Vol. 65. Issue 3–4. Pp. 105–108. DOI: 10.1007/s10717-008-9026-1
4. *Кетов А.А., Конев А.В., Пузанов И.С., Саулин Д.В.* Тенденции развития технологии пеностекла // Строительные материалы. 2007. № 9. С. 28–31. EDN IBEQAZ.

5. Минько Н.И., Пучка О.В. Основные направления развития технологии производства и применения пеностекла // Строительные материалы. 2007. № 5. С. 97–100. EDN HZZITZ.
6. Spiridonov Y.A., Orlova L.A. Problems of foam glass production // Glass and Ceramics. 2003. Vol. 60. Issue 9/10. Pp. 313–314. DOI: 10.1023/B:GLAC.000008234.79970.2c
7. Кетов А.А. Нанотехнологии при производстве пеностеклянных материалов нового поколения // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2009. Т. 1. № 3. С. 15–23. EDN KYVQAD.
8. Дамдинова Д.Р., Хардаев П.К., Карпов Б.А., Зонхиев М.М. Технологические подходы к получению пеностекла с регулируемой поровой структурой // Строительные материалы. 2007. № 3. С. 68–70. EDN HZITJV.
9. Шелковникова Т.И., Баранов Е.В. Исследования влияния теплотехнических факторов на процесс формирования структуры пеностекла // Огнеупоры и техническая керамика. 2006. № 10. С. 21–24. EDN NUXDCN.
10. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N., Mukhortova A.V., Popleteva Yu.V. Temperature regimes for obtaining granular material for foamed crystal glass materials as a function of the batch composition // Glass and Ceramics. 2009. Vol. 66. Issue 5–6. Pp. 179–182. DOI: 10.1007/s10717-009-9160-4
11. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. Assessment of the compositions and components for obtaining foam-glass-crystalline materials from aluminosilicate initial materials // Glass and Ceramics. 2009. Vol. 66. Issue 3–4. Pp. 82–85. DOI: 10.1007/s10717-009-9133-7
12. Shutov A.I., Yashurkaeva L.I., Alekseev S.V., Yashurkaev T.V. Study of the structure of foam glass with different characteristics // Glass and Ceramics. 2007. Vol. 64. Issue 9–10. Pp. 297–299. DOI: 10.1007/s10717-007-0074-8
13. Федосов С.В., Баканов М.О. Совершенствование технологии получения пеностекла на основе методов сетевого моделирования // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 11. С. 1551–1563. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1551-1563. EDN LSLSDF.
14. Федосов С.В., Баканов М.О. Пеностекло: особенности производства, моделирование процессов теплопереноса и газообразования // Академия. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 108–113. EDN TLLYXB.
15. Sha B., Xiong H., Zheng H., Yuan K., Wen M., Zhang Y. Analysis of the temperature field and deformation characteristics of foam glass thermal insulating decorative integrated board system // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 38. P. 102299. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102299
16. Méar F.O., Podor R., Lautru J., Genty S., Lebullenger R. Effect of the process atmosphere on glass foam synthesis: A high-temperature environmental scanning electron microscopy (HT-ESEM) study // Ceramics International. 2021. Vol. 47. Issue 18. Pp. 26042–26049. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.06.010
17. König J., Petersen R.R., Iversen N., Yue Y. Application of foaming agent–oxidizing agent couples to foamed-glass formation // Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. Vol. 553. P. 120469. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469
18. Song H., Chai C., Zhao Z., Wei L., Wu H., Cheng F. Experimental study on foam glass prepared by hydrothermal hot pressing–calcination technique using waste glass and fly ash // Ceramics International. 2021. Vol. 47. Issue 20. Pp. 28603–28613. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.07.019
19. König J., Lopez-Gil A., Cimavilla-Roman P., Rodriguez-Perez M.A., Petersen R.R., Østergaard M.B. et al. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 247. P. 118574. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118574
20. König J., Nemanič V., Žumer M., Petersen R.R., Østergaard M.B., Yue Y. et al. Evaluation of the contributions to the effective thermal conductivity of an open-porous-type foamed glass // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 214. Pp. 337–343. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.109
21. Couto da Silva R., Neves Puglieri F., Maria de Genaro Chiroli D., Antonio Bartmeyer G., Toniolo Kubaski E., Mazurek Tebcherani S. Recycling of glass waste into foam glass boards: A comparison of cradle-to-gate life cycles of boards with different foaming agents // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 771. P. 145276. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145276
22. Li J., Zhuang X., Monfort E., Querol X., Llaudis A.S., Font O. et al. Utilization of coal fly ash from a Chinese power plant for manufacturing highly insulating foam glass: Implications of physical, mechanical properties and environmental features // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 175. Pp. 64–76. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.158
23. König J., Petersen R.R., Iversen N., Yue Y. Suppressing the effect of cullet composition on the formation and properties of foamed glass // Ceramics International. 2018. Vol. 44. Issue 10. Pp. 11143–11150. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.03.130
24. Østergaard M.B., Cai B., Petersen R.R., König J., Lee P.D., Yue Y. Impact of pore structure on the thermal conductivity of glass foams // Materials Letters. 2019. Vol. 250. Pp. 72–74. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.04.106
25. Østergaard M.B., Petersen R.R., König J., Bockowski M., Yue Y. Impact of gas composition on thermal conductivity of glass foams prepared via high-pressure sintering // Journal of Non-Crystalline Solids: X. 2019. Vol. 1. P. 100014. DOI: 10.1016/j.nocx.2019.100014
26. Østergaard M.B., Zhang M., Shen X., Petersen R.R., König J., Lee P.D. et al. High-speed synchro-

tron X-ray imaging of glass foaming and thermal conductivity simulation // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 189. Pp. 85–92. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.02.060

27. *Ewais E.M.M., Attia M.A.A., El-Amir A.A.M., Elshenway A.M.H., Fend T.* Optimal conditions and significant factors for fabrication of soda lime glass foam from industrial waste using nano AlN // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 747. Pp. 408–415. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.039

28. *Fang X., Li Q., Yang T., Li Z., Zhu Y.* Preparation and characterization of glass foams for artificial floating island from waste glass and Li_2CO_3 // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 134. Pp. 358–363. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.048

29. *Petersen R.R., König J., Iversen N., Østergaard M.B., Yue Y.* The foaming mechanism of glass foams prepared from the mixture of Mn_3O_4 , carbon

and CRT panel glass // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Issue 2. Pp. 2839–2847. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.09.138

30. *Souza M.T., Maia B.G.O., Teixeira L.B., de Oliveira K.G., Teixeira A.H.B., Novaes de Oliveira A.P.* Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes // *Process Safety and Environmental Protection*. 2017. Vol. 111. Pp. 60–64. DOI: 10.1016/j.psep.2017.06.011

31. *Taurino R., Lancellotti I., Barbieri L., Leonelli C.* Glass-ceramic foams from borosilicate glass waste // *International Journal of Applied Glass Science*. 2014. Vol. 5. Issue 2. Pp. 136–145. DOI: 10.1111/ijag.12069

32. *Грушко И.С.* Влияние технологических добавок на структуру пеностекла // *Строительные материалы*. 2022. № 4. С. 44–49. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-801-4-44-48. EDN MDHJFU.

Поступила в редакцию 17 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 23 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Викторович Федосов** — доктор технических наук, профессор кафедры технологии и организации строительного производства, академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1840-8194, РИНЦ ID: 105900, Scopus: 7005670404, ResearcherID: B-2409-2017, ORCID: 0000-0001-6117-7529; fedosov-academic53@mail.ru;

Максим Олегович Баканов — доктор технических наук, доцент, начальник учебно-научного комплекса «Пожаротушение», советник РААСН; **Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России);** 153040, г. Иваново, пр. Строителей, д. 33, РИНЦ ID: 802943, Scopus: 57204434215, ResearcherID: O-1809-2017, ORCID: 0000-0001-8460-9056; mask-13@mail.ru;

Ирина Сергеевна Грушко — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного, гражданского строительства, геотехники и фундаментостроения; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ));** 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 562201, Scopus: 35519681000, ResearcherID: A-3310-2014, ORCID: 0000-0002-7552-1885; grushkois@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kitajgorodskij I.I., Keshishyan T.N. *Foam glass*. Moscow, Promstroyizdat, 1953; 80. (rus.).

2. Demidovich B.K. *Production and application of foam glass*. Minsk, Science and Technology, 1972; 301. (rus.).

3. Manevich V.E., Subbotin K.Yu. Foam glass and problems of energy conservation. *Glass and Ceramics*. 2008; 65(3-4):105-108. DOI: 10.1007/s10717-008-9026-1

4. Ketov A.A., Konev A.B., Puzanov I.S., Saulin D.V. Trends in the development of foam glass technology. *Construction Materials*. 2007; 9:17-20. EDN IBEQAZ. (rus.).

5. Min'ko N.I., Puchka O.V. Main directions of development of technology for the production and use of foam glass. *Construction Materials*. 2007; 5:97-100. EDN HZZITZ. (rus.).

6. Spiridonov Y.A., Orlova L.A. Problems of foam glass production. *Glass and Ceramics*. 2003; 60(9/10): 313-314. DOI: 10.1023/B:GLAC.0000008234.79970.2c

7. Ketov A.A. Nanotechnologies in the production of new generation foam glass materials. *Nanotechnologies in Construction: Scientific Internet journal*. 2009; 1(3):15-23. EDN KYVQAD. (rus.).

8. Damdinova D.R., Hardaev P.K., Karpov B.A., Zonhiev M.M. Technological methods for producing foam glass with an adjustable pore structure. *Construction Materials*. 2007; 3:68-70. EDN HZITJV. (rus.).
9. Shelkovnikova T.I., Baranov E.V. Study of the influence of thermal factors on the process of formation of the structure of foam glass. *Refractories and Technical Ceramics*. 2006; 10:21-24. EDN NUXDCN. (rus.).
10. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N., Mukhortova A.V., Popletneva Yu.V. Temperature regimes for obtaining granular material for foamed crystal glass materials as a function of the batch composition. *Glass and Ceramics*. 2009; 66(5-6):179-182. DOI: 10.1007/s10717-009-9160-4
11. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. Assessment of the compositions and components for obtaining foam-glass-crystalline materials from aluminosilicate initial materials. *Glass and Ceramics*. 2009; 66(3-4):82-85. DOI: 10.1007/s10717-009-9133-7
12. Shutov A.I., Yashurkaeva L.I., Alekseev S.V., Yashurkaev T.V. Study of the structure of foam glass with different characteristics. *Glass and Ceramics*. 2007; 64(9-10):297-299. DOI: 10.1007/s10717-007-0074-8
13. Fedosov S.V., Bakanov M.O. Using network modelling methods to improve the foam glass production technology. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(11):1551-1563. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1551-1563. EDN LSLSDf. (rus.).
14. Fedosov S.V., Bakanov M.O. Foam glass: characteristics of production, modeling of heat transfer and gas. *Academia. Architecture and Construction*. 2015; 1:108-113. EDN TLLYXB. (rus.).
15. Sha B., Xiong H., Zheng H., Yuan K., Wen M., Zhang Y. Analysis of the temperature field and deformation characteristics of foam glass thermal insulating decorative integrated board system. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022; 38:102299. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102299
16. Méar F.O., Podor R., Lautru J., Genty S., Lebullenger R. Effect of the process atmosphere on glass foam synthesis: A high-temperature environmental scanning electron microscopy (HT-ESEM) study. *Ceramics International*. 2021; 47(18):26042-26049. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.06.010
17. König J., Petersen R.R., Iversen N., Yue Y. Application of foaming agent–oxidizing agent couples to foamed-glass formation. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021; 553:120469. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469
18. Song H., Chai C., Zhao Z., Wei L., Wu H., Cheng F. Experimental study on foam glass prepared by hydrothermal hot pressing-calcination technique using waste glass and fly ash. *Ceramics International*. 2021; 47(20):28603-28613. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.07.019
19. König J., Lopez-Gil A., Cimavilla-Roman P., Rodriguez-Perez M.A., Petersen R.R., Østergaard M.B. et al. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density. *Construction and Building Materials*. 2020; 247:118574. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118574
20. König J., Nemanic V., Žumer M., Petersen R.R., Østergaard M.B., Yue Y. et al. Evaluation of the contributions to the effective thermal conductivity of an open-porous-type foamed glass. *Construction and Building Materials*. 2019; 214:337-343. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.109
21. Couto da Silva R., Neves Puglieri F., Maria de Genaro Chiroli D., Antonio Bartmeyer G., Toniolo Kubaski E., Mazurek Tebcherani S. Recycling of glass waste into foam glass boards: A comparison of cradle-to-gate life cycles of boards with different foaming agents. *Science of the Total Environment*. 2021; 771:145276. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145276
22. Li J., Zhuang X., Monfort E., Querol X., Llaudis A.S., Font O. et al. Utilization of coal fly ash from a Chinese power plant for manufacturing highly insulating foam glass: Implications of physical, mechanical properties and environmental features. *Construction and Building Materials*. 2018; 175:64-76. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.158
23. König J., Petersen R.R., Iversen N., Yue Y. Suppressing the effect of cullet composition on the formation and properties of foamed glass. *Ceramics International*. 2018; 44(10):11143-11150. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.03.130
24. Østergaard M.B., Cai B., Petersen R.R., König J., Lee P.D., Yue Y. Impact of pore structure on the thermal conductivity of glass foams. *Materials Letters*. 2019; 250:72-74. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.04.106
25. Østergaard M.B., Petersen R.R., König J., Bockowski M., Yue Y. Impact of gas composition on thermal conductivity of glass foams prepared via high-pressure sintering. *Journal of Non-Crystalline Solids: X*. 2019; 1:100014. DOI: 10.1016/j.nocx.2019.100014
26. Østergaard M.B., Zhang M., Shen X., Petersen R.R., König J., Lee P.D. et al. High-speed synchrotron X-ray imaging of glass foaming and thermal conductivity simulation. *Acta Materialia*. 2020; 189:85-92. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.02.060
27. Ewais E.M.M., Attia M.A.A., El-Amir A.A.M., Elshenway A.M.H., Fend T. Optimal conditions and significant factors for fabrication of soda lime glass foam from industrial waste using nano AlN. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018; 747:408-415. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.039
28. Fang X., Li Q., Yang T., Li Z., Zhu Y. Preparation and characterization of glass foams for artificial floating island from waste glass and Li₂CO₃. *Construction and Building Materials*. 2017; 134:358-363. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.048

29. Petersen R.R., König J., Iversen N., Østergaard M.B., Yue Y. The foaming mechanism of glass foams prepared from the mixture of Mn_3O_4 , carbon and CRT panel glass. *Ceramics International*. 2021; 47(2):2839-2847. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.09.138
30. Souza M.T., Maia B.G.O., Teixeira L.B., de Oliveira K.G., Teixeira A.H.B., Novaes de Oliveira A.P. Glass foams produced from glass bottles and egg-shell wastes. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 111:60-64. DOI: 10.1016/j.psep.2017.06.011
31. Taurino R., Lancellotti I., Barbieri L., Leonelli C. Glass-ceramic foams from borosilicate glass waste. *International Journal of Applied Glass Science*. 2014; 5(2):136-145. DOI: 10.1111/ijag.12069
32. Grushko I.S. The effect of technological additives on the structure of foam glass. *Construction Materials*. 2022; 4:44-49. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-801-4-44-48. EDN MDHJFU. (rus.).

Received September 17, 2023.

Adopted in revised form on October 23, 2023.

Approved for publication on December 1, 2023.

B I O N O T E S : **Sergey V. Fedosov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production, Academician RAASN; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 105900, Scopus: 7005670404, ResearcherID: B-2409-2017, ORCID: 0000-0001-6117-7529; fedosov-academic53@mail.ru;

Maksim O. Bakanov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the educational and scientific complex “Fire Extinguishing”, Advisor to RAASN; **Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (IFRA of SFS of EMERCOM of Russia)**; 33 Stroiteley ave., Ivanovo, 153040, Russian Federation; ID RSCI: 802943, Scopus: 57204434215, ResearcherID: O-1809-2017, ORCID: 0000-0001-8460-9056; mask-13@mail.ru;

Irina S. Grushko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial, Civil Engineering, Geotechnical and Foundation Engineering; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (SRSPU (NPI))**; 132 Prosvescheniya st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; ID RSCI: 562201, Scopus: 35519681000, ResearcherID: A-3310-2014, ORCID: 0000-0002-7552-1885; grushkois@gmail.com.

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.*

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 627:628

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.270-280

Оценка вибрационного состояния и определение напряженно-деформированного состояния сороудерживающих решеток гидроэлектростанций

Антон Сергеевич Антонов^{1,2}, Никита Павлович Караблин¹,
Константин Юлиевич Бод¹, Игорь Вячеславович Баклыков¹

¹ Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт “Гидропроект”
им. С.Я. Жука» — «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений»
(Филиал АО «Институт Гидропроект» — «НИИЭС»); г. Москва, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлен подход по выявлению причины повреждения отдельных ключевых элементов металлоконструкций сороудерживающей решетки (СУР) гидроэлектростанции при техногенных динамических воздействиях. Выполнены прочностные и гидравлические расчеты, а также модальный анализ конструкции. Определен подход и проведены инструментальные измерения фактических динамических характеристик СУР при различных напорах. **Материалы и методы.** Для выполнения замеров динамических техногенных воздействий разработана методика, состоящая из двух блоков. Первый блок — инструментальное и визуальное обследование для определения соответствия конструкций проектным решениям, а также выявления характерных дефектов СУР. Измерение собственных частот колебаний и виброускорений конструкций при различных напорах выполнялось при помощи пьезоэлектрических вибропреобразователей AP90, измерение виброускорений — сейсмоприемниками А16 и приемной станцией МС-200. Второй блок — математическое моделирование. Проводилось уточнение гидравлического режима, напряженно-деформированного состояния и определялись частоты и формы собственных колебаний конструкции. Расчетные исследования осуществлены в универсальном промышленном программном комплексе ANSYS Mechanical и ANSYS CFX.

Результаты. Обследование выявило наличие систематически возникающих трещин в несущем каркасе, несоответствие положения раскосов проекту. Уточнены гидродинамические нагрузки, определен диаметр и частота образования вихрей. При расчетах напряжения в металлических раскосах не превосходят нормативных величин для используемой стали. Выполненное прямое измерение вибрации элементов конструкции продемонстрировало, что наиболее опасный частотный диапазон — это 40,30–41,75 Гц.

Выводы. Установлено, что основной причиной повреждения конструкции СУР является смещение вынужденных частот и формы собственных колебаний в зону работы гидроагрегатов, что и привело к концентрации напряжений на концах раскосов в зоне примыкания к фасонкам. Стыковка раскосов к фасонке имела недостаточную длину, что приводило к передаче напряжений на край фасонки, и, как следствие, к концентрации напряжений и образованию трещин по направлению главных напряжений в узле.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидромеханическое оборудование, гидроэлектростанции, металлоконструкции, динамические испытания, напряженно-деформированное состояние, гидравлический режим, ANSYS, ANSYS CFX, расчетные исследования, метод конечных элементов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Антонов А.С., Караблин Н.П., Бод К.Ю., Баклыков И.В. Оценка вибрационного состояния и определение напряженно-деформированного состояния сороудерживающих решеток гидроэлектростанций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 270–280. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.270-280

Автор, ответственный за переписку: Антон Сергеевич Антонов, Antonov.An.S@yandex.ru.

Evaluation of the vibration state and determination of the stress-strain state of the trash-rack structure of the hydroelectric power plants

Anton S. Antonov^{1,2}, Nikita P. Karablin¹, Konstantin Ju. Baud¹, Igor V. Baklykov¹

¹ Branch of JSC “Design and survey and research Institute «Hydroproject» named after S.Y. Zhuka” — “Research Institute of Energy Structures” (Branch of JSC “Institute Hydroproject” — “NIIES”);
Moscow, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study presents an approach for detecting and identifying the causes of damage to individual key elements of metal structures of the hydroelectric power plant's trash-rack structure under anthropogenic dynamic impacts. Strength and hydraulic calculations were performed, as well as modal analysis of the structure. The approach is determined and instrumental measurements of actual dynamic characteristics of the trash-rack structure at different pressures are carried out. **Materials and methods.** A methodology consisting of two blocks was developed to perform measurements of dynamic anthropogenic impacts. The first block is an instrumental and visual inspection to determine the compliance of structures with design solutions, as well as to identify characteristic defects of the trash-rack structure. The measurement of natural frequencies of vibrations and vibration accelerations of structures at different pressures was carried out using piezoelectric vibration transducers AR90, the measurement of vibration accelerations by seismic receivers A16 and the receiving station MIC-200. The second block is mathematical modelling. The hydraulic regime and the stress-strain state were specified, frequencies and forms of natural vibrations of the structure were determined. Computational studies were carried out in the universal industrial software complex ANSYS Mechanical and ANSYS CFX.

Results. The survey revealed the presence of systematically occurring cracks in the load-bearing frame, the mismatch of the position of the struts to the design. Hydrodynamic loads are specified, diameter and frequency of vortex formation are determined. The stresses in the metal struts do not exceed the standard values for the steel used. The performed direct measurement of vibration of structural elements demonstrated that the most dangerous frequency range is 40.30–41.75 Hz.

Conclusions. It is revealed that the main cause of damage to the trash-rack structure is the displacement of forced frequencies and the shape of natural oscillations to the zone of operation of hydraulic units, which led to the concentration of stresses at the ends of the struts in the zone adjacent to the gussets. The junction of struts to the gusset had insufficient length, which led to the transfer of stresses to the edge of the gusset and, as a result, to the concentration of stresses and the formation of cracks in the direction of the main stresses in the node.

KEYWORDS: hydromechanical equipment, hydroelectric power plants, metal structures, dynamic tests, stress-strain state, hydraulic mode, ANSYS, ANSYS CFX, computational studies, finite element method

FOR CITATION: Antonov A.S., Karablin N.P., Baud K.Ju., Baklykov I.V. Evaluation of the vibration state and determination of the stress-strain state of the trash-rack structure of the hydroelectric power plants. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):270-280. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.270-280 (rus.).

Corresponding author: Anton S. Antonov, Antonov.An.S@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации эксплуатируется свыше 200 гидроэлектростанций (ГЭС), многие из которых приближаются к проектному сроку службы. При этом гидромеханическое оборудование на гидротехнических сооружениях (ГТС) также имеет длительный срок эксплуатации. На основании опыта эксплуатации затворов и сороудерживающих решеток (СУР) обнаружены различные дефекты как заводские, так и повреждения от неучтенных на момент проектирования техногенных и динамических нагрузок.

Современные средства измерения позволяют обнаружить и выявить причины повреждения отдельных ключевых элементов металлоконструкций, а математический аппарат — оценить степень влияния различных факторов. Зачастую неучтенными факторами, вызывающими существенные повреждения гидромеханического оборудования, являются

динамические воздействия от водного потока при различных режимах работы гидроагрегатов. Ключевым аспектом служит то, что при проектировании за основу принимаются проектные уровни воды и достаточно равномерное растекание потока вокруг элементов конструкции. Исходя из начальной предпосылки на стадии проекта, наилучшим для работы конструкции становится прохождение водного потока от нормального подпорного уровня (НПУ). На практике присутствуют существенные отличия от проектных постановок ввиду изменений условий эксплуатации и внешних воздействий или выявления дополнительных нагрузок, неучтенных или заниженных на этапе проектирования. К примеру, в результате длительной работы гидроагрегатов происходит изменение коэффициента полезного действия (КПД), что ведет к увеличению расходных характеристик через гидроагрегат. В изменение расходных функций вносят значительный вклад

частотные спектры колебания конструкций. Учет изменившихся нагрузок ведет к изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) гидромеханического оборудования.

Применение методов математического моделирования совместно с натурными данными инструментальных обследований и замеров дает возможность дать актуальные рекомендации для поддержания оборудования в работоспособном состоянии и обеспечить его нормальную эксплуатацию, в отличие от проектных рекомендаций, основывающихся на устаревших сведениях.

Рассматривается сороудерживающая решетка ГЭС, на которой возникают типовые дефекты (трещины) каждые 2–3 года, независимо от регулярно проводимых ремонтно-восстановительных работ. В результате научно-исследовательской работы удалось установить причины образования дефектов, а также разработать мероприятия по их устранению и предотвращению повторного появления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения динамических техногенных воздействий на гидромеханическое оборудование изучен российский и мировой опыт проведения инструментальных обследований, научно-техническая информация в части природы возникновения различных дефектов, анализ которой позволяет сделать вывод о необходимости исследования динамических нагрузок на СУР при различных режимах работы гидроагрегатов на напорах, близких к максимальному, минимальному и среднему. Для выполнения замеров динамических техногенных воздействий разработана методика выполнения работ, которая разделена на два блока.

Первый — инструментальный, включающий инструментальное и визуальное обследование для определения соответствия конструкций проектным решениям, уровень коррозионных повреждений СУР, а также виброобследование, направленное на получение виброускорений различных элементов конструкции. Для измерения виброускорений СУР использовались пьезоэлектрические вибропреобразователи герметичного исполнения АР90 производства ООО «ГлобалТест» (г. Саров). Крепление вибропреобразователей производилось шпильками к шайбам, приваренным на элементы силового каркаса. Для измерения виброускорений применялся трехкомпонентный пьезоэлектрический сейсмоприемник А16 производства ЗАО «ГЕОАКУСТИКА» (г. Зеленоград). Направления координат: ось X — по потоку, ось Y — поперек потока, ось Z — вертикально. При обработке полученной информации использовался программный продукт WinПОС (ООО НПП «Мера»), поставляемый с комплексом МПС-200. Данный программный продукт предназначен для обработки измерительной информации с помощью математических и статистических алго-

ритмов, графического представления данных и их документирования.

Второй блок — математическое моделирование. Наиболее перспективным междисциплинарным комплексом, позволяющим одновременно учитывать большое количество факторов, является ANSYS. Данный программный продукт имеет различные модули, так ANSYS CFX [1–14] позволяет решать задачи течения потока, ANSYS Mechanical — выполнять прочностные расчеты металлоконструкций, принимая во внимание различные нагрузки при учете геометрической и физической нелинейности [15–21].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматриваемые СУР размеры $14,7 \times 22,0 \times 2,0$ м находятся в эксплуатации более 15 лет и предназначены для удержания плавающих тел на поверхности воды и защиты гидротурбин. Сороудерживающая решетка состоит из сороудерживающих полос, опирающихся на несущий каркас, выполненный по типу сквозной конструкции. Каркас при этом представлен шестью типовыми секциями, верхняя дополнительно используется для крепления траверс, соединенных между собой при помощи сцепов. Металлические конструкции имеют прекоробчатые сечения опорно-концевых стоек и фасонки — используемая сталь 09Г2С-Св-12 ГОСТ 19281–89, раскосы — трубы В20 ГОСТ 8731–74.

Несущий каркас представлен в виде ферм с параболическим или сегментным очертанием в плане, передающих усилия на опорно-концевые стойки. Сороудерживающие полосы выполнены из прокатной стали 14×100 мм и объединены в 10 пакетов, соединенных стяжками диаметром 30 мм (один средний по ширине пролета пакет состоит из пяти полос). В период эксплуатации неоднократно выявлялись сквозные трещины на вертикальных и диагональных элементах каркаса. Рекомендации завода-изготовителя по восстановлению работоспособности СУР заключались в удалении дефектных фасонки (распустив сварные швы) и установке новых толщиной 12 мм. После выполнения замены фасонки через год при плановом ремонте выявлялись аналогичные разрушения и трещинообразование, кроме того, дефекты также были обнаружены на фасонках крепления опорно-концевых конструкций в верхней и нижней части.

Для определения причин повреждений проведен инструментальный и визуальный контроль решеток, изучена проектная документация, установлено, что на объекте используется три типа конструкции. На рис. 1 показаны варианты конструкций в пределах одной секции СУР, красным отмечены раскосы, которые имеют конструктивные различия.

Анализ архивных материалов и результатов расчетов прочности конструкции СУР позволил

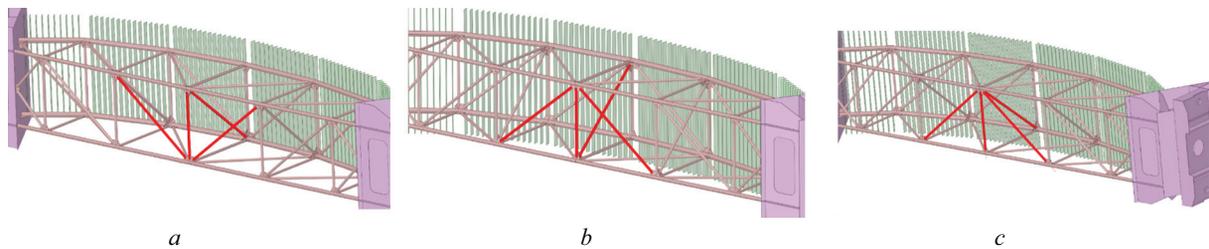


Рис. 1. Существующие схемы расположения раскосов, красным выделены различия в установке: *a* — конструкция типа *A*; *b* — конструкция типа *B*; *c* — конструкция типа *C*

Fig. 1. The existing strut layouts, differences in installation are highlighted in red: *a* — type *A* construction; *b* — type *B* construction; *c* — type *C* construction

выявить, что ранее все исследования выполнялись только на конструкции типа *A*, определение НДС фактически собранных конструкций *B* и *C*, а также секций в сборе не производилось. Еще одной важной особенностью является то, что опорно-концевые стойки сконструированы таким образом, что размеры сечения потока после СУР меньше, чем до нее. В результате этого увеличивается скорость потока и нагрузка на узлы и раскосы.

Для выявления фактических нагрузок от водного потока проведены расчетные исследования гидродинамического режима СУР, которые осуществлены в программном комплексе (ПК) ANSYS CFX, представляющем собой полноценный CFD-пакет (Computational Fluid Dynamics), в состав которого входят пре- и постпроцессоры, решатель и отдельный сеточный генератор ANSYS Meshing.

В связи с тем, что секция СУР симметричная с целью оптимизации вычислительных ресурсов для расчетов гидродинамики принято решение моделировать одну часть секции, объемная модель представлена на рис. 2.

Анализ результатов показал, что изменение сечения потока существенно меняет нагрузки на конструкции СУР. На рис. 2, *b* зона увеличенных скоростей представлена красным цветом, при этом за счет уменьшения сечения скорость течения возросла

практически в 2 раза, также заметна зона турбулентного течения с пониженным давлением. За счет сопротивления металлических конструкций несущего каркаса движению водного потока за раскосами возникает зона пониженных скоростей и давлений. Наибольшее влияние оказывается на пакет ригелей, расположенный в первом ряду у бетонной стенки, при этом давление направлено не вдоль ригеля, а под некоторым углом. Это отчетливо заметно в местах поворота несущего каркаса. В связи с этим подбор сечений ригелей и труб несущего каркаса, а также их пространственного расположения при разработке проекта позволяет значительно снизить действующие на конструкцию нагрузки. Увеличение скоростей наблюдается как на несущих трубах большого диаметра, так и на раскосах, диаметр которых почти в 2 раза меньше основных. Отдельного внимания заслуживает образование вихревой дорожки Кармана за трубами каркаса, которые могут увеличить вибрации как всей конструкции, так и ее отдельных элементов. Общий вид вихревой дорожки за трубой силового каркаса СУР представлен на рис. 3, *a*.

Определены частоты вихрей при различных диаметрах труб СУР. В соответствии с известной формулой (1) частоту вихрей f в первом приближении можно найти через скорость потока v и без-

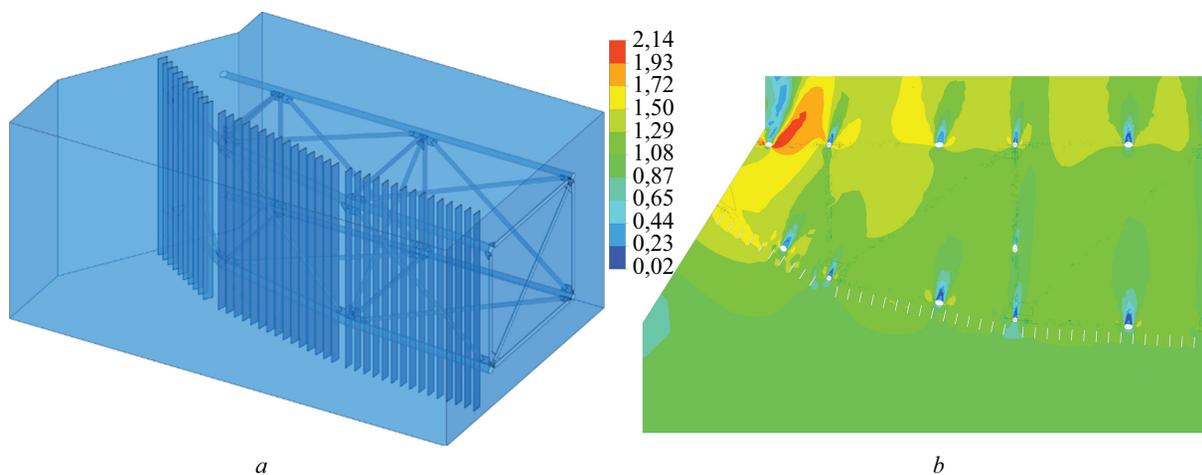


Рис. 2. Гидравлическая модель для расчета течения потока (*a*); распределение скоростей в рассматриваемом сечении, м/с (*b*)

Fig. 2. Hydraulic model for calculating the flow (*a*); velocity distribution in the section under consideration, m/s (*b*)

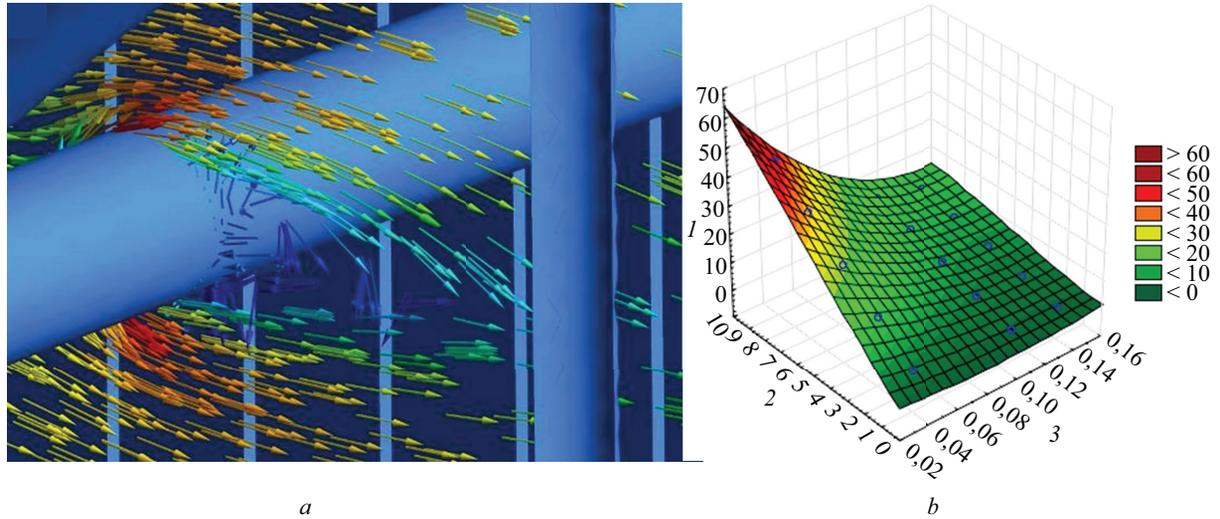


Рис. 3. Образование вихревой дорожки Кармана при прохождении потока (а); зависимость от: I — частоты вихря, Гц, 2 — скорости, м/с и 3 — диаметра, м (b)

Fig. 3. Karman vortex track formation during flow (a); dependence on: I — vortex frequency, Hz, 2 — velocity, m/s, and 3 — diameter, m (b)

размерного критерия Sh (число Струхали), а также ширины тела обтекания d :

$$f = \frac{Sh \cdot v}{d} \quad (1)$$

Результаты показаны на рис. 3, b в виде зависимости распределения частот вихрей от скорости потока и диаметра трубы. Выявлено, что при снижении диаметра трубы и увеличении скорости потока частота вихрей увеличивается.

На основании полученных данных гидравлического моделирования потока проведен модальный анализ конструкции, а также выполнены расчеты НДС СУР. При этом в соответствии с возможностями решения междисциплинарных задач в ПК ANSYS осуществлен пересчет скоростей в гидродинамическое давление на конструкции. Принятые давления

для дальнейших расчетов представлены на рис. 4. В результате анализа расчетов можно сделать вывод, что наблюдается увеличение горизонтального давления на раскос, находящийся на грани несущего каркаса, обращенной в сторону гидроагрегата.

В связи с тем, что визуальное обследование показало, что секции каркаса отличаются от проектных схем, расчеты НДС выполнены для 3 типов секций в соответствии с фактической установкой раскосов. При расчетах учтены следующие нагрузки: нагрузка от собственного веса секции; нагрузка от веса вышележащих секций; гидродинамическая нагрузка на опорную раму.

Расположение раскосов по типу A показало, что максимальные напряжения в основных конструкциях составляют 155,96 МПа, что не превышает нормативных значений. Направление главных напряже-

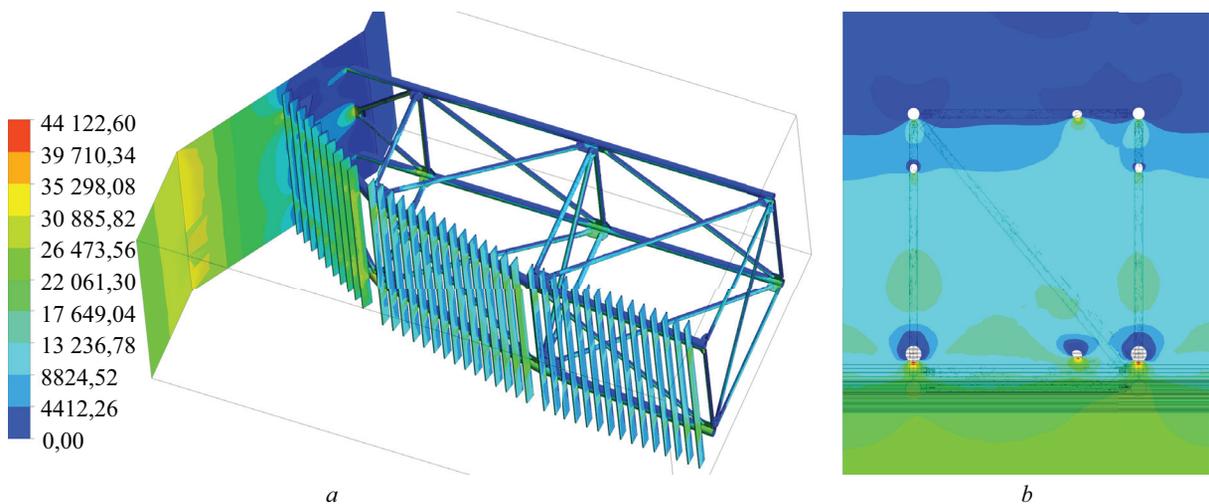


Рис. 4. Распределение гидродинамического давления, Па (а); вертикальное сечение (b)

Fig. 4. Distribution of hydrodynamic pressure, Pa (a); vertical cross section (b)

ний в верхней фасонке и максимальные главные напряжения направлены в соответствии с обнаруженными дефектами.

При расположении расколов по типу *B* наблюдается перераспределение напряжений и общий рост в пределах 5 % до 163,57 МПа. Наихудшим расположением расколов является тип *C*, в котором фиксируется рост величин напряжений в элементах секции до 246,1 МПа или на 57 %, но при этом максимальные величины напряжений не превосходят нормативных величин для стали 09Г2С-Св-12 ГОСТ 19281–89. Наиболее нагруженной стороной рамы является тыловая грань, обращенная к гидроагрегатам. Изменение угла внутреннего раскоса, соединяющего напорную грань и грань со стороны гидроагрегатов, имеет незначительное влияние на НДС СУР.

Точки экстремума эквивалентных напряжений в конструкциях СУР изменяются, так, при непроектном расположении расколов напряжения в нижнем поясе рамы больше, чем в верхнем, при этом фиксируется расположение локального максимума вблизи центрального вертикального раскоса. С учетом непроектного расположения расколов по типу *A* напряжения в верхнем поясе рамы больше, чем в нижнем. Расчеты показали, что напряжения в фасонках, соединяющих раскосы, находятся в допустимых величинах, однако направления главных напряжений соответствуют фиксируемому инструментальными методами дефектам. В связи с этим сделан вывод о существенном вкладе динамической составляющей нагрузки, принято решение выполнить инструментальное определение частот и форм собственных колебаний конструкций СУР и проверить эффект резонанса при различных режимах течения потока расчетными методами.

Модальный анализ секции СУР выполнен на объемной модели секции, при анализе определены 50 первых собственных частот колебаний конструкции. На рис. 5 представлен график частоты и форм собственных колебаний конструкции.

По данным инструментальных обследований дефекты фиксировались на фасонках расколов, расположенных на тыловой грани несущего каркаса, со стороны гидроагрегатов, при анализе выделены частоты, оказывающие наибольшее влияние, различно установленные раскосы (выделены красным на рис. 1). На основании выделенных частот проводился прочностной расчет элементов. Главные частоты выделяются по направлению воздействия, так, в направлении вдоль потока основные формы 8–13, которым соответствуют частоты в диапазоне 40,389–44,140 Гц. В вертикальном и поперек потока направлении основные формы вибрации 30, 31, 35 и 39, которым соответствуют частоты 55,63, 56,18, 59,57 и 62,54 Гц. Инструментальные замеры сейсмоприемниками А16 производства ЗАО «ГЕОАКУСТИКА» и комплексом МПС-200 показали, что фактические частоты при работающих гидроагрегатах составляют 41–43 Гц, а расчетные собственные частоты конструкции находятся в диапазоне 40–50 Гц. Соответственно на этих частотах может происходить эффект резонанса, приводящий к существенному увеличению усилий в конструкции. Пример расстановки датчиков для секции типа *B* и получаемого сигнала при номинальной мощности гидроагрегата приведен на рис. 6.

Выполненные расчеты НДС показали, что при 23,24 Гц, т.е. при 2-й форме колебаний, напряжения в конструкции не превосходят нормативных значений для стали 09Г2С-Св-12 ГОСТ 19281–89 и В20 ГОСТ 8731–74. Результат расчета НДС при 43,765 Гц показан на рис. 7, при частоте 43,765 Гц

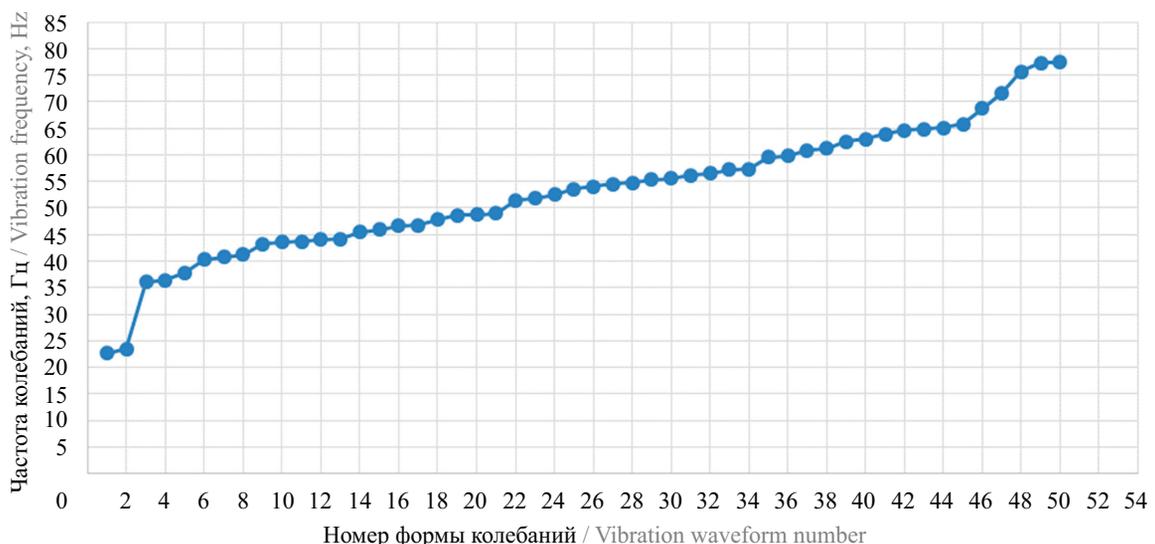


Рис. 5. Частоты 50 первых форм колебаний

Fig. 5. Frequencies of the first 50 forms of vibrations

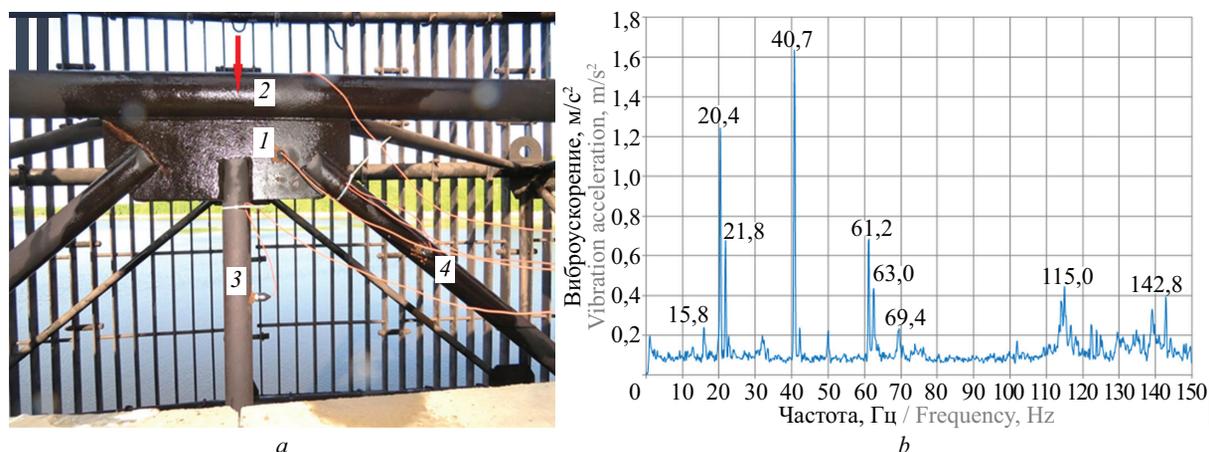


Рис. 6. Расстановка датчиков для натурных испытаний (а); пример частотного сигнала (b)

Fig. 6. Arrangement of sensors for field tests (a); example of a frequency signal (b)

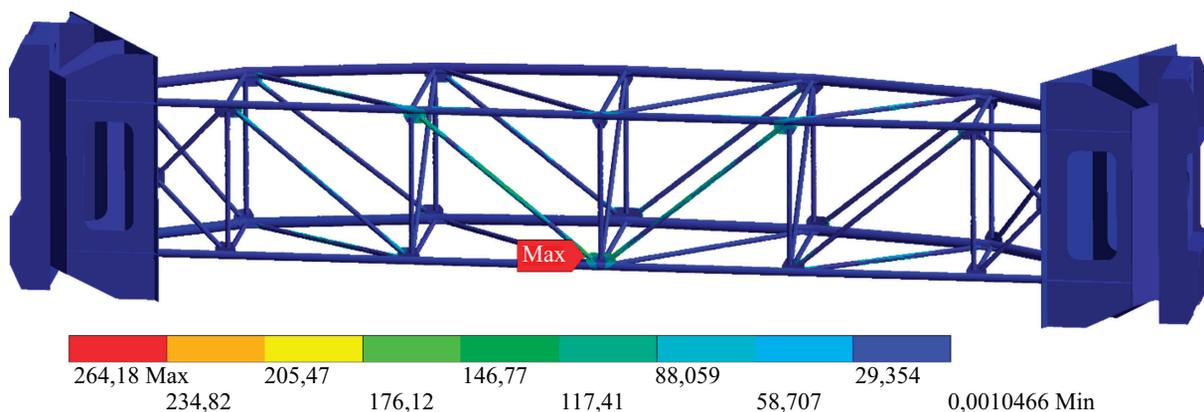


Рис. 7. Эквивалентные напряжения, МПа, при частоте 43,765 Гц

Fig. 7. Equivalent stresses, MPa, at a frequency of 43.765 Hz

эквивалентные напряжения достигают предела текучести металла, что приводит к трещинообразованию в фасонках. Увеличение толщины фасонки незначительно сказывается на общем НДС конструкции. На рис. 8 приведено направление векторов главных напряжений, приводящих к трещинам отрыва в фасонках, а также фактическое трещинообразование и разрушение, зафиксированное при инструментальном контроле состояния СУР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Инженерно-техническое обследование СУР выявило наличие трещин в металлических деталях несущего каркаса, вызванных повышенными вибрациями конструктивных элементов. При этом все проектные расчеты проведены без учета фактической схемы монтажа и типов конструкций.

На основании натурных и архивных данных разработана гидродинамическая математическая модель для расчетов движения жидкости через СУР. Результаты расчета показали неравномерность нагрузки по ширине СУР, а также позволили уточ-

нить величины нагрузок. Расчеты вихреобразования за элементами круглых сечений продемонстрировали, что при диаметре раскоса 70 мм частота образования вихрей составляет 23 Гц.

Для расчетов НДС разработаны математические конечно-элементные модели СУР, на базе которых исследованы конструкции по типам А, В и С. В результате расчета определены максимальные напряжения в металлическом каркасе, не превышающие нормативных величин для стали 09Г2С-Св-12 ГОСТ 19281–89.

С целью оценки вибрационных воздействий на НДС СУР выполнен модальный анализ конструкций, при этом основные частоты имеют существенные различия по направлению воздействия, так, в направлении вдоль потока основные формы 8–13, которым соответствуют частоты в диапазоне 40,39–44,14 Гц. В вертикальном и поперек потока направлении основные формы вибрации 30, 31, 35 и 39, которым соответствуют частоты 55,63, 56,18, 59,57 и 62,54 Гц. Натурные испытания показали, что максимальные амплитуды вибрации на резонансных частотах 40–43 Гц наблюдались на всех элементах

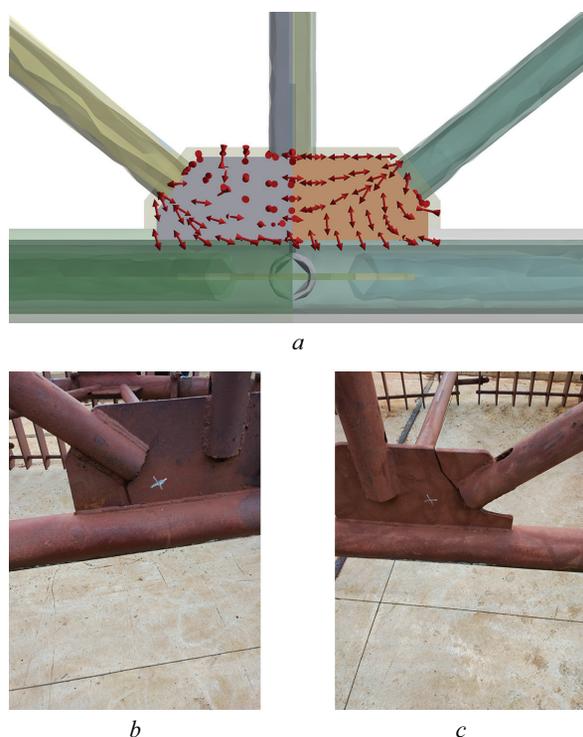


Рис. 8. Направление векторов главных напряжений (а); фактическое трещинообразование и разрушение (б, с)

Fig. 8. Direction of the vectors of the main stresses (a); actual cracking and destruction (b, c)

каркаса СУР при нагрузке, равной номинальной мощности гидроагрегатов, при этом данные частоты являются наиболее опасными для элементов СУР.

Исходя из результатов натурных испытаний и многовариантных расчетов на математических моделях выявлено, что основной причиной значительной вибрации СУР является изменение вынужденных форм и частот собственных колебаний и смещение их величины в зону работы гидроагрегатов при исполнении по типам В и С вследствие измененного расположения раскосов, что при определенных режимах работы агрегатов приводило к появлению резонанса и концентрации напряжений на концах раскосов в зоне примыкания к фасонкам.

При этом стыковка раскосов к фасонке имела недостаточную длину, что влекло за собой передачу напряжений на край фасонки и концентрацию напряжений, что приводило к образованию трещин по направлению главных напряжений в узле.

Для устранения причин возникновения дефектов рекомендовано рассмотреть возможность изменения конструкции фасонки или ее усиление для обеспечения достаточного прочностного запаса узла. Кроме того, возможно рассмотреть наращивание площади опирания раскосов на фасонку или стыковку осей раскосов в одной точке, что приведет к образованию «правильной» формы фермы и перераспределению напряжений.

Изменение формы стыковки фермы или конструкции узла фасонки позволит увеличить жесткость конструкции и изменить форму и частоту вынужденных колебаний, вероятно, сместив их в диапазон безопасных величин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Селезнев В.Н. Прогнозирование энергетических характеристик обратимой гидромашин на напор до 250 м // Известия МГТУ МАМИ. 2022. Т. 16. № 1. С. 13–19. DOI: 10.17816/2074-0530-104580. EDN TAWRPF.
2. Жарковский А.А., Щур В.А., Мохаммад О. Прогнозирование энергетических и кавитационных характеристик быстроходных радиально-осевых гидротурбин // Известия МГТУ МАМИ. 2022. Т. 16. № 3. С. 225–324. DOI: 10.17816/2074-0530-105208. EDN VJRJGU.
3. Антонов А.С., Караблин Н.П., Минаков В.А., Карпинский А.В. Разработка и обоснование универсальной конструкции для энергетических испытаний в проточных трактах гидроэлектростанций // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 7. С. 933–943. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.933-943. EDN FSMFPY.
4. Schiffer J., Benigni H., Jaberg H., Ehrenguber M. Reliable prediction of pressure pulsation in the draft tube of a Francis turbine at medium and deep part load: A validation of CFD-results with experimental

- data // Proceedings of Hydro 2018. Progress through Partnerships. 2018.
5. Yang L.F., Zhang S.R., Liu W.N., Yang Y., Zhang Y.J. Application ANSYS CFX in modeling turbine Blade // Materials Science Forum. 2009. Vol. 626–627. Pp. 593–598. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.626-627.593
6. Mohammed O., Aziz Y. CFD Modeling of simultaneous flow over broad crested weir and through pipe culvert using different turbulence models // Zanco Journal of Pure and Applied Sciences. 2018. Vol. 30. Issue 5. DOI: 10.21271/ZJPAS.30.5.11
7. Twayna R., Manandhar R., Singh B., Dahal D., Kayastha A., Thapa B.S. Numerical investigation of cavitation in Francis turbine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1037. Issue 1. P. 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/1037/1/012017
8. Мураева М.А., Гумеров А.В., Каримов Т.Р. Верификация методики газодинамического расчета осевой турбины в программном комплексе Ansys CFX на базе экспериментальных исследований плоских решеток // Вызовы современности и стратегии разви-

тия общества в условиях новой реальности : сб. мат. X Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 132–137. DOI: 10.34755/IROK.2022.32.24.045. EDN PNMEFL.

9. Ahmed S., Aziz Y., Aziz Y. Numerical modeling of flow in side channel spillway using ANSYS-CFX // Zanco Journal of Pure and Applied Sciences. 2018. Vol. 30. Issue s1. DOI: 10.21271/ZJPAS.30.s1.10

10. Mohammed O.K., Aziz Y.W. CFD modeling of simultaneous flow over broad crested weir and through pipe culvert using different turbulence models // Zanco Journal of Pure and Applied Sciences. 2018. Vol. 30. Issue 5. DOI: 10.21271/ZJPAS.30.5.11

11. Majeed H.Q., Ghazal A.M. CFD simulation of velocity distribution in a river with a bend cross section and a cubic bed roughness shape // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 928. P. 022038. DOI: 10.1088/1757-899X/928/2/022038

12. Kadia S., Kumar B., Pummer E., Ruther N., Ahmad Z. Experimental and CFD simulation studies on the flow approaching a type-a piano key weir // EGU General Assembly. 2021. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-10030

13. Saleh S.M., Husain S.M. Numerical study to evaluate the performance of nonuniform stepped spillway using ANSYS-CFX // Polytechnic Journal. 2020. Vol. 10. Issue 2. Pp. 1–9. DOI: 10.25156/ptj.v10n2y2020.pp1-9

14. Власов В.А., Клопотов А.А., Пляскин А.С., Буньков В.Е., Устинов А.М. Оценка напряженно-деформированного состояния вертикального резервуара, усиленного углекомпозитным бандажом, на основе численных исследований в ПК ANSYS // Современные строительные материалы и технологии : сб. науч. ст. III Междунар. конф. 2020. С. 111–120. EDN FQWJJC.

15. Фабричная К.А., Фаррахова Ч.Ф. Исследование напряженно-деформированного состояния узла

сталежелезобетонного каркаса здания в ПК ANSYS // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 4 (11). С. 25–35. EDN MMZSRF.

16. Фабричная К.А., Саубанова А.М. Исследование напряженно-деформированного состояния элементов опорного узла консоли в ПК ANSYS // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 3 (10). С. 24–33. EDN MCSCSA.

17. Трастьян Н.А., Линьков Н.В. Разработка рамных узлов стальных конструкций с учетом пластических деформаций // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1.

18. Галиева А.Б., Галиев Г.Н. Моделирование конструкций многоярусной однопролетной рамы в ПК ANSYS с учетом регулирования усилий в узлах сопряжения ригелей с колоннами // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. № 2. С. 90–92. EDN UCTJTZ.

19. Грибанов Я.И., Калугин А.В., Балакирев А.А. Расчетный комплекс для прочностного анализа несущих конструкций покрытия спортивного сооружения // Вестник МГСУ. 2012. № 8. С. 85–90.

20. Голоднов А.И., Иванов А.П., Псюк В.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния стальных конструкций по результатам выполненного обследования // Металлические конструкции. 2011. Т. 17. № 3. С. 167–175. EDN OBVAOT.

21. Кравченко Г.М., Костенко Д.С. Моделирование узлового соединения элементов облегченных стальных конструкций // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2019. № 4 (204). С. 51–56. DOI: 10.17213/0321-2653-2019-4-51-56. EDN WYAHRR.

Поступила в редакцию 21 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 23 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Антон Сергеевич Антонов** — кандидат технических наук, главный инженер по оборудованию и гидротехническим сооружениям; **Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт “Гидропроект” им. С.Я. Жука** — «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (Филиал АО «Институт Гидропроект» — «НИИЭС»); 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7374-6867, Scopus: 57197566337, ResearcherID: AAC-7597-2022, ORCID: AAC-7597-2022; Antonov.An.S@yandex.ru;

Никита Павлович Караблин — главный инженер по турбинному и гидромеханическому оборудованию; **Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт “Гидропроект” им. С.Я. Жука** — «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (Филиал АО «Институт Гидропроект» — «НИИЭС»); 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; n.karablin@hydroproject.ru;

Константин Юлиевич Бод — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник; **Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт “Гидропроект” им. С.Я. Жука** — «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (Филиал АО «Институт Гидропроект» — «НИИЭС»); 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; baudk@yandex.ru;

Игорь Вячеславович Баклыков — главный специалист; **Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт “Гидропроект” им. С.Я. Жука** — «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (Филиал АО «Институт Гидропроект» — «НИИЭС»); 125080, г. Москва,

Волоколамское шоссе, д. 2; РИНЦ ID: 915462, Scopus: 56538614100, ORCID: 0000-0002-8374-9046; moscow_igor88@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Seleznev V.N. Forecasting the energy characteristics of a reversible hydraulic machine for a head up to 250 m. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2022; 16(1):13-19. DOI: 10.17816/2074-0530-104580. EDN TAWRPF. (rus.).
2. Zharkovskiy A.A., Schur V.A., Mohammad O. Prediction of energy and cavitation characteristics of high specific speed Francis hydraulic turbines. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2022; 16(3):225-324. DOI: 10.17816/2074-0530-105208. EDN VJRJGU. (rus.).
3. Antonov A.S., Karablin N.P., Minakov V.A., Karpinsky A.V. Development and justification of universal designs for energy tests in flow paths of hydroelectric power plants. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(7):933-943. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.933-943. EDN FSMFPY. (rus.).
4. Schiffer J., Benigni H., Jaberg H., Ehrenguber M. Reliable prediction of pressure pulsation in the draft tube of a Francis turbine at medium and deep part load: A validation of CFD-results with experimental data. *Proceedings of Hydro 2018. Progress through Partnerships*. 2018.
5. Yang L.F., Zhang S.R., Liu W.N., Yang Y., Zhang Y.J. *Application ANSYS CFX in modeling turbine blade*. *Materials Science Forum*. 2009; 626-627:593-598. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.626-627.593
6. Mohammed O., Aziz Y. CFD modeling of simultaneous flow over broad crested weir and through pipe culvert using different turbulence models. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*. 2018; 30(5). DOI: 10.21271/ZJPAS.30.5.11
7. Twayna R., Manandhar R., Singh B., Dahal D., Kayastha A., Thapa B.S. Numerical investigation of cavitation in Francis turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 1037(1):012017. DOI: 10.1088/1755-1315/1037/1/012017
8. Muraeva M.A., Gumerov A.V., Karimov T.R. Axial turbine gas-dynamic calculation procedure verification in the Ansys CFX software based on linear turbine grids experiments. *Challenges of our time and strategies for the development of society in the new reality : collection of materials from the X International Scientific and Practical Conference*. DOI: 10.34755/IROK.2022.32.24.045. EDN PNMEFL. (rus.).
9. Ahmed S., Aziz Y., Aziz Y. Numerical modeling of flow in side channel spillway using ANSYS-CFX. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*. 2018; 30(s1). DOI: 10.21271/ZJPAS.30.s1.10
10. Mohammed O.K., Aziz Y.W. CFD modeling of simultaneous flow over broad crested weir and through pipe culvert using different turbulence models. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*. 2018; 30(5). DOI: 10.21271/ZJPAS.30.5.11
11. Majeed H.Q., Ghazal A.M. CFD simulation of velocity distribution in a river with a bend cross section and a cubic bed roughness shape. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 928:022038. DOI: 10.1088/1757-899X/928/2/022038
12. Kadia S., Kumar B., Pummer E., Ruther N., Ahmad Z. Experimental and CFD simulation studies on the flow approaching a type-a piano key weir. *EGU General Assembly*. 2021. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-10030
13. Saleh S.M., Husain S.M. Numerical study to evaluate the performance of nonuniform stepped spillway using ANSYS-CFX. *Polytechnic Journal*. 2020; 10(2):1-9. DOI: 10.25156/ptj.v10n2y2020.pp1-9
14. Vlasov V., Klopotov A., Plyaskin A., Bunkov V., Ustinov A. Evaluation of the stressed-deformed state of the vertical reservoir of a reinforced carbon bandage based on numerical researches in ANSYS PC. *Modern building materials and technologies : collection of scientific articles of the III International Conference*. 2020; 111-120. EDN FQWIJC. (rus.).
15. Fabrichnaya K.A., Farrahova Ch.F. Research stressed-deformed state of the node steel-concrete building frame in ANSYS PC. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2019; 4(11):25-35. EDN MMZSRF. (rus.).
16. Fabrichnaya K.A., Saubanova A.M. Investigation of the stress-strain state of the elements of the console support node in the ANSYS PC. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2019; 3(10):24-33. EDN MCSCSA. (rus.).
17. Trastyan N.A., Linkov N.V. Development of steel framework frames with regard to plastic deformations. *Engineering Journal of Don*. 2019; 1. (rus.).
18. Galieva A.B., Galiev D.N. Modeling of multistoried single-span frame structure with a force control in the beam-to-column nodes in ANSYS software. *Akademicheskii vestnik UralNIiproekt RAASN*. 2015; 2:90-92. EDN UCTJTZ. (rus.).
19. Griбанov Ya.I., Kalugin A.V., Balakirev A.A. System for the strength analysis of the bearing structures of the sports facility covering. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 8:85-90. (rus.).
20. Golodnov O., Ivanov A., Psyuk V. Simulation of stress-strain state of steel structures due to the results of the survey. *Metall Constructions*. 2011; 17(3):167-175. EDN OBVAOT. (rus.).
21. Kravchenko G.M., Kostenko D.S. Behaviour

of screw connections in cold-formed steel structures. *Sciences Series*. 2019; 4(204):51-56. DOI: 10.17213/University News. North-Caucasian Region. *Technical* 0321-2653-2019-4-51-56. EDN WYAHRR. (rus.).

Received October 21, 2023.

Adopted in revised form on October 23, 2023.

Approved for publication on December 1, 2023.

B I O N O T E S: **Anton S. Antonov** — Candidate of Technical Sciences, chief engineer for equipment and hydraulic structures; **Branch of JSC “Design, survey and research institute «Hydroproject» named after S.Y. Zhuka” — “Research institute of energy structures” (Branch of JSC “Institute Hydroproject” — “NIIES”);** 2 Volokolamskoye shosse, Moscow, 125080, Russian Federation; Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);** 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7374-6867, Scopus: 57197566337, ResearcherID: AAC-7597-2022, ORCID: AAC-7597-2022; Antonov.An.S@yandex.ru;

Nikita P. Karablin — chief engineer for turbine and hydro-mechanical equipment; **Branch of JSC “Design, survey and research institute «Hydroproject» named after S.Y. Zhuka” — “Research institute of energy structures” (Branch of JSC “Institute Hydroproject” — “NIIES”);** 2 Volokolamskoye shosse, Moscow, 125080, Russian Federation; n.karablin@hydroproject.ru;

Konstantin Ju. Baud — Candidate of Technical Sciences, leading researcher; **Branch of JSC “Design, survey and research institute «Hydroproject» named after S.Y. Zhuka” — “Research institute of energy structures” (Branch of JSC “Institute Hydroproject” — “NIIES”);** 2 Volokolamskoye shosse, Moscow, 125080, Russian Federation; baudk@yandex.ru;

Igor V. Baklykov — chief specialist; **Branch of JSC “Design, survey and research institute «Hydroproject» named after S.Y. Zhuka” — “Research institute of energy structures” (Branch of JSC “Institute Hydroproject” — “NIIES”);** 2 Volokolamskoye shosse, Moscow, 125080, Russian Federation; ID RSCI: 915462, Scopus: 56538614100, ORCID: 0000-0002-8374-9046; moscow_igor88@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 626/627

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.281-293

Анализ фильтрации через земляную плотину с диафрагмой на непроницаемом основании с помощью программы PLAXIS 2D

Генрих Васильевич Орехов, Чан Мань Кыонг

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В современных условиях изменения климата защита ирригационных сооружений, особенно плотин, является важной задачей. Фильтрация — одна из основных причин разрушения плотин, поэтому требуется исследовать режимы фильтрации и искать решения для предотвращения разрушений сооружений в результате фильтрационных процессов в земляных плотинах. Анализ фильтрационных режимов в теле грунтовых плотин производится с помощью математического моделирования с использованием численных моделей конечных элементов. В качестве объекта исследования принята однородная земляная плотина с несовершенной диафрагмой на непроницаемом основании. Цель исследования — определить влияние относительных параметров: высоты диафрагмы, расположения диафрагмы в теле плотины, их количества. Анализируются влияние параметров диафрагмы на фильтрационный расход, проходящий через тело плотины, и ее скорость.

Материалы и методы. Исследование выполнено с помощью численного моделирования в программном комплексе PLAXIS 2D. Модель плотины построена на основе типовых конструктивных решений, применяемых на практике.

Результаты. Размещение диафрагмы в теле плотины снижает фильтрационный поток через плотину, а высота диафрагмы обратно пропорциональна расходу фильтрации. Максимальная фильтрационная скорость зафиксирована на верхнем конце диафрагмы, ее величина прямо пропорциональна высоте диафрагмы. При смещении диафрагмы в сторону нижнего бьефа фильтрация несколько уменьшается. Значение максимальной скорости увеличивается при смещении диафрагмы в сторону нижнего бьефа.

Выводы. Разрушение плотины из-за фильтрации может привести к серьезному материальному ущербу и гибели людей. Внедрение методов, снижающих фильтрационные расходы и скорость фильтрации, важно для обеспечения безопасных условий работы плотины.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фильтрация, земляная плотина, метод конечных элементов, несовершенная диафрагма, разрушение плотины, фильтрационный расход, скорость фильтрации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Орехов Г.В., Чан Мань Кыонг. Анализ фильтрации через земляную плотину с диафрагмой на непроницаемом основании с помощью программы PLAXIS 2D // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 281–293. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.281-293

Автор, ответственный за переписку: Чан Мань Кыонг, cuonghtcs@gmail.com.

Analysis of seepage through an earth dam with a diaphragm on an impermeable foundation using PLAXIS 2D

Genrikh V. Orekhov, Tran Manh Cuong

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

ABSTRACT

Introduction. In the current climate change conditions, the protection of irrigation structures, especially dams, is a very important task. Seepage is one of the main causes of dam failure, so it is very important to investigate the seepage regimes and find solutions to prevent dam failures as a result of the seepage processes in earth dams. In this paper, the analysis of the seepage regimes in the body of earth dams is performed by means of mathematical modelling using numerical finite element models. A homogeneous earth dam with an imperfect diaphragm on an impermeable foundation is taken as the object of study. The purpose of the study is to determine the influence of relative parameters: diaphragm height, diaphragm location in the dam body, their number. In addition, the influence of diaphragm parameters on the seepage flow through the dam body and its velocity is analyzed.

Materials and methods. The study was carried out with the help of numerical modelling using PLAXIS 2D software. The model of the dam is based on typical design solutions used in practice.

Results. The results of the study show that the placement of the diaphragm in the dam body reduces the seepage flow through the dam and the height of the diaphragm is inversely proportional to the seepage rate. The maximum seepage rate

was recorded at the upper end of the diaphragm and its magnitude is directly proportional to the height of the diaphragm. When the diaphragm is displaced towards the downstream side, the filtration rate slightly decreases. The value of maximum velocity increases when the diaphragm is displaced towards the downstream end.

Conclusions. Dam failure due to seepage can result in serious property damage and loss of life. Implementing methods that reduce seepage discharge and seepage velocities is important to ensure safe dam operating conditions

KEYWORDS: seepage, earthen dam, finite element method, diaphragm, dam failure, seepage discharge, seepage velocity

FOR CITATION: Orekhov G.V., Tran Manh Cuong. Analysis of seepage through an earth dam with a diaphragm on an impermeable foundation using PLAXIS 2D. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):281-293. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.281-293 (rus.).

Corresponding author: Tran Manh Cuong, cuonghtcs@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Земляные плотины являются наиболее распространенным типом водоподпорных сооружений. Они строятся для разных целей, таких как гидроэнергетика, защита от наводнений, ирригации, сооружение искусственных водоемов и т.д. [1, 2]. В Социалистической Республике Вьетнам было построено и строится сейчас большое количество гидротехнических объектов в основном из местных грунтовых материалов, образующих многочисленные водохранилища разного размера и назначения. В настоящее время на территории страны насчитывается около 1200 водохранилищ¹, образованных грунтовыми плотинами, которые за период длительной эксплуатации достигли стадии износа основных строительных конструкций и нуждаются в ремонте и реконструкции. Многие из этих плотин относятся к малым и средним (III и IV классы опасности). Оценка эксплуатационной надежности и безопасности этих гидротехнических объектов — актуальная проблема для Вьетнама.

Грунтовая плотина, состоящая из ряда элементов, должна соответствовать показателям конструктивной надежности этих элементов. Это, прежде всего, прочность (механическая и фильтрационная), устойчивость, трещиностойкость противофильтрационных элементов, коррозионная и биологическая стойкость и др. Одна из основных причин разрушения грунтовых плотин — недоучет фильтрационных процессов на стадии проектирования и периода эксплуатации [3–5]. В грунтовых плотинах для снижения фильтрационного воздействия на тело плотины применяются различные противофильтрационные элементы [6, 7]. Широкое распространение получили диафрагмы, устанавливаемые в теле плотины. Эти конструктивные элементы могут быть высотой, равной высоте плотины (совершенные диафрагмы), или иметь частичную высоту (несовершенные). Последние наиболее часто используются в низконапорных грунтовых плотинах (высотой до 30 м). Это значительно удешевляет сооружение. Диафрагмы, как противофильтрационные элементы, получили распространение и в связи с широким внедрением полимерных материалов [8].

¹ По данным отчетов об управлении безопасностью водоснабжения Генерального управления орошения Министерства сельского хозяйства и развития сельских районов Вьетнама. Вьетнам, октябрь 2020.

Фильтрация служит важным фактором, который необходимо тщательно изучить при создании сооружения. Она должна контролироваться и в процессе эксплуатации, чтобы предотвратить эрозию, движение мелких материалов, составляющих тело плотины, или внешнюю эрозию, отслаивание [9, 10]. При однородной конструкции плотины накопление избыточного порового давления в теле плотины и фильтрация являются проблемой, особенно для водохранилищ с резкими и частыми колебаниями за короткое время [11]. Неправильная оценка фильтрационных процессов, ошибки в выборе противофильтрационных элементов могут привести к неустойчивости и повреждению всей или части поверхности низового откоса.

В земляных плотинах изучение фильтрации можно применять для оценки кривой депрессии, порового давления в поперечном сечении земляной плотины или основания плотины, градиента фильтрационного потока через плотину. Анализ фильтрации также используется для оценки эффективности выбора различных конструкций противофильтрационных элементов, применяемых для сооружения [12].

В настоящей статье исследуется фильтрация в теле однородной плотины с несовершенной диафрагмой различной геометрии и положения в поперечном сечении плотины. Выбор такого противофильтрационного элемента связан с тем, что в последнее время с широким применением полимеров в строительстве хорошо себя зарекомендовали различные пленочные водонепроницаемые листовые материалы, имеющие низкую стоимость и сравнительно большую долговечность, что привлекательно при массовом строительстве низконапорных грунтовых плотин.

Анализ фильтрации может быть выполнен различными методами: аналитическими, экспериментальными, численными. К.К. Винсент и его коллеги применили формулу закона Дарси для расчета фильтрации в земляной плотине [12]. М.М. Саззэд, М. Рой и М.С. Рахман использовали аналитические и численные методы для расчета фильтрационного потока через плотину [13]. Х.А.А. Абдель-Гавад и соавт. выбрали метод граничных элементов для расчета фильтрации с горизонтальными фильтрами на непроницаемых основаниях [14].

С помощью программного обеспечения SEEP2D R.H. Irzooki рассчитал фильтрацию через плотину с горизонтальным дренажем [15]. Математическое моделирование на основе численных методов становится наиболее популярным способом определения основных параметров фильтрационного потока в различных конструкциях грунтовых плотин [16, 17]. Этот способ менее трудозатратен, чем физическое моделирование. Возрастающие возможности персональных компьютеров делают математическое моделирование хорошим выбором. Одновременно следует отметить, что математическое и физическое моделирование, как способы исследования сложных гидродинамических задач, не лишены недостатков. В настоящее время эти два способа исследования дополняют друг друга в стремлении получить надежные результаты.

В представленной статье авторы использовали программу PLAXIS 2D (плоская задача) для расчета фильтрации через земляную плотину с несовершенной диафрагмой на непроницаемом основании для различных режимов фильтрации и расположения, и геометрии диафрагмы. Исследование направлено на определение влияния диафрагмы, а также ее высоты и положения в теле плотины на фильтрационный расход и скорость через поперечное сечение плотины, что позволило обоснованно выбрать наиболее оптимальные технические решения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применяемые модели

В данном исследовании была принята однородная грунтовая плотина на непроницаемом основании. Высота плотины $H = 22$ м, гребень плотины $B = 6$ м, ширина по подошве $L = 132$ м. Нормальный подпорный уровень $H_1 = 20$ м, в нижнем бьефе нет воды. Верховой и низовой откосы заложением 3:1 (рис. 1). Ширина гребня выбирается в соответствии с рекомендациями Бюро мелиорации США (U.S. Bureau of Reclamation)², а заложение верхового

² Design Standards No. 13. Embankment Dams, Chapter 6 “Freeboard” // Bureau of Reclamation. Denver, Colorado, 2021.

и низового откосов в соответствии с рекомендациями Терзаги и Стрэнджа².

Сначала плотина исследовалась без диафрагмы, затем в середине поперечного сечения плотины добавлена диафрагма. Изучено пять различных высот несовершенной диафрагмы. Высота диафрагмы обозначена H_d . Исследовалось пять значений, отнесенных к напору H_1 : $H_d/H_1 = 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 0,75$, а также три различных положения диафрагмы по длине L для высоты диафрагмы $H_d/H_1 = 0,25; 0,5$ и $0,75$. Для этого введена прямоугольная система координат, ноль которой совпадает с точкой гребня плотины со стороны верхнего бьефа (рис. 1, красные линии). Крайнее левое положение диафрагмы соответствует цифре 1 на рис. 1 ($X/B = 0$). Среднее и крайнее правое положения соответствуют цифрам 2 и 3.

На рис. 2 показана деформация сетки рассматриваемой области. Исследовано влияние наличия диафрагмы, а также ее высоты и расположения в теле плотины на общий фильтрационный расход и скорости фильтрации в поперечном сечении. При построении сетки в месте расположения диафрагмы выбирается меньший размер элемента для точного изучения изменения потока при наличии диафрагмы и изменении ее высоты.

Математический анализ

Переменные, участвующие в исследовании, могут быть выражены следующим образом:

$$\Phi(H_1; B; K; q; V; H_d; H_2; X; \rho; g) = 0,$$

где H_1 — нормальный подпорный уровень, м; B — ширина гребня плотины, м; K — коэффициент фильтрации, м/сут; q — суммарный фильтрационный расход на единицу длины плотины, м²/сут; V — скорость воды, проходящей через поперечное сечение плотины, м/с; H_d — высота диафрагмы, м; H_2 — глубина воды нижнего бьефа, м; X — расстояние по горизонтали, измеренное от пересечения гребня с выступом верхового откоса, м; ρ — плотность воды, кг/м³; g — гравитационное ускорение, м/с².

Применяя теорему Бэкингема π и принимая H_1 , ρ и K в качестве повторяющихся переменных, количество переменных, влияющих на проблему n ,

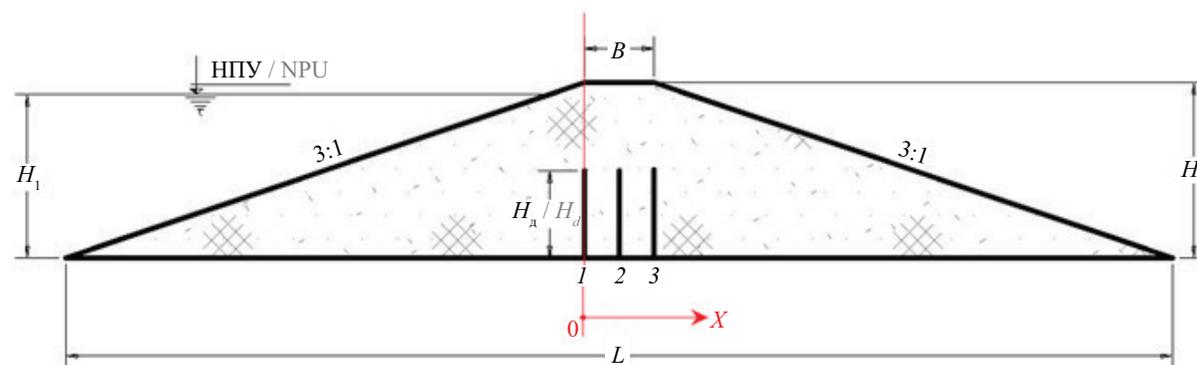


Рис. 1. Поперечное сечение плотины

Fig. 1. Cross section of the dam

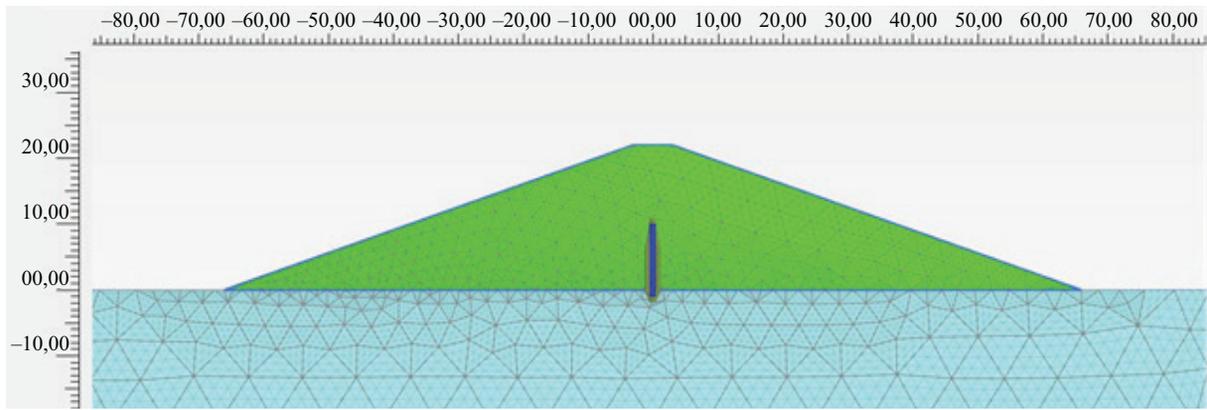


Рис. 2. 2D-сетка и граничные условия

Fig. 2. 2D mesh and boundary conditions

равно 10, а количество задействованных фундаментальных измерений $m = 3$, т.е. длина, масса и время, поэтому количество безразмерных параметров π -термов будет равно 7 и может быть записано так:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= H_d/H_1, \quad \pi_2 = B/H_1, \\ \pi_3 &= q/K \cdot H_1, \quad \pi_4 = V/K, \\ \pi_5 &= g \cdot H_1/K^2, \quad \pi_6 = H_2/H_1, \\ \pi_7 &= X/H_1. \end{aligned}$$

Функциональная связь для π -членов может быть выражена как:

$$\Phi\left(H_d/H_1; B/H_1; q/K \cdot H_1; V/K; g \cdot H_1/K^2; H_2/H_1; X/H_1\right) = 0.$$

Для изучения влияния положения противофильтрационной диафрагмы π_7 делится на π_2 .

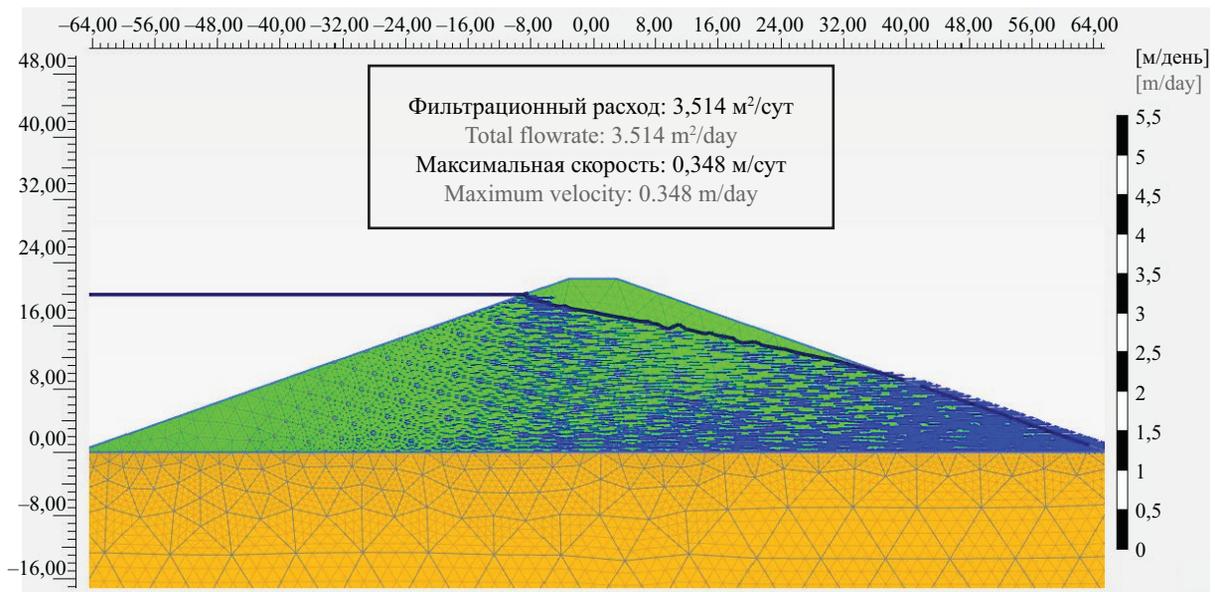
Принимая B, H, g и K за постоянные значения, окончательное функциональное соотношение можно свести к следующему:

$$\Phi\left(H_d/H_1; q/K \cdot H_1; V/K; H_2/H_1; X/B\right) = 0.$$

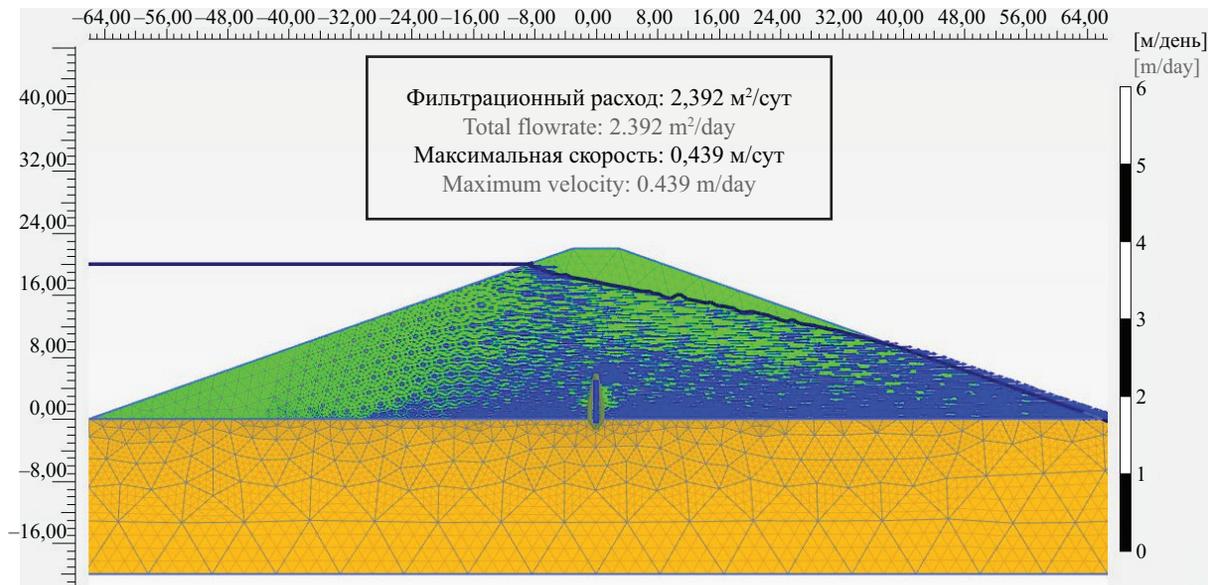
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для каждого значения высоты диаграммы и ее положения в теле плотины получен фильтрационный расход через земляную плотину и отображена скорость по ее поперечному сечению. На рис. 3 представлены векторы потока и скорости в поперечном сечении плотины для различной высоты и расположения диафрагмы (в нижнем бьефе нет воды $H_2 = 0$). Расчеты показали, что максимальная скорость приходится на низовой откос в случае отсутствия диафрагмы, на верхний конец диафрагмы для случаев использования диафрагмы. Это может быть связано с препятствием потоку из-за наличия диафрагмы, которая уменьшает площадь, через которую просачивается вода в месте расположения диафрагмы.

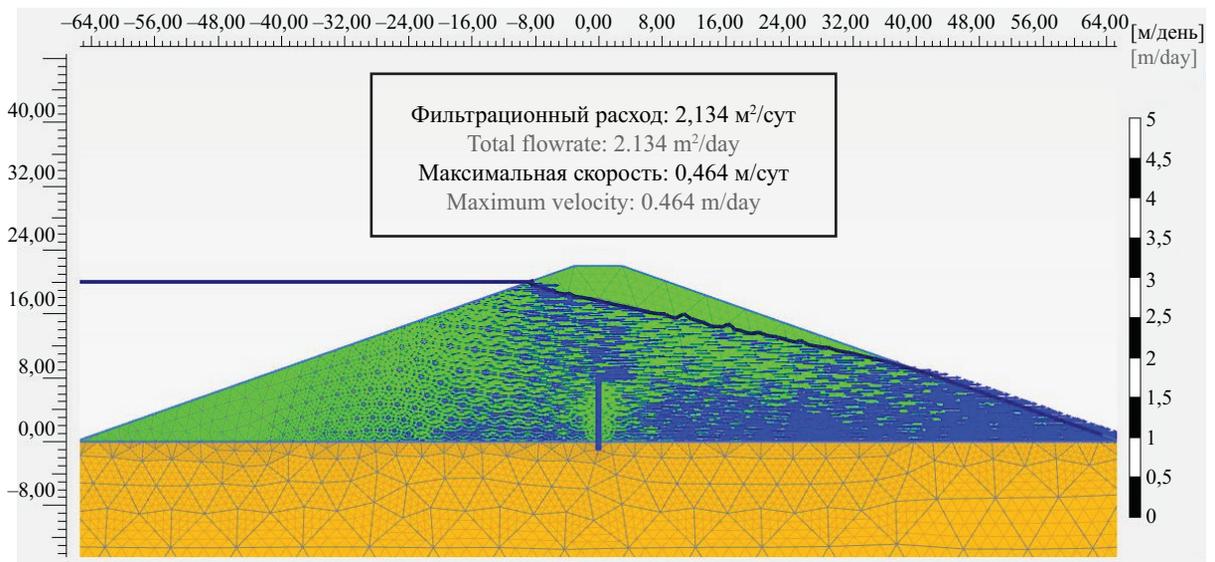
В случае отсутствия диафрагмы и расположения диафрагмы в середине поперечного сечения плотины безразмерный член H_d/H_1 построен против безразмерного члена $(q/K \cdot H_1)$ для изучения влияния высоты диафрагмы на общий фильтрационный расход, как показано на рис. 4.



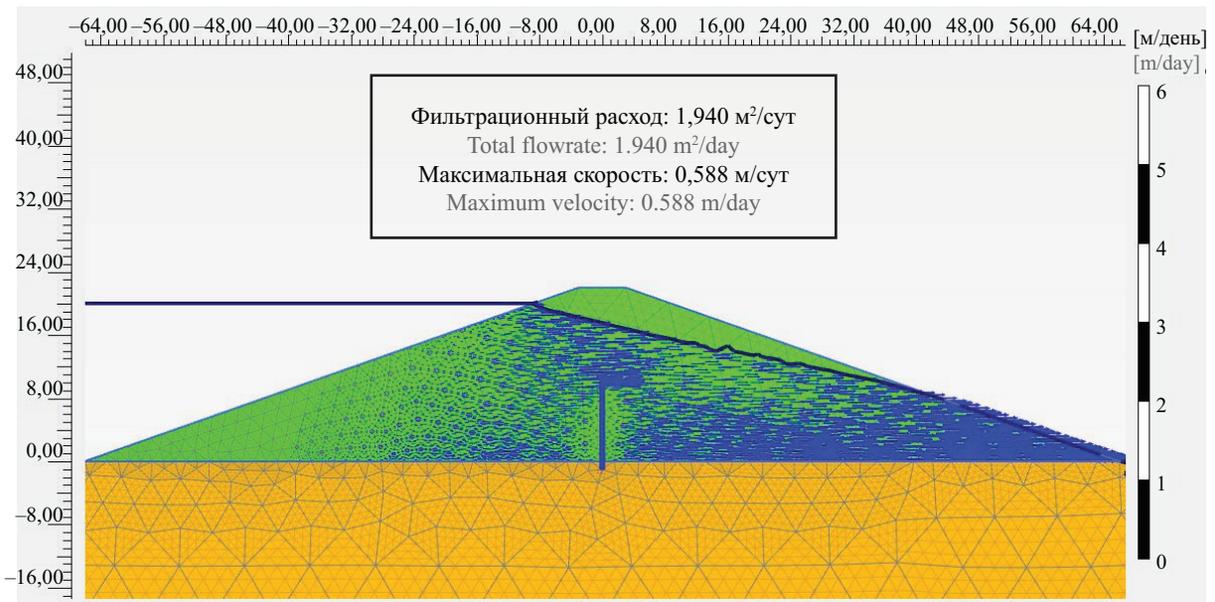
a



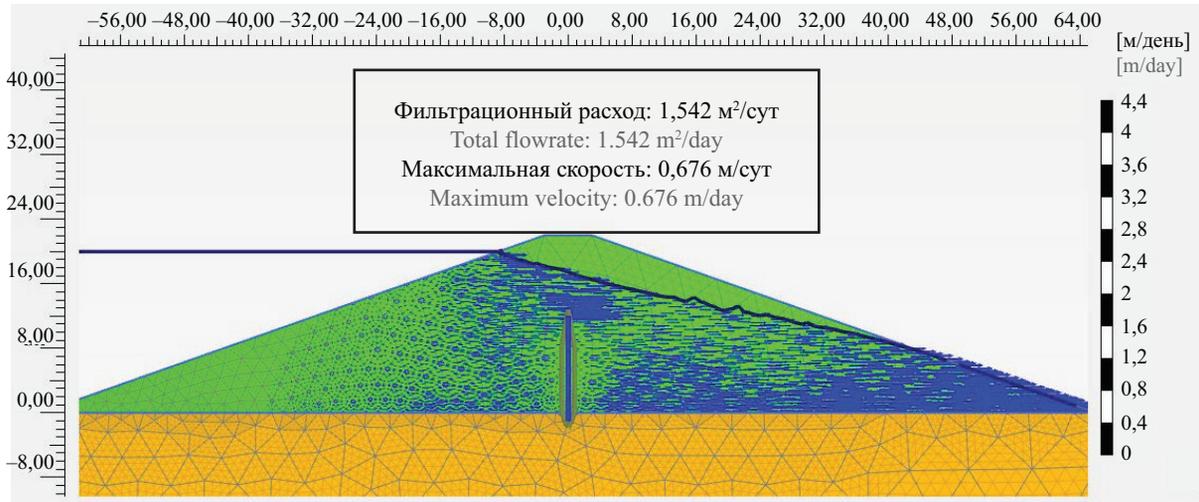
b



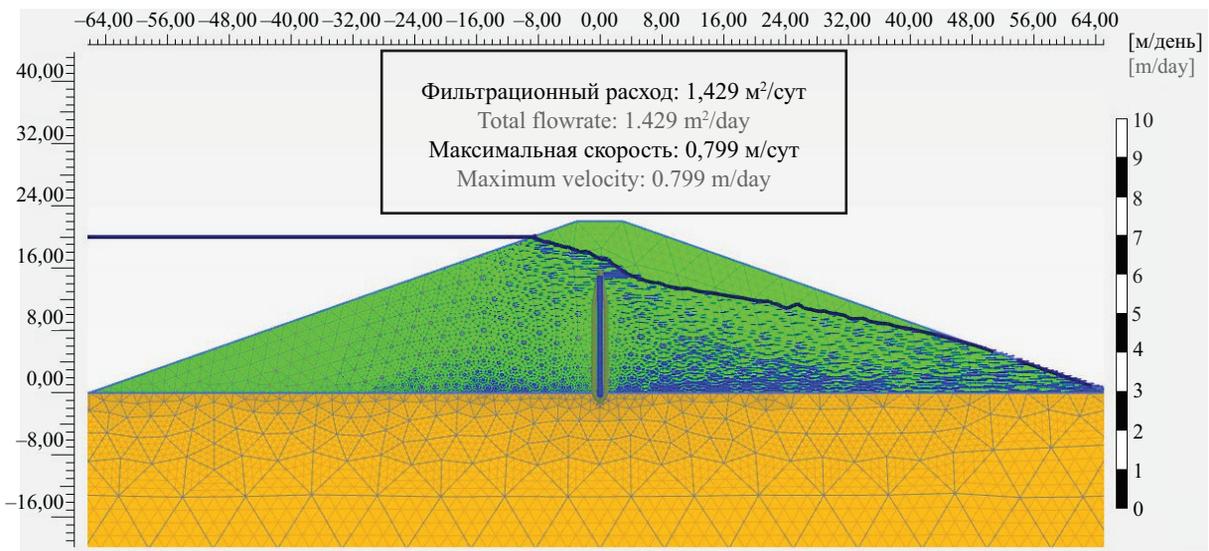
c



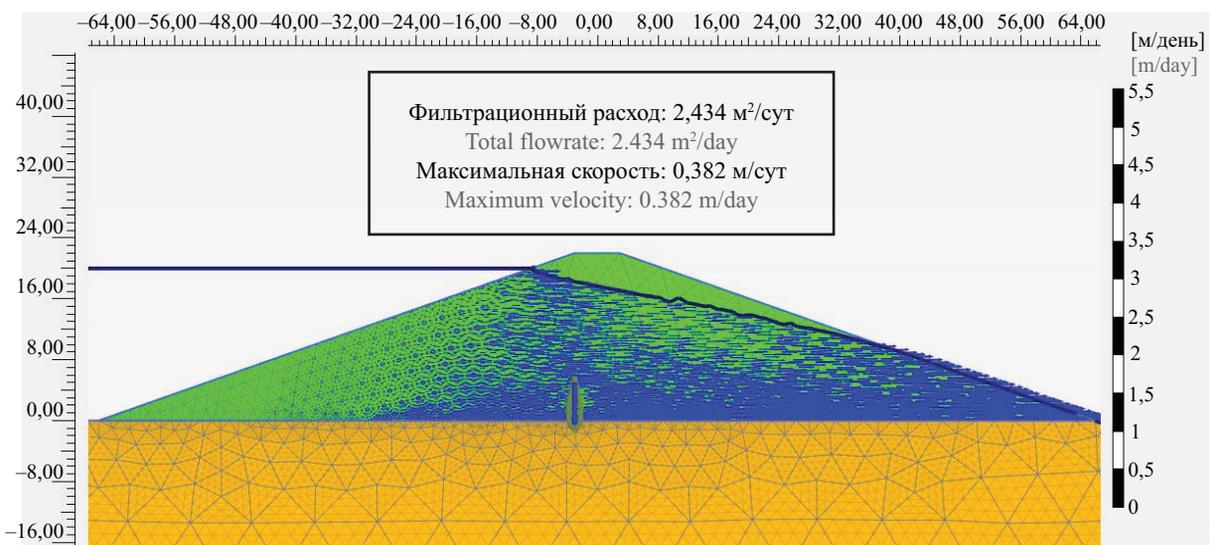
d



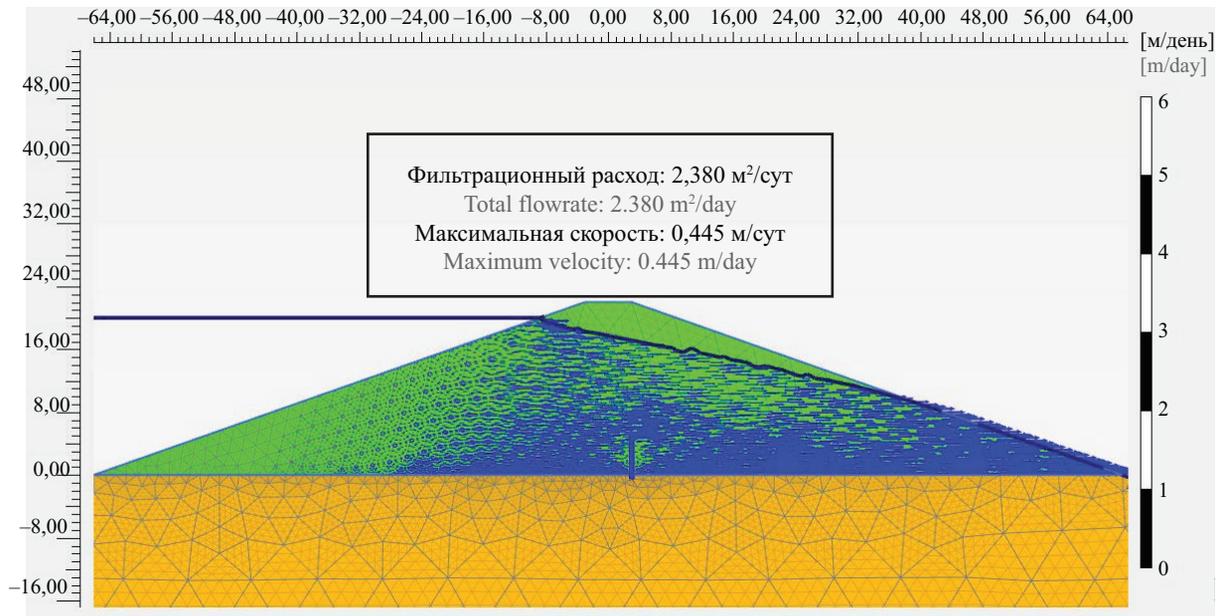
e



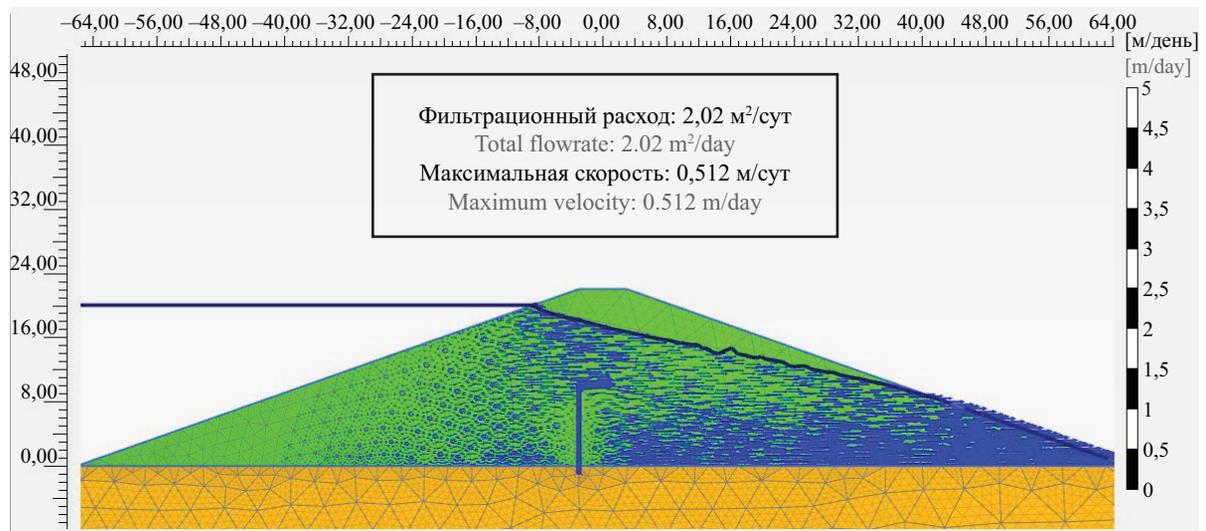
f



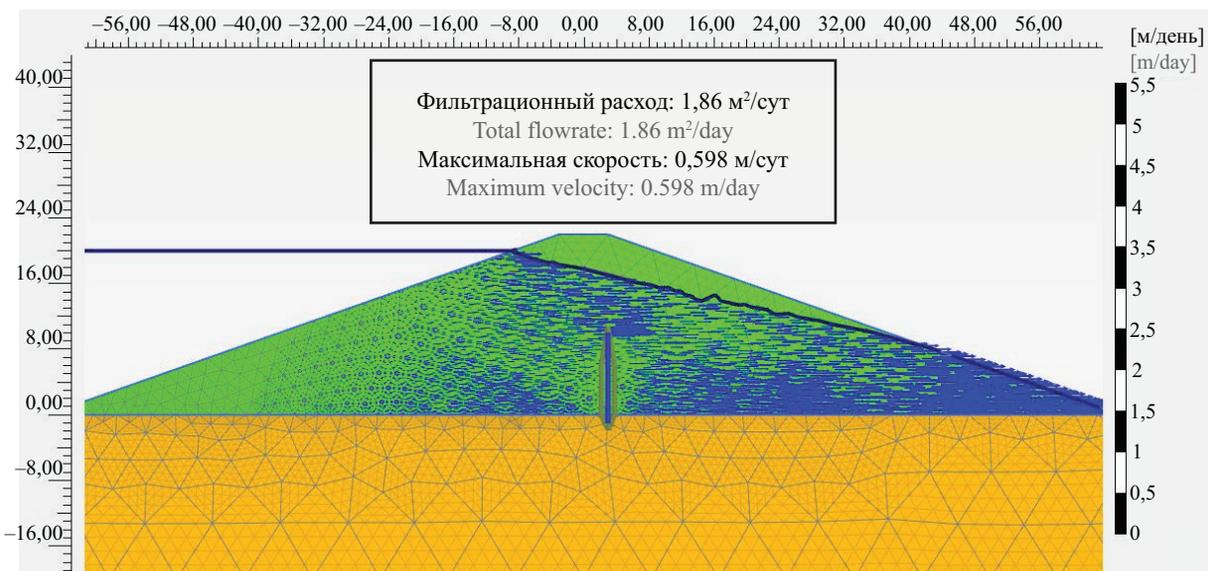
g



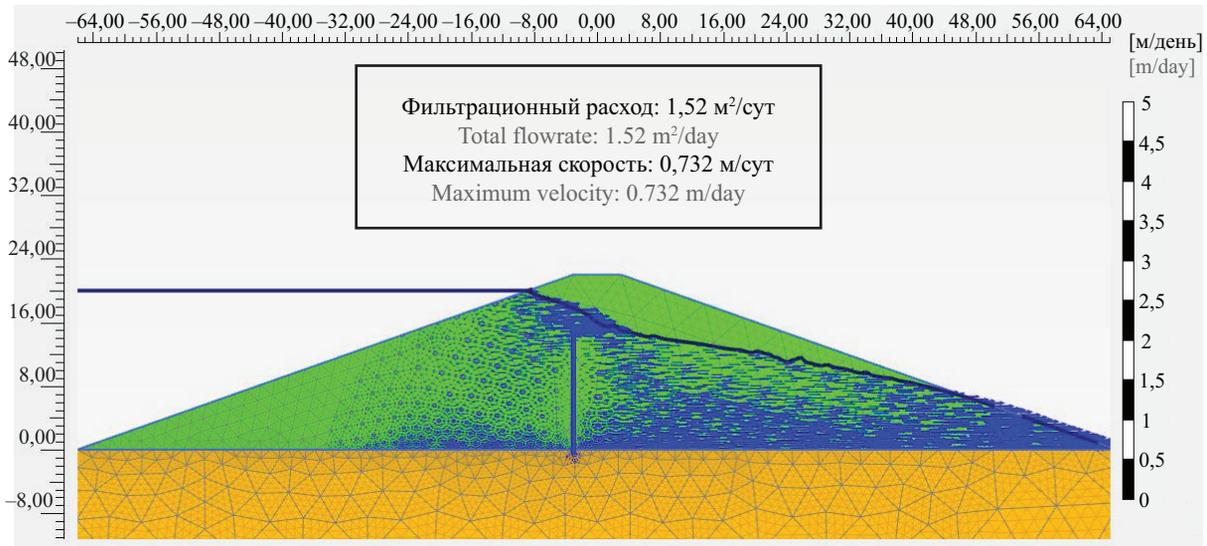
h



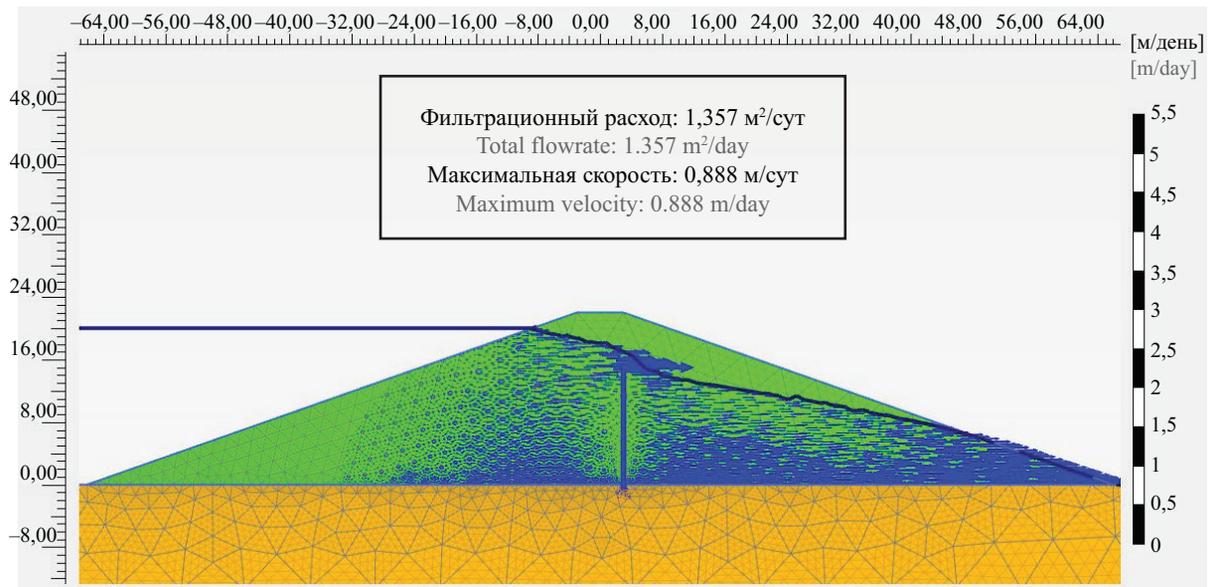
i



j



k



l

Рис. 3. Кривая депрессии и векторы скорости для случая: *a* — без диафрагм; *b* — диафрагм посередине, $H_d/H_1 = 0,25$; *c* — диафрагм посередине, $H_d/H_1 = 0,4$; *d* — диафрагм посередине, $H_d/H_1 = 0,5$; *e* — диафрагм посередине, $H_d/H_1 = 0,6$; *f* — диафрагм посередине, $H_d/H_1 = 0,75$; *g* — диафрагм в верхнем бьефе, $H_d/H_1 = 0,25$; *h* — диафрагм в нижнем бьефе, $H_d/H_1 = 0,25$; *i* — диафрагм в верхнем бьефе, $H_d/H_1 = 0,5$; *j* — диафрагм в нижнем бьефе, $H_d/H_1 = 0,5$; *k* — диафрагм в верхнем бьефе, $H_d/H_1 = 0,75$; *l* — диафрагм в нижнем бьефе, $H_d/H_1 = 0,75$

Fig. 3. Depression curve and velocity vectors for the case: *a* — without diaphragms; *b* — diaphragm in the middle, $H_d/H_1 = 0.25$; *c* — diaphragm in the middle, $H_d/H_1 = 0.4$; *d* — diaphragm in the middle, $H_d/H_1 = 0.5$; *e* — diaphragm in the middle, $H_d/H_1 = 0.6$; *f* — diaphragm in the middle, $H_d/H_1 = 0.75$; *g* — upstream diaphragm, $H_d/H_1 = 0.25$; *h* — downstream diaphragm, $H_d/H_1 = 0.25$; *i* — upstream diaphragm, $H_d/H_1 = 0.5$; *j* — downstream diaphragm, $H_d/H_1 = 0.5$; *k* — upstream diaphragm, $H_d/H_1 = 0.75$; *l* — downstream diaphragm, $H_d/H_1 = 0.75$

Как видно, общий фильтрационный расход через плотину уменьшается по мере увеличения высоты диафрагмы. Это можно объяснить в соответствии с законом Дарси: по мере увеличения высоты диафрагмы длина фильтрационного потока будет увеличиваться, что уменьшит гидравлический градиент, уменьшив фильтрационный поток [18, 19]. Кроме того, когда расстояние между диафрагмой

и кривой депрессии уменьшается, потоки в этой области будут сходиться, что создает большее сопротивление потоку и снижает расход фильтрации [20].

Общий фильтрационный расход через поперечное сечение плотины снижается на 31,93 % по сравнению с плотиной без диафрагмы при $H/H_1 = 0,25$ и до 59,33 % при $H/H_1 = 0,75$ (рис. 5).

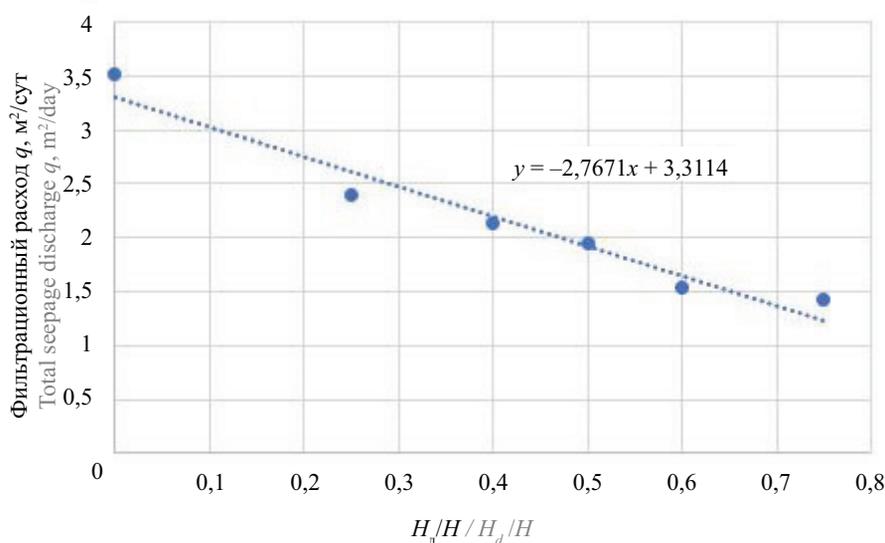


Рис. 4. Влияние изменения высоты диафрагмы на общий фильтрационный расход (расположение диафрагмы — в середине поперечного сечения плотины)

Fig. 4. The effect of changing the height of the diaphragm on the total seepage discharge (diaphragm location — in the middle of the dam cross-section)

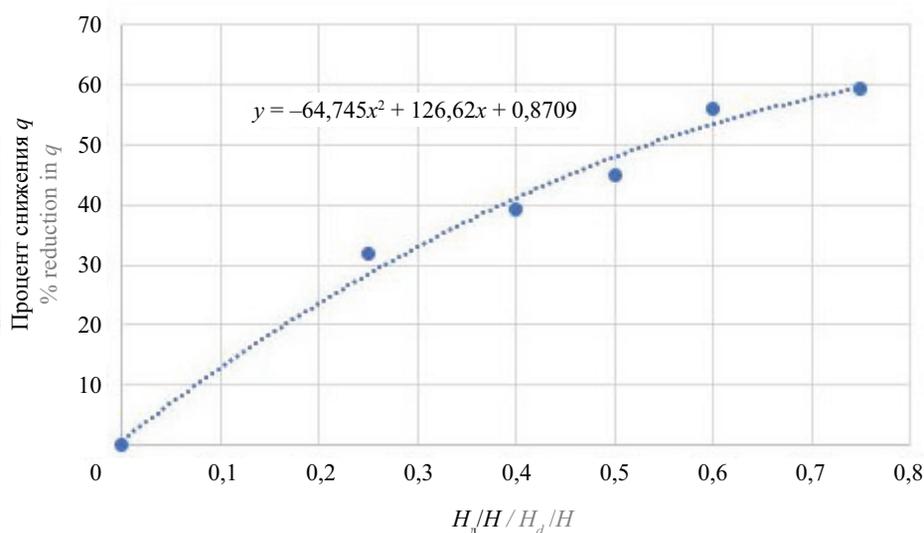


Рис. 5. Процент снижения фильтрационного расхода при различной высоте диафрагмы по отношению к фильтрационному расходу в случае отсутствия диафрагмы

Fig. 5. Percentage of reduction of seepage discharge at different diaphragm heights in relation to the seepage discharge in the absence of the diaphragm

На рис. 6 представлено влияние изменения высоты диафрагмы на величину максимальной скорости в поперечном сечении плотины при расположении диафрагмы в середине поперечного сечения плотины. Для плотин без диафрагмы максимальная скорость возникает на поверхности низового бьефа. Когда присутствует диафрагма, максимальная скорость в поперечном сечении плотины появляется в самой высокой точке диафрагмы и увеличивается по мере увеличения высоты диафрагмы, потому что она действует как препятствие для потока и уменьшает

площадь фильтрации, вызывая увеличение скорости в соответствии с уравнением неразрывности.

На рис. 7 приведено влияние изменения положения диафрагмы на общий фильтрационный расход через земляную плотину. Установлено, что величина общего фильтрационного расхода несколько снижается при смещении шпунта вниз по течению. Это может быть связано с уменьшением расстояния между верхним концом диафрагмы и депрессионной линией по мере того, как диафрагма смещается вниз по течению. Уменьшенное расстояние создает

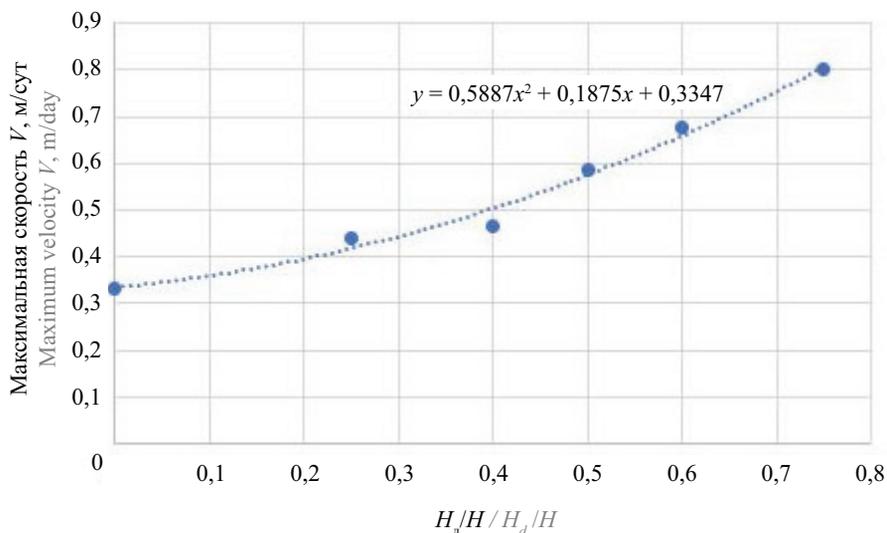


Рис. 6. Влияние изменения высоты диафрагмы на максимальную скорость в поперечном сечении плотины (расположение диафрагмы в середине поперечного сечения плотины)

Fig. 6. Effect of changing the height of the diaphragm on the maximum velocity in the cross section of the dam (location of the diaphragm in the middle of the cross section of the dam)

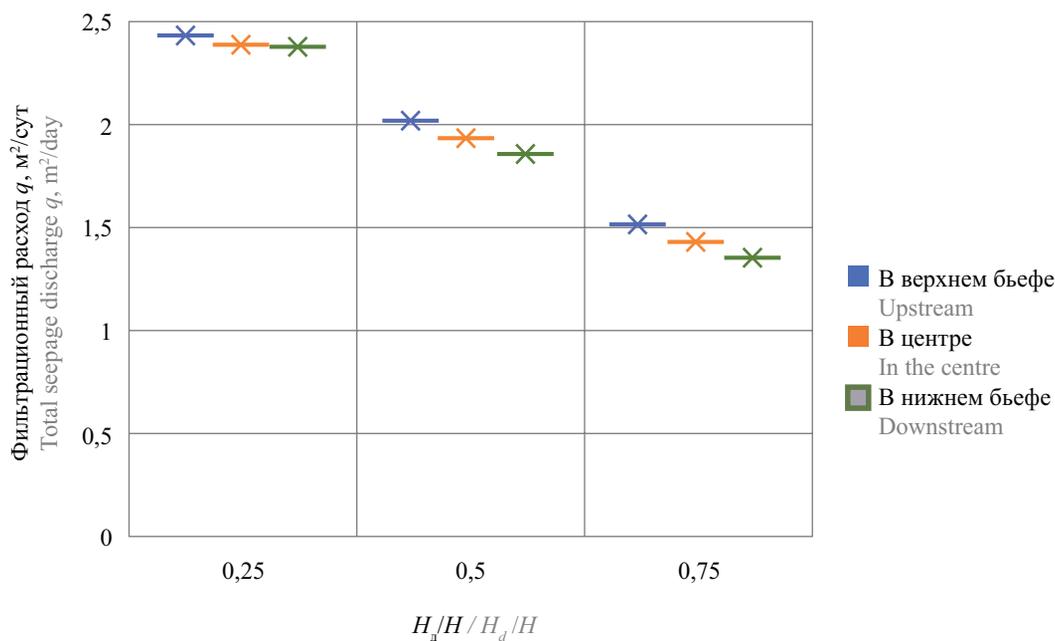


Рис. 7. Влияние изменения расположения диафрагмы от верхнего до нижнего бьефа на общий фильтрационный расход

большее сопротивление потоку и, следовательно, уменьшает общий фильтрационный расход.

Влияние изменения положения диафрагмы на максимальную скорость в поперечном сечении плотины представлено на рис. 8. Значение максимальной скорости несколько увеличивается по мере смещения диафрагмы в низовую сторону. Это можно объяснить уменьшением расстояния между верхним концом диа-

фрагмы и депрессионной линией по мере ее смещения вниз по течению, что приводит к увеличению скорости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение диафрагмы уменьшает общий фильтрационный расход, но увеличивает значение скорости на верхнем конце диафрагмы. При расположении диафрагмы в середине поперечного сече-

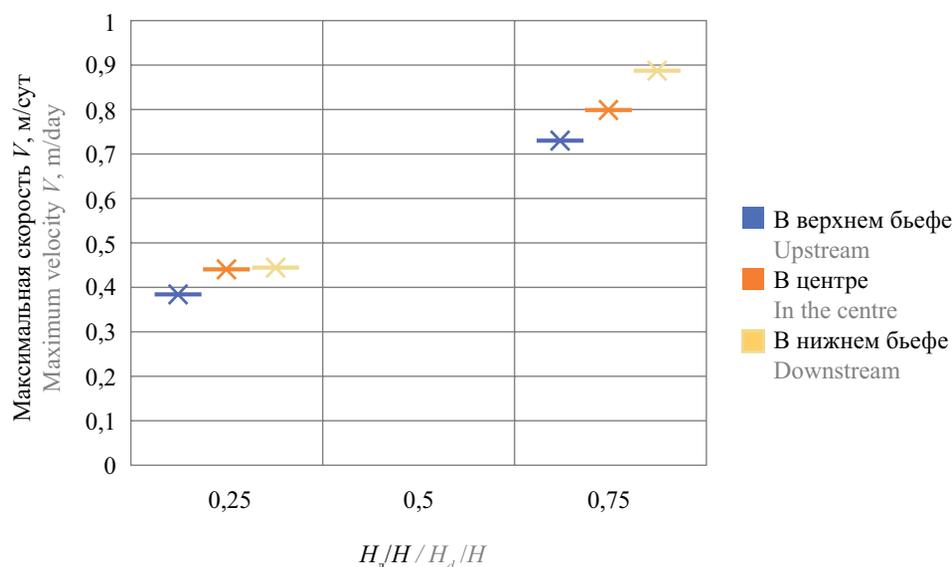


Рис. 8. Влияние изменения расположения диафрагмы от верхнего до нижнего бьефа на максимальную скорость
Fig. 8. The effect of changing the location of the diaphragm from the upstream to the downstream on maximum velocity

ния плотины увеличение высоты диафрагмы снижает общий фильтрационный расход через плотину на 31,93 % от его значения без диафрагмы для $H_d/H = 0,25$ и до 59,33 % от его значения без диафрагмы для $H_d/H = 0,75$. Расчеты показали, что максимальная скорость фильтрационного потока была зафиксирована в верхней части диафрагмы, причем величина максимальной скорости прямо пропорциональна высоте диафрагмы. Поэтому для уменьшения фильтрации рекомендуется увеличить высоту диафрагмы

и проверить, чтобы максимальная скорость не превышала критическую. Превышение критической скорости может привести к повреждению диафрагмы.

Расположение диафрагмы незначительно влияет на величину фильтрационного расхода и максимальной скорости через поперечное сечение плотины. При смещении диафрагмы в сторону нижнего бьефа фильтрация несколько уменьшается. Значение максимальной скорости фильтрационного потока несколько увеличивается при смещении диафрагмы в сторону нижнего бьефа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гарелина С.А., Давлатишоев С.К., Латышевко К.П., Обиджони Ш.К., Курбанов Н.Б. Повышение безопасности гидротехнических сооружений. Часть 2. На примере водохранилища Нурекской ГЭС на реке Вахш. Химки : АГЗ МЧС России, 2021. 192 с.
2. Hogeboom R.J., Knook L., Hoekstra A.Y. The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation // *Advances in Water Resources*. 2018. Vol. 113. Pp. 285–294. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.01.028
3. Ахметов Е.М., Асемов К.М., Жуматаева М.О. Исследование аварий на гидротехнических сооружениях и методы контроля их безопасности // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. № 4. С. 70–83. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2595. EDN ZOWQSP.
4. Zhang W., Shen Z., Ren J., Bian J., Xu L., Chen G. Multifield coupling numerical simulation of the seepage and stability of embankment dams on deep overburden layers // *Arabian Journal for Science and*

- Engineering. 2022. Vol. 47. Issue 6. Pp. 7293–7308. DOI: 10.1007/s13369-021-06112-6
5. Sjødahl P., Dahlin T., Johansson S. Using the resistivity method for leakage detection in a blind test at the Røssvatn embankment dam test facility in Norway // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2010. Vol. 69. Issue 4. Pp. 643–658. DOI: 10.1007/s10064-010-0314-y
6. Liu Z.H., Shen Z.Z., Qing W.W., Xiong S.F., Gan L. Anti-seepage evaluation of reinforcement effect for Fengchan earth dam // *Key Engineering Materials*. 2017. Vol. 753. Pp. 290–294. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.753.290
7. Wang F., Tulamaiti Y., Fang H., Yu X., Zhou C. Seismic response characteristics of polymer anti-seepage wall in earth dam based on earthquake wave motion input method // *Structures*. 2023. Vol. 47. Pp. 358–373. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.11.060
8. Li J., Zhang J., Wang Y., Wang B. Seismic Response of Earth Dam with Innovative Polymer Anti-seepage Wall // *International Journal of Geomechanics*.

2020. Vol. 20. Issue 7. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001664

9. Саинов М.П., Кудрявцев Г.М. Расчетное исследование фильтрационной прочности скального основания плотины Кандаджи // Вестник МГСУ. 2011. № 5. С. 24–29. EDN OWEBLR.

10. Fell R., Wan C.F., Cuganiewicz J., Foster M. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2003. Vol. 129. Issue 4. Pp. 307–314. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:4(307)

11. Смуров А.В., Балакин А.П. Современные технологии обеспечения безопасности гидротехнических сооружений // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2019. № 1 (10). С. 390–392. EDN BBNRVU.

12. Vincent K.K., Muthama M.N., Muoki S.N. Darcy's law equation with application to underground seepage in earth dams in calculation of the amount of seepage // American Journal of Applied Mathematics and Statistics. 2014. Vol. 2. Issue 3. Pp. 143–149. DOI: 10.12691/ajams-2-3-8

13. Sazzad M.M., Roy M., Rahman M.S. Comparison between numerical and analytical solution of seepage flow through earth dam // 2nd International Conference on Advances in Civil Engineering. 2014.

14. Abdelgawad H.A.A., Shamaa M. Seepage through earth dams with horizontal filters and found-

ed on impervious foundation (numerical analysis with boundary element method). 2004.

15. Irzooki R.H. Computation of Seepage through Homogenous Earth Dams with Horizontal Toe Drain // Engineering and Technology Journal. 2016. Vol. 34. Issue 3. Pp. 430–440. DOI: 10.30684/etj.34.3a.1

16. Abhilasha M., Balan T.G.A. Numerical analysis of seepage in Embankment dams // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). 2014. Vol. 4. Pp. 13–23.

17. Al-Janabi A.M.S., Ghazali A.H., Ghazaw Y.M., Afan H.A., Al-Ansari N., Yaseen Z.M. Experimental and numerical analysis for earth-fill dam seepage // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 6. P. 2490. DOI: 10.3390/su12062490

18. Arshad I., Babar M.M. Comparison of SEEP/W simulations with field observations for seepage analysis through an earthen dam (Case study: Hub Dam — Pakistan) // International Journal of Research. 2014. Vol. 1. Issue 7.

19. Shayan H.K., Tokaldany E.A. Effects of blanket, drains, and cut-off wall on reducing uplift pressure, seepage, and exit gradient under hydraulic structure // International Journal of Civil Engineering. 2015. Vol. 13. Issue 4. Pp. 486–500. DOI: 10.22068/IJCE.13.4.486

20. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А., Малаханов В.В., Бестужева А.С., Саинов М.П. и др. Гидротехнические сооружения. Часть 1 : учебник. М., 2008. 576 с.

Поступила в редакцию 25 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 2 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Генрих Васильевич Орехов** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-6900-2704; OrehovGVgsu.ru;

Чан Мань Кыонг — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; cuonghtcs@gmail.com.

Вклад авторов:

Орехов Г.В. — идея статьи, научное руководство, формулирование концепции исследования.

Чан Мань Кыонг — анализ источников и литературы, построение экспериментальной модели, анализ полученных результатов, формулирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Garelina S.A., Davlatshoev S.K., Latyshenko K.P., Obidzhoni Sh.K., Kurbonov N.B. *Improving the safety of hydraulic structures. Part 2. Using the example of the Nurek hydroelectric power station reservoir on the Vakhsh River*. Khimki, AGZ EMERCOM of Russia, 2021; 192. (rus.).

2. Hogeboom R.J., Knook L., Hoekstra A.Y. The blue water footprint of the world's artificial reser-

voirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. *Advances in Water Resources*. 2018; 113:285-294. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.01.028

3. Akhmetov Ye.M., Assemov K.M., Zhumataeva M.O. Research of accidents of hydraulic structures and safety control methods. *Bulletin of the Tomsk*

Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*. 2020; 331(4):70-83. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2595. EDN ZOWQSP. (rus.).

4. Zhang W., Shen Z., Ren J., Bian J., Xu L., Chen G. Multifield Coupling Numerical Simulation of the Seepage and Stability of Embankment Dams on Deep Overburden Layers. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022; 47(6):7293-7308. DOI: 10.1007/s13369-021-06112-6

5. Sjødahl P., Dahlin T., Johansson S. Using the resistivity method for leakage detection in a blind test at the Røssvatn embankment dam test facility in Norway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2010; 69(4):643-658. DOI: 10.1007/s10064-010-0314-y

6. Liu Z.H., Shen Z.Z., Qing W.W., Xiong S.F., Gan L. Anti-seepage evaluation of reinforcement effect for Fengchan earth dam. *Key Engineering Materials*. 2017; 753:290-294. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.753.290

7. Wang F., Tulamaiti Y., Fang H., Yu X., Zhou C. Seismic response characteristics of polymer anti-seepage wall in earth dam based on earthquake wave motion input method. *Structures*. 2023; 47:358-373. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.11.060

8. Li J., Zhang J., Wang Y., Wang B. Seismic response of earth dam with innovative polymer antiseepage wall. *International Journal of Geomechanics*. 2020; 20(7). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001664

9. Sainov M.P., Kudryavtsev G.M. Estimated research of filtering strength bedrock of the dam Kandadji. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 5:24-29. EDN OWEBLR. (rus.).

10. Fell R., Wan C.F., Cyganiewicz J., Foster M. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2003; 129(4):307-314. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:4(307)

11. Smurov V., Balakin A.P. Modern technologies to ensure the safety of hydraulic structures. *Mod-*

ern Technologies for Civil Defense and Emergency Response. 2019; 1(10):390-392. EDN BBNRVU. (rus.).

12. Vincent K.K., Muthama M.N., Muoki S.N. Darcy's Law Equation with Application to Underground Seepage in Earth Dams in Calculation of the Amount of Seepage. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*. 2014; 2(3):143-149. DOI: 10.12691/ajams-2-3-8

13. Sazzad M.M., Roy M., Rahman M.S. Comparison between numerical and analytical solution of seepage flow through earth dam. *2nd International Conference on Advances in Civil Engineering*. 2014.

14. Abdelgawad H.A.A., Shamaa M. *Seepage through earth dams with horizontal filters and founded on impervious foundation (numerical analysis with boundary element method)*. 2004.

15. Irzooki R.H. Computation of seepage through homogenous earth dams with horizontal toe drain. *Engineering and Technology Journal*. 2016; 34(3):430-440. DOI: 10.30684/etj.34.3a.1

16. Abhilasha M., Balan T.G.A. Numerical analysis of seepage in Embankment dams. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2014; 4:13-23.

17. Al-Janabi A.M. S., Ghazali A.H., Ghazaw Y.M., Afan H.A., Al-Ansari N., Yaseen Z.M. Experimental and numerical analysis for earth-fill dam seepage. *Sustainability*. 2020; 12(6):2490. DOI: 10.3390/su12062490

18. Arshad I., Babar M.M. Comparison of SEEP/W Simulations with field observations for seepage analysis through an earthen dam (Case Study: Hub Dam — Pakistan). *International Journal of Research*. 2014; 1(7).

19. Shayan H.K., Tokaldany E.A. Effects of blanket, drains, and cut-off wall on reducing uplift pressure, seepage, and exit gradient under hydraulic structure. *International Journal of Civil Engineering*. 2015; 13(4):486-500. DOI: 10.22068/IJCE.13.4.486

20. Rasskazov L.N., Orekhov V.G., Aniskin N.A., Malakhanov V.V., Bestuzheva A.S., Sainov M.P. et al. *Hydraulic structures. Part 1 : textbook*. Moscow, 2008; 576. (rus.).

Received October 25, 2023.

Adopted in revised form on November 11, 2023.

Approved for publication on December 2, 2023.

B I O N O T E S: **Genrikh V. Orekhov** — Doctor of Technical Science, Associate Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6900-2704; OrekhovGV@mgsu.ru;

Tran Manh Cuong — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; cuonghtcs@gmail.com.

Contribution of the authors:

Genrikh V. Orekhov — the idea of the article, scientific guidance, formulation of the research concept.

Tran Manh Cuong — analysis of sources and literature, construction of an experimental model, analysis of the results obtained, formulation of conclusions on the article.

The authors declare no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.294-306

Реинжиниринг организационной структуры и бизнес-процессов инвестиционно-строительной деятельности. Их место в общей системе корпоративного регулирования

Сергей Борисович Сборщиков¹, Наталья Валериевна Лазарева²

¹ АО «НИЦ «Строительство»; г. Москва, Россия

² АО «ЮгИнвестПроект»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Формирование результативной организационной структуры управления строительным производством на корпоративном уровне предполагает адаптацию к новым условиям. В этом процессе наблюдается проблема разрыва (разграничения) плана и действия, что требует корректирующих воздействий, в том числе в отношении организационной структуры и процессов управления (бизнес-процессов) инвестиционно-строительной деятельности (ИСД). Рассматриваются реинжиниринг бизнес-процессов и реинжиниринг организационной структуры. Между указанными видами качественных организационных трансформаций имеется определенная зависимость, которая обусловлена в первую очередь скоротечностью современного жизненного цикла инженерных решений. Цель исследования — научное обоснование совершенствования системы корпоративного регулирования за счет реинжиниринга организационной структуры и бизнес-процессов ИСД. Задачи — установление закономерности разрыва (разграничения) плана и действия в системе корпоративного управления, идентификация зависимости бизнес-процессов и организационной структуры ИСД в контексте реинжиниринга бизнес-процессов и организационной структуры в строительстве. Объектом исследования выбрана система корпоративного регулирования ИСД, предметом — организационная структура и бизнес-процессы в строительстве.

Материалы и методы. Теоретическая основа исследования — системный подход, логистика регулирующих воздействий, структурно-функциональный анализ, методы инвестиционного проектирования, стратегического, оперативного управления. Информационной базой исследования стал проведенный авторами ранее научный поиск, который нашел отражение в опубликованных статьях по данной тематике. Дополнительными источниками послужили научные труды отечественных и зарубежных ученых, а также практические материалы.

Результаты. Показано решение проблемы разрыва (разграничения) в ИСД, что позволило предложить схему регулирования строительной компании, установить зависимости бизнес-процессов и организационной структуры ИСД, а также установить зависимости реинжиниринга бизнес-процессов и реинжиниринга организационной структуры в строительстве.

Выводы. Разрыв (разграничение) между планом и действием строительной организации обусловлен флуктуациями во внешней среде. Основным инструментом эффективной адаптации к внешним колебаниям и корпоративного регулирования — качественное преобразование бизнес-процессов и организационной структуры, т.е. их реинжиниринг.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: реинжиниринг, реинжиниринг бизнес-процессов, реинжиниринг организационной структуры, строительные организации, строительная отрасль, организационная структура, инвестиционно-строительная деятельность, бизнес-процессы, система корпоративного регулирования, проблема разрыва, логистика регулирующих воздействий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Реинжиниринг организационной структуры и бизнес-процессов инвестиционно-строительной деятельности. Их место в общей системе корпоративного регулирования // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 294–306. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.294-306

Автор, ответственный за переписку: Наталья Валериевна Лазарева, tous2004@mail.ru.

Reengineering of the organizational structure and business processes of investment and construction activities. Their place in the general system of corporate regulation

Sergey B. Sborshikov¹, Natalia V. Lazareva²

¹ JSC “SIC “Construction”; Moscow, Russian Federation

² Yuginvestproekt JSC; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The formation of an effective organizational structure of construction production management at the corporate level implies adaptation to new conditions. However, in this process, there is a problem of a gap (differentiation) of the plan and action, which requires corrective actions, including with regard to the organizational structure and management processes (business processes) of investment and construction activities. In the future, such impacts will determine the nature of reengineering activities in this area. Business process reengineering and organizational structure reengineering are considered. There is a certain dependence between these types of qualitative organizational transformations, which is primarily due to the transience of the modern life cycle of engineering solutions. Thus, it is possible to identify the purpose of the research — it is a scientific justification for the improvement of the corporate regulation system through reengineering of the organizational structure and business processes of investment and construction activities. On this basis, it is possible to formulate the objectives of the research: to establish the regularity of the gap (differentiation) of the plan and action in the system of corporate governance, to identify the dependence of business processes and organizational structure of investment and construction activities in the context of reengineering of business processes and organizational structure in construction. The object of the research is the system of corporate regulation of investment and construction activities, and the subject is the organizational structure and business processes in construction. From the point of view of practical value, these types of reengineering allow an economic entity to improve the quality and efficiency of construction products by focusing production activities on the consumer and a process approach in management. On this basis it will help to gain competitive advantages, among other things through the wider use of technical means, employees meeting higher requirements of scientific and technical progress and capable of solving complex problems of investment and construction activities, arising at the present stage, in the shortest possible time.

Materials and methods. The theoretical basis of the research was a system approach, logistics of regulatory impacts, structural and functional analysis, methods of investment design, strategic and operational management. The information base of the research was the scientific search carried out by the authors earlier, which was reflected in published papers on this subject. Additional sources were scientific works of domestic and foreign scientists, as well as practical materials.

Results. The solution of the gap (differentiation) problem in investment and construction activities is shown, which made it possible to propose a scheme of regulation of a construction company, to establish dependencies of business processes and organizational structure of investment and construction activities, as well as dependencies of business process reengineering and organizational structure reengineering in construction.

Conclusions. The gap (differentiation) between the plan and the action of a construction organization is caused by fluctuations in the external environment. The main tool for effective adaptation to external fluctuations and corporate regulation is a qualitative transformation of business processes and organizational structure, i.e. their reengineering.

KEYWORDS: reengineering, business process reengineering, organizational structure reengineering, construction organizations, construction industry, organizational structure, investment and construction activities, business processes, corporate regulation system, gap problem, logistics of regulatory impacts

FOR CITATION: Sborshikov S.B., Lazareva N.V. Reengineering of the organizational structure and business processes of investment and construction activities. Their place in the general system of corporate regulation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):294-306. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.294-306 (rus.).

Corresponding author: Natalia V. Lazareva, tous2004@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Любая деятельность преследует определенную заранее цель, которая обуславливает необходимость решения некоторого набора задач и, как следствие, выполнения соответствующей ему совокупности мероприятий и работ. В свою очередь мероприятия, работы характеризуются продолжительностью, затратами ресурсов (материальными, техническими, трудовыми) и пребывают между собой в организационной и технологической взаимосвязях, которые находят свое отражение в планах хозяйствующего субъекта и его подразделений (бизнес-планах, производственных и т.д.). Соответственно подразделения хозяйствующего субъекта описываются организационным составом и структурой, т.е. между собой соединены связями (вертикальными, горизонтальными, функциональными, подчиненности). Однако функционирование организации из-за флуктуаций внешней и внутренней среды испытывает как ограничения, так и возможности, непосредственно влияющие на достижение поставленной цели. Приведенные выше обстоятельства в полной мере свойственны и инвестиционно-строительной деятельности (ИСД).

Формирование результативной организационной структуры управления строительным производством на корпоративном уровне предполагает адаптацию к новым условиям. Генезисом этого процесса является необходимость преодоления проблемы разрыва (разграничения) плана и действия, что требует корректирующих воздействий, в том числе в отношении организационной структуры и процессов управления (бизнес-процессов) ИСД. Трансформации управленческих процессов и организационной структуры строительной организации в современной теории и практике регулирования производственных систем носят название реинжиниринга.

Качественное преобразование (трансформации) бизнес-процессов и организационной структуры обусловлено достаточно большим спектром факторов, в основе которых лежат смена технологического уклада, научно-технический прогресс, конвергенция. Применительно к организации систем управления в настоящее время наибольшее влияние на указанные преобразования оказывает активная цифровая трансформация национальной экономики и ее составляющей ИСД.

В этой связи в качестве научной гипотезы принимается предположение, что реинжиниринг процессов управления и организационной структуры поможет хозяйствующему субъекту приобрести конкурентные преимущества, используя прогрессивные схемы внешнего и внутреннего взаимодействия, более широкое применение технических средств, а также формирование кадрового состава работников, отвечающего более высоким требованиям научно-технического прогресса и способного решать сложные задачи ИСД в кратчайшие сроки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование предполагало последовательную реализацию следующих процедур научного поиска в выбранном направлении: установление содержания проблемы разрыва (разграничения) между планом ИСД и действием по его осуществлению, формирование возможной схемы корпоративного оперативного управления в подобных условиях, определение зависимости преобразования бизнес-процессов и организационной структуры строительной организации, которые можно рассматривать как их реинжиниринг.

Указанные процедуры предполагают использование системного подхода к рассмотрению инвестиционно-строительной сферы как антропотехнической системы, структурно-функционального анализа для идентификации состава и структуры системы управления на корпоративном уровне, методологии логистики регулирующих воздействий, а также методов инвестиционного проектирования, стратегического, оперативного управления для определения характера взаимодействий между элементами инвестиционно-строительной сферы [1–3].

В конечном итоге указанная выше последовательность решения задач исследования и совокупность использованных для этого подходов и методов позволили установить закономерности между реинжинирингом бизнес-процессов и реинжинирингом организационной структуры в строительстве.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как было установлено [1–6], необходимость иерархического построения систем управления объективна. Однако строительная компания обрывает ряд социально-экономических систем, в которых она существует, таким образом, заканчивается и любая иерархия управления, когда достигает уровня, который рассматривается как «конечная инстанция». В строительной фирме таким уровнем является стратегическое руководство (например, совет директоров), которое обслуживается собственной системой, а также подчиненными системами: оперативное управление, строительное производство, обеспечительные и вспомогательные процессы и т.д.

Для эффективного функционирования системы «стратегическое руководство» необходимы данные об окружающей хозяйствующий субъект среде, которые должны учитываться при рассмотрении будущего строительной компании и могут повлиять на формирование новых направлений в ее политике. Цель заключается в том, чтобы спрогнозировать наиболее вероятные тенденции и тем самым сузить границы риска [1, 2].

Здесь следует отметить, что основополагающий момент в рассматриваемых процедурах — установление возможных сценариев (траекторий) развития хозяйствующего субъекта, которые могут отражать для него оптимистическое или пессимистическое видение прогнозируемых флуктуаций внешней среды. С другой стороны, организация характеризуется определенными результатами своей деятельности. Интерполяция подобной ретроспективы будет показывать внутренний потенциал компании. Для описания сценариев развития и учета в них потенциальных возможностей хозяйствующий субъект составляет планы, которые должны быть взаимосвязаны, т.е. образовывать систему. Помимо прочего организация имеет определенный состав подразделений, соединенных между собой связями (сопряжения, подчинения), т.е. образуют структуру.

Формирование результативной организационной структуры управления строительным производством, состоящей из некоторого набора уровней, предполагает наличие двух необходимых условий:

- 1) целеполагание на всех уровнях иерархии при соблюдении единства стратегических и оперативных планов;
- 2) широкое использование компьютеров, средств телекоммуникации для повышения качества, скорости выработки и прохождения управленческих воздействий, а также обратной связи, как отклика на их результативность [7–9].

Выполнение указанных условий способствует организации строительной компании как управляющего устройства, так как она должна адаптироваться к новым условиям и на этой основе изменять первоначально разработанные планы. В подобной постановке необходимо определить типологию регулирующих воздействий, при помощи которых хозяйствующий субъект, как орган управления, влияет на ИСД:

- задающие воздействия, устанавливающие стратегическую линию в развитии хозяйствующего субъекта;
- возмущающие воздействия — это сбои, рассогласования в системе управления, характеризующиеся случайными и незапланированными мероприятиями, которые направлены на их компенсацию, демпфирование;
- управляющие воздействия, которые реализуются в рамках оперативного контроля;

- корректирующие воздействия, обусловленные изменениями и уточнениями принятого сценария развития событий.

Как было анонсировано в начале, в процессе регулирования ИСД следует четко определить разграничение между планом и действием (рис. 1). Любой план развития хозяйствующего субъекта или его отдельной сферы деятельности формулируется и разрабатывается в настоящем, но имеет отношение к будущему периоду, поэтому, как может показаться целесообразным, он должен постоянно изменяться с учетом новой информации. Однако подобное решение задачи адаптации плана к условиям функционирования хозяйствующего субъекта невозможно, поскольку план всегда будет опаздывать в своем построении относительно текущего момента и описывать уже устаревшие условия реализации. Выходом из подобной ситуации могут служить трансформации организационной структуры и процессов управления из учета целеполагания хозяйствующего субъекта и соответствия решаемым задачам.

Следуя логике рассуждений и рассматривая строительную организацию как управляющее устройство, можно уверенно утверждать, что тем самым у руководства появляется возможность создать структуру, которая выполнит функции такого устройства, в том числе за счет реализации процедур:

- измерения фактических параметров;
- сравнения фактических параметров с заданными;
- непрерывной передачи через цепь обратной связи корректирующего воздействия, которая делает возможным приспособление к изменившимся условиям внешней среды [1, 2].

Результат трансформации организационной структуры для достижения поставленных целей

приведет хозяйствующий субъект к исчезновению проблемы разграничения плана и оперативной деятельности в системе корпоративного регулирования. Но при этом требуется принимать во внимание три аспекта:

- 1) любой план не может достигнуть стопроцентной реализации цели;
- 2) не существует действия, которое бы абсолютно совпадало с планом;
- 3) между настоящим и будущим моментами существует гомеостазис, т.е. такое состояние антропотехнической системы, которое предполагает наличие регулирующего воздействия для ее функционального равновесия и поступательного устойчивого развития.

Учитывая контекст изложения результатов исследования, можно дать следующие определения вышеуказанным терминам в проекции на ИСД.

Функциональное равновесие следует рассматривать применительно как к строительной организации, так и к ИСД в целом. В первом случае функциональное равновесие можно определить как соответствие способов реализации производственных, вспомогательных и обеспечительных процессов, их объема, а также распределения между исполнителями корпоративной программы ИСД портфеля инвестиционных проектов. Во втором случае функциональное равновесие — это некий баланс между запросами потребителей строительной продукции и ее количественными и качественными характеристиками. В обоих случаях функциональное равновесие имеет динамичный характер, который требует наличия определенного инструментария его поддержания. Данное положение делает функциональное равновесие одним из основных элементов устойчивого развития, которое можно



Рис. 1. Схема решения проблемы разрыва (разграничения) в инвестиционно-строительной деятельности

Fig. 1. The scheme of solving the problem of the gap (differentiation) in investment and construction activities

рассматривать как внешне и внутренне сбалансированный выпуск строительной продукции, обеспечивающий наиболее полное удовлетворение запросов потребителей при максимальном сохранении ресурсов для будущих поколений.

Рассматривая проекцию приведенных выше категорий на корпоративный уровень ИСД, можно утверждать, что в аппарате управления хозяйствующего субъекта представляется целесообразным формирование такого организационно-экономического механизма, который может осуществлять управление гомеостазисом совокупности строительных объектов как единого целого. Если управление каждым строительным объектом будет осуществляться отдельно и его цель — достижение частичных оптимумов, результаты такой управленческой деятельности нанесут ущерб строительной компании [1, 2, 10–14].

Исходя из обеспечения функциональной устойчивости, деление организации на подразделения и ИСД на объекты является необходимым условием для ее существования, но не является преимуществом. Цель совместной деятельности подразделений, которую отображает план, — получение прибыли от строительства объектов (рис. 2).

В соответствии с канонами рыночной экономики прибыль формируется в результате получения дохода от взаимодействия спроса и предложения строительной продукции. Если на спрос оказывает значительное влияние чувствительность (инерция) рынка, которая обусловлена возмущениями как экономических, так и технических факторов, то предложение строительной продукции и ее конкурентоспособность в значительной мере зависят от способности хозяйствующего субъекта создавать новые виды продукции, улучшать уже существующие, а также повышать эффективность строительного производства. В обозначенном контексте речь может идти о трансформации не только инженерных решений, но и взаимосвязанных управленческих и технологических процессов, т.е. затрагивать все аспекты (стороны) реинжиниринга. Для реализации реинжиниринговых мероприятий хозяйствующий субъект должен обладать резервным капиталом, который он направляет как инвестиции на указанные выше цели [2, 3, 15–18].

Для того чтобы охватить возможности использования преимуществ объединения производственных коллективов в единое целое в рассмотрении предполагаемого будущего строительной компании, оценке различных вариантов стратегии и формулировании политики фирмы, как было отмечено в начале статьи, необходимо стратегическое руководство. Связующим звеном между стратегическим руководством и аппаратом управления служит внутрифирменное планирование — прямая функция системы «оперативное руководство» строительной компании, которое является рубежом между планом

и действием, и представляет собой структурный компонент в схеме управления, тесно связанный с указанными выше системами. В нее поступают сверху инструкции и факты, передаваемые снизу, а также данные из внешней среды. В этой связи оперативное руководство идеально подходит для разработки и непрерывной корректировки плана строительной компании. Данная функция регулирования и контроля с точки зрения системотехники является гомеостатической [1, 2, 19–24].

В строительной организации существует две формы регулирования и контроля:

1. Поддержание дохода на определенном уровне, необходимом для устойчивого положения, который выше некоторого минимума.

2. Контроль соответствия между характеристиками строительной продукции, рыночным спросом на нее и требованиями нормативов.

Имеется, по крайней мере, два основных возмущения на входе системы корпоративного регулирования, требующих пристального внимания:

- 1) колебания внешней экономики;
- 2) циклы научно-технического прогресса.

Таким образом, задача хозяйствующего субъекта должна заключаться в объединении цепей регулирования, связанных с оперативным управлением. Очевидно, что объединение локальных цепей в единый и эффективный контур регулирования должно базироваться на методологических принципах логистики, т.е. определяться такими категориями управления потоками регулирующих воздействий, как направления, мощности потоков, характер воздействий, их инициаторы и реципиенты.

Очевидно, что нельзя обеспечить строго постоянный выход из системы — неизменную норму прибыли или аналогичный процент роста. Результатом корпоративного регулирования ИСД является поддержание наиболее важных параметров в оптимальных границах, а основным действием по управлению будет изменение соотношения между входами контуров повторных капитальных вложений при различных значениях временных констант системы. Регулирующее воздействие зависит в значительной мере от применения упреждающих фильтров внутри системы. Таким фильтром служит применяемое в бухгалтерии сравнение фактических и нормативных затрат или с бюджетом. Отсутствие фильтров ведет к выдаче регулирующего воздействия без демпфирования и к возникновению неуправляемых колебаний в системе [1, 2, 25–29].

Для обеспечения гомеостатического равновесия следует предусмотреть наличие специального функционального элемента. Таким элементом может стать подсистема контроллинга, который в зависимости от уровня иерархии должен обеспечивать единство контроля и принятия корректирующих воздействий в сфере стратегического или оперативно-производственного управления. Этому соответ-

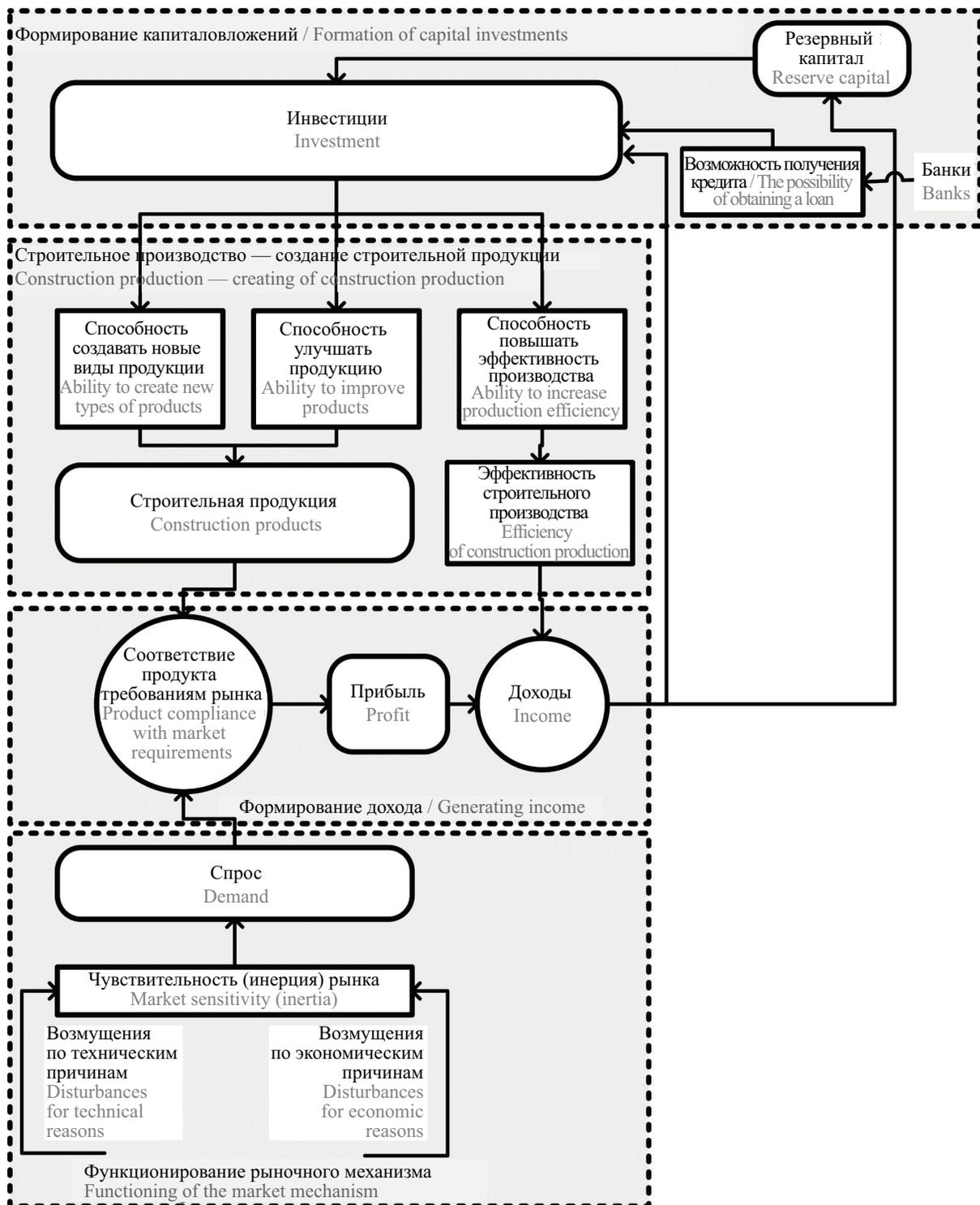


Рис. 2. Схема регулирования строительной компании

Fig. 2. Construction company regulation scheme

ствуют следующие уровни в указанной выше под-системе:

- 1) стратегический контроллинг;
- 2) оперативно-производственный контроллинг.

Последний может иметь функциональное дезагрегирование, например, включать логистический, проектный контроллинг и т.д.

Таким образом, регулируемые параметры системы отражают внутреннюю способность к ново-

ведениям, достижению более высокой производительности, а вне фирмы — благоприятное отношение потребителей к строительной продукции и репутацию компании. Поэтому действия и процедуры по управлению, регулирующие эти параметры, оказывают существенное влияние на капитализацию организации и определяют долгосрочное поведение системы, хотя ее чрезвычайно трудно стабилизировать в условиях быстрых изменений во внешней

среде в силу того, что существует большая зависимость между внешней экономической средой и доходами хозяйствующего субъекта, а основной инструмент корпоративного регулирования и эффективной адаптации к внешним колебаниям — это качественное преобразование бизнес-процессов и организационной структуры, т.е. их реинжиниринг.

Как отмечалось в ранее проведенных исследованиях [4], в качестве бизнес-процесса рассматривается совокупность упорядоченных процедур, для осуществления которых требуются ресурсы, а результатом является продукт или услуга, обладающая ценностью для потребителя. В отечественной практике, как правило, бизнес-процессы тождественны процессам управления.

Отталкиваясь от данного определения, любой бизнес-процесс может быть охарактеризован (рис. 3):

- функциями;
- последовательностью реализации;
- продолжительностью исполнения;
- возможностью автоматизации;
- квалификационным уровнем и численностью исполнителей.

Указанные составляющие бизнес-процессов находятся между собой во взаимодействии, которое впоследствии определяет характер реинжиниринговых мероприятий данного направления [5, 6]. Так, например, полная или частичная автоматизация процедур в рамках бизнес-процесса напрямую влияет на время исполнения (оно сокращается) и на квалификационный уровень и численность административно-управленческого персонала (квалификационные требования повышаются, а численность снижается) [7, 8]. Изменение схемы прохождения и интенсивности регулирующих воздействий из-за автоматизации бизнес-процессов в конечном счете приведет к корректировке последовательно-

сти их исполнения, а в некоторых случаях к появлению новых или отказу от традиционных процедур в структуре процессов управления [1, 3].

Переходя на следующий уровень иерархии — уровень хозяйствующего субъекта, и рассматривая бизнес-процессы как элементы внутрифирменного взаимодействия, можно отметить следующие закономерности в формировании организационной структуры (рис. 4).

1. Группировка функций и их крупность определяют уровень управления, степень детализации в отношении строительного объекта будет увеличиваться по мере приближения регулирующих воздействий к нему. Функции, связанные непосредственно со строительным производством, будут отчетливо проявляться на уровне «строительная площадка — строительный объект», а функции, отражающие обеспечение строительства и администрирование, — на уровне «подразделения и отдельного хозяйствующего субъекта».

2. Функции, технические средства их реализации определяют квалификационные требования к исполнителям бизнес-процессов. Интеграция этих составляющих формирует основу для выделения подразделений различного уровня хозяйствующего субъекта, установления их кадрового состава.

3. Последовательность бизнес-процессов, продолжительность их исполнения, а также автоматизации процедур управления определяют взаимодействие и образуют связи в рамках организации.

4. Уровни управления, перечень подразделений с установленным штатным расписанием, а также взаимодействия между ними формируют организационную структуру хозяйствующего субъекта.

Также очевидно, что качественное изменение составляющих бизнес-процессов приводит к трансформации организационной структуры [30–34].

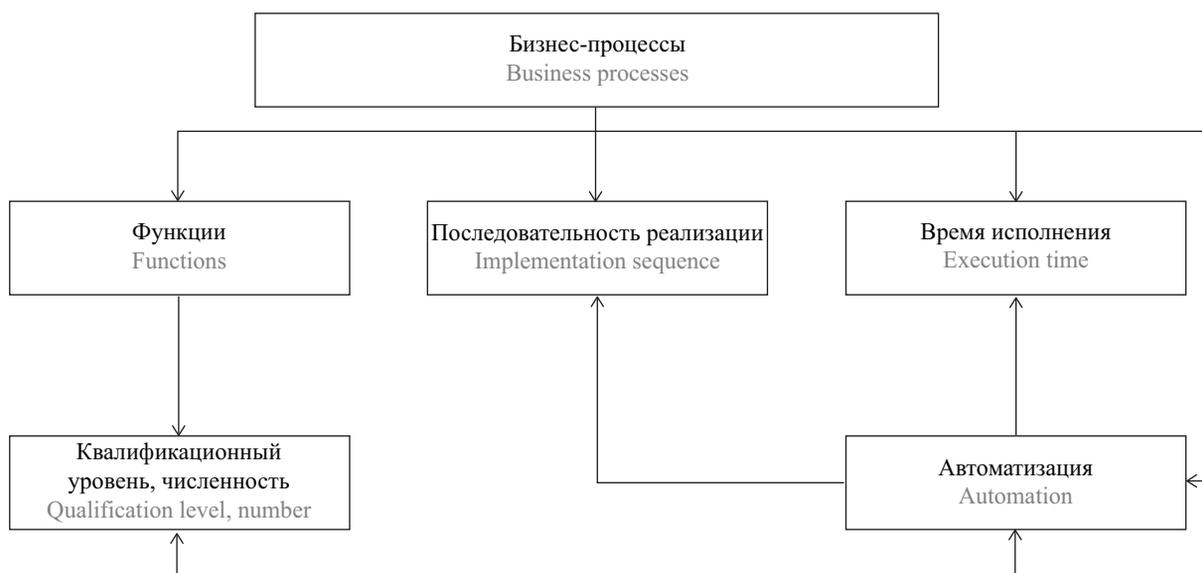


Рис. 3. Составляющие бизнес-процессов в инвестиционно-строительной деятельности

Fig. 3. Components of business processes in investment and construction activities

Следовательно, можно в подобных ситуациях использовать методологию реинжиниринга и выделить две характерные его разновидности:

- реинжиниринг бизнес-процессов;
- реинжиниринг организационной структуры.

Указанные виды реинжиниринга имеют непосредственную зависимость между собой, но факторы побуждения для них будут отличаться, так как они принадлежат к разным уровням иерархии хозяйствующего субъекта, хотя и относятся к одному виду деятельности — управлению (рис. 5).

Исходным моментом реинжиниринга бизнес-процессов могут стать следующие изменения:

- функциональные;
- организационные;
- технические;
- кадровые.

Данные изменения напрямую коррелируются с составляющими бизнес-процессов, и характер их проявления может быть одиночным (изменяется одна составляющая) или комплексным (трансформируются две и более составляющие). В случае

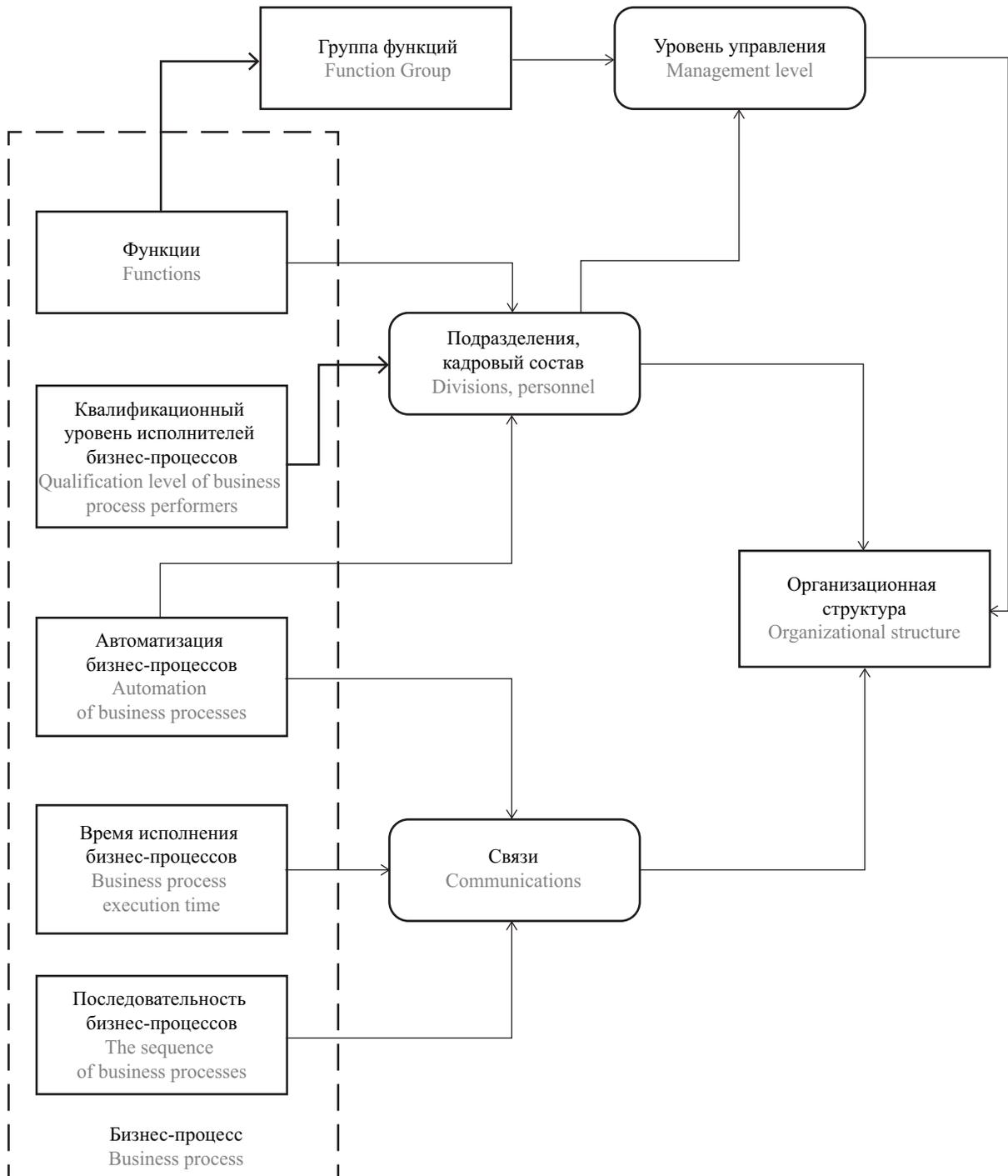


Рис. 4. Схема зависимости бизнес-процессов и организационной структуры инвестиционно-строительной деятельности
 Fig. 4. The scheme of dependence of business processes and organizational structure of investment and construction activities

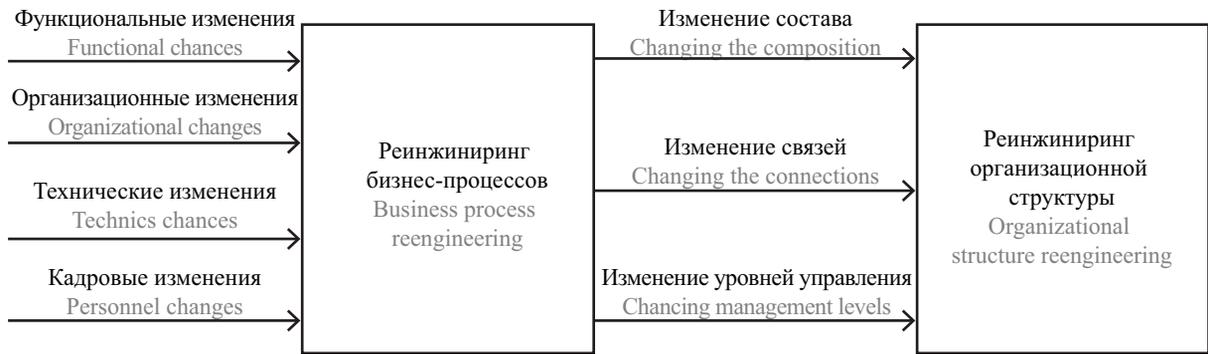


Рис. 5. Схема зависимости реинжиниринга бизнес-процессов и реинжиниринга организационной структуры в строительстве
 Fig. 5. The scheme of dependence of business process reengineering and organizational structure reengineering in construction

комплексного проявления изменения составляющих процессов управления возможно появление синергетического эффекта, приводящего к скачкообразному повышению эффективности бизнес-процесса.

Экстраполируя преобразования на организационно связанную совокупность процессов управления (рис. 4), можно предполагать такие изменения, как:

- состав бизнес-процессов;
- связи между бизнес-процессами;
- уровни управления.

Таким образом, подобные изменения, которые ведут к качественному преобразованию организационной структуры хозяйствующего субъекта, могут рассматриваться как мероприятия (элементы) реинжиниринга организационной структуры, на основе которого возможно решение проблемы разрыва между планированием и реализацией инвестиционных проектов и программ, а также несоответствия между мероприятиями стратегического и оперативного управления. Используя концепцию реинжиниринга как инструмента интеграции управления, адекватного и своевременного отклика на колебания внешней среды, представляется возможным настроить и в дальнейшем поддерживать функционирование антропо-технической системы в заданных граничных параметрах, не прибегая к перепланированию производственной деятельности.

Можно предположить, что существует некоторая дифференциация между приведенными выше видами реинжиниринга. Так, реинжиниринг бизнес-процессов охватывает предметную область оперативного управления, реинжиниринг организационной структуры — стратегического. Однако общая для них методология делает реинжиниринг действенным инструментом объединения стратегического и оперативного управления, их преемственности и соответствия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая вышеприведенное, можно заключить, что представление управления как совокупности организационно связанных бизнес-процессов позволяет повысить его качество и эффективность за счет ориентации производственной деятельности на потребителя и процессного подхода в управлении. В свою очередь качественное преобразование процессов управления и на данной основе в дальнейшем преобразование организационной структуры помогут хозяйствующему субъекту приобрести конкурентные преимущества, используя прогрессивные схемы управления, более широкое применение технических средств, а также кадровый состав работников, отвечающих более высоким требованиям научно-технического прогресса и способных решать сложные задачи ИСД в кратчайшие сроки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сборщиков С.Б. Логистика регулирующих воздействий в инвестиционно-строительной сфере (теория, методология, практика) : дис. ... д-ра экон. наук. М., 2012. 361 с. EDN QGBVJV.
2. Сборщиков С.Б. Системотехническое описание проблемы разграничения планирования и текущей производственной деятельности в строительных организациях // Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. № 1. С. 215–220. DOI: 10.22227/1997-0935.2011.10.151-159
3. Сборщиков С.Б., Маслова Л.А. Применение логистики регулирующих воздействий при реинжиниринге объектов транспортной инфраструктуры //

- Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 5. С. 646–654. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.646-65
4. Сборщиков С.Б., Маслова Л.А., Журавлев П.А. Реинжиниринг в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 7. С. 71–76. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.07.71-76. EDN RLEJNP.
5. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Формирование дополнительного эффекта при управлении стоимостью инвестиционного проекта за счет мероприятий реинжиниринга // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 2 (79). С. 252–263. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-252-263. EDN HNTEUT.

6. *Sborshikov S., Vvedenskiy R., Markova I.* Development of methods of operational and production management of construction of nuclear facilities // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 02047. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302047
7. *Хрупко Т.В.* Исследование применения технологий информационного моделирования в строительной отрасли КНР // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 2. С. 50–52. EDN OWZZEX.
8. *Жаров Я.В.* Информационное моделирование строительства на основе блочнокластерной структуры // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2019. № 11. С. 10–14. EDN XTWNSE.
9. *Жаров Я.В.* Организационно-технологическое проектирование в строительстве на основе интеллектуального блока планирования // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 193–199. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-193-199. EDN RQXZDJ.
10. *Шинкарева Г.Н., Маслова Л.А.* Комплексный инжиниринг как способ интенсификации строительного производства // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2018. № 3. С. 37–41. EDN QIPUEW.
11. *Шинкарева Г.Н.* Интенсификация строительного производства за счет применения комплексного инжиниринга // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2017. № 7. С. 43–46. EDN RAOOYW.
12. *Шинкарева Г.Н.* Модель инжиниринговой схемы организации строительства для контрактов жизненного цикла : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 172 с. EDN XJZLZQ.
13. *Khripko T.* Mathematical modeling of failure of port control systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Issue 1. P. 012101. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012101
14. *Leybman D., Khripko T.* Quality assurance program of a nuclear facility // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703015
15. *Lazareva N.* Innovative components of sustainable development in construction // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. P. 04001. DOI: 10.1051/matecconf/201819604001
16. *Буренин В.С., Езерский В.А., Монастырев П.В.* Исследование современных тенденций проектирования жилых зданий в России и за рубежом // Архитектура и время. 2017. № 5. С. 2. EDN YMXHRR.
17. *Силка Д.Н., Ермолаев Е.Е.* Методологические аспекты новой модели развития строительного комплекса // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 1 (20). С. 34. EDN QINGGG.
18. *Симанович В.М., Ермолаев Е.Е.* Осуществление строительства, реконструкции, капитального ремонта объекта капитального строительства // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2018. № 12. С. 4–8. EDN WIDEBF.
19. *Киевский И.Л., Аргунов С.В., Жаров Я.В., Юргайтис А.Ю.* Алгоритмизация систем планирования, управления и обработки информации в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 11. С. 14–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.14-24. EDN AGNCHY.
20. *Журавлёв П.А.* Инженерная защита. Требуемые изменения строительных нормативов и регламентов // Русский инженер. 2022. № 4 (77). С. 44–48. EDN NAFYWT.
21. *Kochenkova E.M.* Environmental protection. Features of information modeling at the stages of the high-rise building life cycle // Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сб. мат. семинара молодых ученых XXV Междунар. науч. конф. 2022. С. 115–120. EDN XSOQZK.
22. *Яжлев И.К., Попков А.Г., Белогурова О.А.* Проблемы нормативно-правового обеспечения внедрения ресурсо-, энергосберегающих технологий в градостроительной деятельности // Экономика и предпринимательство. 2020. № 3 (116). С. 1000–1002. DOI: 10.34925/EIP.2020.116.3.212. EDN AJSLCW.
23. *Клюев В.Д., Зайцев Д.А., Журавлев П.А.* Нормативная база для стоимостной оценки капитального ремонта многоквартирных домов // Управление многоквартирным домом. 2015. № 1. С. 17–22.
24. *Журавлев П.А.* Номенклатура требуемых объектов капитального строительства для ресурсно-технологического моделирования // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 7. С. 52–57. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.52-57. EDN NVXALL.
25. *Ермолаев Е.Е.* Зарубежный и отечественный опыт использования элементов инжиниринга, аутсорсинга и аутстаффинга в строительном производстве // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2019. № 4. С. 49–67. EDN LNBLOC.
26. *Шумейко Н.М.* Понятия стоимости в строительстве // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 11 (1011). С. 42–45. EDN YMXDRJ.
27. *Zhuravlev P., Bachus E., Markova I.* Nomenclature of works and costs for ensuring the quality of construction products. Identification methods // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661. Issue 1. P. 012128. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012128
28. *Zhuravlev P., Bachus E., Markova I.* Directions of modernization of systems for ensuring the quality of construction of nuclear power facilities // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 05039. DOI: 10.1051/matecconf/201825105039
29. *Попков А.Г.* Реализация комплексных логических решений корпорации «единого заказчика»: на примере строительной отрасли // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Т. 12. № 5–1. С. 324–328. DOI: 10.34670/AR.2022.65.75.026. EDN URUYR.
30. *Попков А.Г.* Кадровое обеспечение строительного производства. Новые подходы к формированию, функционированию, регулированию // Техническое регулирование. Строительство, проектирование и изыскания. 2011. № 8. С. 29–33.

31. Коченкова Е.М., Денисов А.В. Информационное моделирование при решении вопросов защиты окружающей среды объектов строительства // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования — 2022 : сб. докл. III нац. науч. конф. 2023. С. 583–587. EDN BYPLIE.

32. Монастырев П.В., Евдокимцев О.В., Гавриков В.А., Зеленин Г.В. Институт архитектуры, строительства и транспорта в проблемах устойчивого развития региона // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 46–68. EDN UMONJC.

33. Захаров П.Н., Матвеев М.Ю., Хижняков Д.М. Анализ подходов к оценке уровня инновационности развития строительных организаций // Инновации в отраслях народного хозяйства, как фактор решения социально-экономических проблем современности : сб. докл. и мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. 2014. С. 143–151. EDN TKNHQT.

34. Коробко В.И., Карданская Н.Л., Матвеев М.Ю. Философские категории развития в теории управления // Инновации в отраслях народного хозяйства, как фактор решения социально-экономических проблем современности : сб. докл. и мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. 2014. С. 8–14. EDN TKNHEV.

Поступила в редакцию 24 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 3 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 25 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Борисович Сборщиков** — доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник, Дирекция научно-технических проектов и экспертиз; **АО «НИЦ «Строительство»**; 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6; РИНЦ ID: 431022, ORCID: 0000-0001-6802-2888; tous2004@mail.ru;

Наталья Валериевна Лазарева — кандидат технических наук, доцент, руководитель технического департамента; **АО «ЮгИнвестПроект»**; 121087, г. Москва, ул. Баркляя, д. 6, стр. 5; РИНЦ ID: 808973, ORCID: 0000-0001-6802-2888; tous2004@mail.ru.

Вклад авторов:

Сборщиков С.Б. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, научное редактирование, итоговые выводы.

Лазарева Н.В. — обработка материала, проведение исследования, доработка текста, описание результатов и формулирование выводов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Sborshchikov S.B. *Logistics of regulatory impacts in the investment and construction sector (theory, methodology, practice)*. Moscow, 2012; 361. EDN QGBVJV. (rus.).
2. Sborshchikov S.B. System integrators description of the problem differentiation planning and current production action in the construction organizations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2011; 1(1):215-220. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.10.151-159 (rus.).
3. Sborshchikov S.B., Maslova L.A. Application of logistics of regulatory impacts in the reengineering of transport infrastructure facilities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):646-654. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.646-654 (rus.).
4. Sborshchikov S.B., Maslova L.A., Zhuravlev P.A. Reengineering in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 7:71-76. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.07.71-76. EDN RLEJNP. (rus.).
5. Sborshchikov S.B., Lazareva N.V. Formation of additional effect at management of the investment project cost at the expense of reengineering measures. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 2(79):252-263. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-252-263. EDN HNTEUT. (rus.).
6. Sborshchikov S., Vvedenskiy R., Markova I. Development of methods of operational and production management of construction of nuclear facilities. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:02047. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302047
7. Khripko T.V. Research of application of information modeling technologies in the construction industry of KNR. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2021; 2:50-52. EDN OWZZEX. (rus.).
8. Zharov Ya.V. Building information modeling based on block-cluster structure. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2019; 11:10-14. EDN XTWNSE. (rus.).
9. Zharov Ya.V. Organizational technological design in construction based on an intelligent planning unit. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 6(77):193-199. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-193-199. EDN RQXZDJ. (rus.).
10. Shinkareva G.N., Maslova L.A. Integrated engineering as a way of intensification of construction production. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2018; 3:37-41. EDN QIPUEW. (rus.).

11. Shinkareva G.N. Intensification of construction production through the use of integrated engineering. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2017; 7:43-46. EDN RAOOYW. (rus.).
12. Shinkareva G.N. *Model of engineering scheme of construction organization for life cycle contracts : dissertation ... Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2018; 172. EDN XJZLZQ. (rus.).
13. Khripko T. Mathematical modeling of failure of port control systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012101. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012101
14. Leybman D., Khripko T. Quality assurance program of a nuclear facility. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703015
15. Lazareva N. Innovative components of sustainable development in construction. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:04001. DOI: 10.1051/matecconf/201819604001
16. Burenin V.S., Ezersky V.A., Monastirev P.V. Research of modern trends in the design of residential buildings in Russia and abroad. *Architecture and Time*. 2017; 5:2. EDN YMXHRR. (rus.).
17. Silka D., Ermolaev E. Methodological aspects of the new model of building complex. *Online journal of Science Studies*. 2014; 1(20):34. EDN QIGNGG. (rus.).
18. Simanovich V.M., Ermolaev E.E. Implementation of construction, reconstruction, capital repairs of the capital construction facility. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2018; 12:4-8. EDN WIDEBF. (rus.).
19. Kievskiy I.L., Argunov S.V., Zharov Ja.V., Yurgaitis A.Yu. Algorithmization of planning, management and information processing systems in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 11:14-24. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.14-24. EDN AGNCHY. (rus.).
20. Zhuravlev P. Engineering protection. Required changes in building regulations and regulations. *Russian Engineer*. 2022; 4(77):44-48. EDN NAFYWT. (rus.).
21. Kochenkova E.M. Environmental protection. Features of information modeling at the stages of the high-rise building life cycle. *Construction — formation of the life environment : collection of materials of the seminar of young scientists of the XXV International Scientific Conference*. 2022; 115-120. EDN XSOQZK. (rus.).
22. Yazhlev I.K., Popkov A.G., Belogurova O.A. Problems of regulatory support for the introduction of resource-and energy-saving technologies in urban development. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2020; 3(116):1000-1002. DOI: 10.34925/EIP.2020.116.3.212. EDN AJSLCW. (rus.).
23. Klyuev V.D., Zaitsev D.A., Zhuravlev P.A. Regulatory framework for cost estimation of capital repairs of apartment buildings. *Management of an Apartment Building*. 2015; 1:17-22. (rus.).
24. Zhuravlev P.A. Nomenclature of capital construction objects required for resource and technological modeling. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 7:52-57. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.52-57. EDN NVXALL. (rus.).
25. Ermolayev E.E. Foreign and domestic experience in the use of elements of engineering, outsourcing and outstaffing in the construction industry. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2019; 4:49-67. EDN LNBLOC. (rus.).
26. Shumeyko N.M. Concepts of the construction cost estimate. *BST: Bulletin of construction equipment*. 2018; 11(1011):42-45. EDN YMXDRJ. (rus.).
27. Zhuravlev P., Bachus E., Markova I. Nomenclature of works and costs for ensuring the quality of construction products. Identification methods. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 661(1):012128. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012128
28. Zhuravlev P., Bachus E., Markova I. Directions of modernization of systems for ensuring the quality of construction of nuclear power facilities. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:05039. DOI: 10.1051/matecconf/201825105039
29. Popkov A.G. Implementation of integrated logistics solutions of the corporation “single customer”: on the example of the construction industry. *Economics: Yesterday, Today, Tomorrow*. 2022; 12(5-1):324-328. DOI: 10.34670/AR.2022.65.75.026. EDN URUYR. (rus.).
30. Popkov A.G. Staffing of construction production. New approaches to the formation, functioning, regulation. Technical Regulation. *Construction, Design and Survey*. 2011; 8:29-33. (rus.).
31. Kochenkova E.M., Denisov A.V. Information modeling in solving environmental protection issues of construction objects. *Actual problems of the construction industry and education – 2022 : collection of reports of the Third National Scientific Conference*. 2023; 583-587. EDN BYPLIE. (rus.).
32. Monastirev P.V., Evdokimov O.V., Gavrikov V.A., Zelenin G.V. Institute of Architecture, Construction and Transport in the problems of sustainable development of the region. *Sustainable development of the region: architecture, construction and transport : materials of the VIII International Scientific and Practical Conference*. 2021; 46-68. EDN UMONJC. (rus.).
33. Zakharov P.N., Matveev M.Yu., Khizhnyakov D.M. Analysis of approaches to assessing the level of innovation in the development of construction organizations. *Innovations in the branches of the national economy, as a factor in solving socio-economic problems of our time : collection of reports and materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2014; 143-151. EDN TKNHQT. (rus.).
34. Korobko V.I., Kardanskaya N.L., Matveev M.Yu. Philosophical categories of development in management theory. *Innovations in the branches of the national economy, as a factor in solving socio-economic problems of our time : collection of reports and materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2014; 8-14. EDN TKNHEV. (rus.).

Received March 24, 2023.

Adopted in revised form on May 3, 2023.

Approved for publication on December 25, 2023.

BI O N O T E S: **Sergey B. Sborshikov** — Doctor of Economics Sciences, Professor, Chief Researcher, Directorate of Scientific and Technical Projects and Expertise; **JSC “SIC “Stroitelstvo”**; 6, 2nd Institutskaya str., Moscow, 109428, Russian Federation; ID RSCI: 431022, ORCID: 0000-0001-6802-2888; tous2004@mail.ru;

Natalia V. Lazareva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Technical Department; **Yuginvestproekt JSC**; Barclay str., 6, p. 5, Moscow, 121087, Russian Federation; ID RSCI: 808973, ORCID: 0000-0001-6802-2888; tous2004@mail.ru.

Contribution of the authors:

Sergey B. Sborshikov — scientific guidance, research concept, methodology development, writing the source text, scientific editing, final conclusions.

Natalia V. Lazareva — processing of the material, conducting the study; revision of the text description of the results and formation of conclusions of the study.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 33

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.307-314

Методы прогнозирования запасов строительных материалов во время поставок

Юлия Александровна Лаамарти¹, Евгений Геннадьевич Дедов²,
Ольга Юрьевна Крамлих²

¹ *Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет);
г. Москва, Россия;*

² *Смоленский филиал Финансового университета при Правительстве
Российской Федерации (Смоленский филиал Финуниверситета); г. Смоленск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Динамичное развитие розничной торговли строительными материалами повышает требования к своевременным поставкам товаров на склады магазинов. Устоявшиеся классические алгоритмы ориентированы на расчет целевого товарного запаса посредством учета истории продаж, которая характеризует реальный спрос, потому что подвержена искажениям, вызванным влиянием маркетинговых акций, дефицитом товарных запасов и аномальными продажами. В таких условиях прогнозировать товарные запасы посредством классического алгоритма некорректно. Эволюция методов прогнозирования характеризуется смещением акцента со спроса на товары к управлению товарными запасами. По этой причине необходимо развивать практику моделирования заказов поставщикам строительных материалов. В свою очередь возникает проблема прогнозирования поставок запасов строительных материалов. Цель исследования — оценка возможностей существующих способов прогнозирования запасов строительных материалов конкретной группы во время поставок. Задачи — анализ возможностей имеющихся методов прогнозирования для управления запасами товаров, проведение необходимых статистических расчетов по прогнозированию товарных запасов.

Материалы и методы. Применялись методы теоретического анализа научной литературы, анализ статистических данных и сравнительный анализ, метод вычисления среднеквадратической ошибки моделирования RMSE, метод Хольта и имитационное моделирование.

Результаты. На основе среднеквадратической ошибки моделирования RMSE установлен размер ошибки для каждого из проанализированных методов прогнозирования товарных запасов.

Выводы. Исходя из расчетов определено, что наиболее оптимальным методом для прогнозирования товарных запасов строительных материалов является метод имитационного моделирования, так как позволяет прогнозировать с наименьшей степенью ошибок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительная логистика, кривая скользящая, имитационное моделирование, строительный бизнес, прогнозирование, метод Хольта

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лаамарти Ю.А., Дедов Е.Г., Крамлих О.Ю. Методы прогнозирования запасов строительных материалов во время поставок // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 307–314. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.307-314

Автор, ответственный за переписку: Евгений Геннадьевич Дедов, EvgeniyD15@yandex.ru.

Methods of forecasting stocks of construction materials during deliveries

Yulia A. Laamarti¹, Evgeny G. Dedov², Olga Yu. Kramlikh²

¹ *Financial University under the Government of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation;*

² *Smolensk branch of Financial University under the Government of the Russian Federation;
Smolensk, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Dynamic development of retail trade in construction materials increases the requirements for timely delivery of goods to store warehouses. Well-established classical algorithms are focused on calculating the target inventory by taking into account the sales history, which characterizes real demand, because it is subject to distortions caused by the influence of marketing campaigns, stock shortages and abnormal sales. Under such conditions, it is incorrect to predict inventories using the classical algorithm. The evolution of forecasting methods is characterized by a shift in emphasis from demand for goods to inventory management. For this reason, it is necessary to develop the practice of modelling orders to suppliers of construction materials. In turn, there is a problem of forecasting the supply of stocks of construction materials. The purpose of the paper is to assess the capabilities of existing methods of forecasting stocks of construction materials of a particular group during deliveries. Research objectives: to analyze the possibilities of existing forecasting methods for the task of inventory management; to carry out the necessary statistical calculations for forecasting inventories.

Materials and methods. Methods of theoretical analysis of scientific literature, statistical data analysis and comparative analysis, method of calculating the root mean square error of modelling RMSE, Holt method and simulation modelling were used for the research tasks.

Results. Based on the root mean square error of the RMSE modeling, the size of the error is established for each of the analyzed inventory forecasting methods.

Conclusions. Based on the calculations, it is determined that the most optimal method for forecasting inventories of construction materials is the method of simulation modelling, since it allows forecasting with the smallest degree of error.

KEYWORDS: construction logistics, sliding curve, simulation modelling, construction business, forecasting, Holt method

FOR CITATION: Laamarti Yu.A., Dedov E.G., Kramlikh O.Yu. Methods of forecasting stocks of construction materials during deliveries. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):307-314. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.307-314 (rus.).

Corresponding author: Evgeny G. Dedov, EvgeniyD15@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Сложной задачей организации розничной торговли строительными материалами является прогнозирование складских запасов по конкретной товарной группе. Следует учитывать тот факт, что возможность предсказать спрос на конкретный товар зависит от влияния внешних факторов, а также закономерностей функционирования рынка строительных материалов и рынков смежных отраслей, зависящих от строительных материалов. В то же время дефицит сведений по аналогичным периодам не позволяет строительному бизнесу сравнительно точно прогнозировать тенденции продаж стройматериалов.

В данном контексте деятельность строительных маркетплейсов сопряжена с использованием в розничной торговле строительными материалами цифровых технологий для возможности прогнозирования. Одна из таких технологий — «большие данные», отражающие конъюнктуру спроса и предложения за предыдущие периоды. Однако подобная информация чаще всего предназначена для коммерческого применения, крупные компании по продаже стройматериалов ее не предоставляют малому и среднему бизнесу. Сказанное повышает актуальность использования новых методов, позволяющих проанализировать поставки и обосновать соответствующую модель их прогнозирования.

Развитие инновационных технологий в значительной степени усложняет работу предприятий, занятых розничной торговлей строительными материалами. Положительным моментом их применения служат повышение экономической эффективности, полная автоматизация фулфилмента, повышение качества сервиса, обеспечение точности в прогнозировании запасов товаров на складе и уменьшение ошибок в логистике. Требуют адаптации для решения задач строительной логистики существующие методы прогнозирования. Цель статьи — обоснование необходимости использования имитационного моделирования (ИМ) в силу низкого значения ошибки среднеквадратического отклонения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В числе основных методов для проведения исследования применялись анализ научной лите-

ратуры и статистических расчетов, сравнительный анализ, метод вычисления среднеквадратической ошибки моделирования RMSE, метод Хольта и ИМ.

Одним из методов, имеющих базовое значение для логистики, является метод скользящей средней, возможности которого позволяют сглаживать колебания во времени, осуществлять прогнозирование временных рядов и соответственно определять тренды развития динамических рядов. Его основное ограничение — способность к прогнозированию только на краткосрочный период. Недостаток метода заключается в сравнительно большом размере среднеквадратической ошибки.

Метод Хольта обеспечивает экспоненциальное сглаживание параметров α и β на основе субъективного опыта предшествующих прогнозов или посредством прогнозных методов минимизации ошибок. Использование данного метода учитывает такую закономерность, как зависимость последующих значений продаж строительных материалов от предыдущих продаж. Метод отличает сравнительно меньший размер среднеквадратической ошибки.

Высокую точность прогнозирования запасов дает метод ИМ. Его использованием оправдано наиболее низким значением среднеквадратической ошибки моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В силу развития цифровых технологий и активного применения их в экономике исследуемая проблема привлекает внимание специалистов и ученых различных отраслей научного знания. Тем не менее стоит признать, что вопросы строительной логистики в научной литературе исследованы в недостаточной степени. Одна из таких проблем — анализ практических возможностей использования методов прогнозирования для оценки запасов строительных материалов, необходимых для управления поставками.

Основная идея заключается в сравнительном анализе методов прогнозирования, в том числе и метода ИМ. Главным критерием оценки для сравнения их прогностических возможностей служит значение среднеквадратической ошибки моделирования RMSE.

Следует подчеркнуть, что к указанной группе проблем проявляют научный интерес зарубежные исследователи [1–11]. Учитывались мнения, представленные в зарубежной учебной литературе^{1,2}.

Обращение к научной литературе показывает, что интерес к этой проблематике растет, имеется также ряд российских исследований [12–20]. Такие переменные, как период времени и величина анализируемого процесса, чаще всего характеризуют временный ряд. Исследователи выделяют следующую закономерность касательно параметров временного ряда: время является зависимой переменной, в то время как параметр величины анализируемого процесса — зависимый. Принцип применения метода основывается на статистических наблюдениях, позволяющих оценить динамику показателя, уточнить его тренд, а также экстраполировать его с целью прогнозной оценки закономерностей и трендов его развития в будущем. Согласно справедливому замечанию Ю.В. Лажаннинкас и О.С. Кочегарова, существуют некоторые ограничения, не позволяющие широко применять этот метод в прогнозных исследованиях, согласно которым метод скользящей средней дает возможность прогнозировать лишь на краткосрочный период. Более подробно ознакомиться с формулой для вычисления данного показателя можно в совместной публикации авторов [14].

Для иллюстрации принципа использования формулы расчетов за основу возьмем пример деятельность маркетплейса для строительного бизнеса Леруа Мерлен по продаже конкретного образца строительного материала за период ноябрь–декабрь. Наглядно данные продемонстрированы в табл. 1. Важное уточнение — факт снижения объема продаж, потому что закончилась акция Black Friday.

Для оценки эффективности прогноза посредством скользящей средней следует поделить выборку на фактическую и прогнозную, и использовать формулу, предложенную Ю.В. Лажаннинкас и О.С. Кочегаровой [1].

Важно обратить внимание на то обстоятельство, что не хватает среднего значения на первом и последнем временном интервале, что немало важно для применения скользящей средней. Компенсировать этот недостаток позволит определение среднеквадратической ошибки моделирования RMSE, расчет которой дает возможность установить, что размер ошибки для скользящей средней будет составлять более 20,6 % на ближайшие 7 дней на основе данных за 21 день.

¹ Bontempi G., Taieb S.B., Borgne Y.L. Machine Learning Strategies for Time Series Forecasting // European Business Intelligence Summer School. 2012.

² Bontempi G., Taieb S.B., Borgne Y.L. Machine Learning Strategies for Time Series Forecasting // Business Intelligence. Lecture Notes in Business Information Processing. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. Vol. 138.

Другим методом, позволяющим прогнозировать запасы строительных материалов, является метод Хольта, суть которого сводится к экспоненциальному сглаживанию параметров α и β на основе субъективного опыта предшествующих прогнозов или посредством прогнозных методов минимизации ошибок. При расчетах следует учитывать закономерности: при больших параметрах значений будет наблюдаться быстрый отклик на наблюдаемые перемены; при минимальных параметрах будет относительно гладкая динамика прогноза.

Так же, как и в предыдущих случаях, выборка делится на прогнозную и тестовую. Определение среднеквадратической ошибки моделирования RMSE позволяет установить, что размер ошибки для метода экспоненциального сглаживания (метод Хольта) будет составлять более 9,16 % на ближайшие 7 дней на основе данных за 21 день.

Применение следующего метода для прогнозирования запасов строительных материалов основывается на вычислении с помощью уравнений авторегрессии, учитывающем данные о предыдущих продажах. Использование этого метода учитывает такую закономерность, как зависимость последующих значений продаж строительных материалов от предыдущих продаж. Уравнение авторегрессии для прогнозирования запасов строительных материалов имеет вид:

$$Y_t = c + \varepsilon_t + \alpha_1 Y_{t-1} + \alpha_2 Y_{t-2} + \alpha_3 Y_{t-3}, \quad (1)$$

где Y_t — продажи за период t ; c — постоянная величина, которая всегда прибавляется к прогнозу; ε_t — случайная компонента (белый шум) в период t ; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — коэффициенты влияния продаж в прошлые периоды.

Следует учитывать при использовании этого метода тот факт, что выбор порядка регрессии зависит от сферы использования метода, математической компетентности специалиста, применяющего формулу, а также от сезонных закономерностей, качества выборки и других показателей. Также установлено, что высокий порядок регрессии не во всех случаях обеспечивает высокую точность прогноза. Безусловно, учет большого количества временных периодов будет способствовать повышению точности прогноза. Тем не менее не в каждом временном периоде данные могут быть «чистыми». Подобные выбросы могут учитываться регрессионной моделью и влиять на качество прогноза. В силу высокой степени вероятности влияния случайных компонентов в ряду продаж строительных материалов целесообразно проиллюстрировать вычисление с помощью уравнений авторегрессии на примере других данных (рис. 1, 2)^{3,4} [1, 14, 15].

³ Повышаем прибыль торговых компаний с размерами от одного склада до федеральных сетей // Forecast NOW. URL: <https://fnow.ru>

⁴ Почему мы не считаем MAPE, RMSE и другие математические ошибки при прогнозировании спроса // Forecast NOW. URL: https://fnow.ru/articles/forecasting_error

Табл. 1. Данные о продажах товара аккумуляторная болгарка за ноябрь–декабрь 2022 г.⁵

Table 1. Data on sales of the product battery grinder for November–December 2022⁵

Дата Date	Заказы Orders	Дата Date	Заказы Orders
21 ноября November 21	156	5 декабря December 5th	65
22 ноября November 22	135	6 декабря December 6th	57
23 ноября November 23	138	7 декабря December 7th	56
24 ноября November 24	158	8 декабря December 8th	72
25 ноября November 25	168	9 декабря December 9th	89
26 ноября November 26	144	10 декабря December 10th	86
27 ноября November 27	181	11 декабря December 11th	99
28 ноября November 28	149	12 декабря December 12th	84
29 ноября November 29th	157	13 декабря December 13th	88
30 ноября November 30th	152	14 декабря December 14th	116
1 декабря December 1st	30	15 декабря December 15th	118
2 декабря December 2nd	38	16 декабря December 16th	113
3 декабря December 3rd	59	17 декабря December 17th	113
4 декабря December 4th	66	18 декабря December 18th	128

⁵ Леруа Мерлен. URL: <https://leroymerlin.ru/>

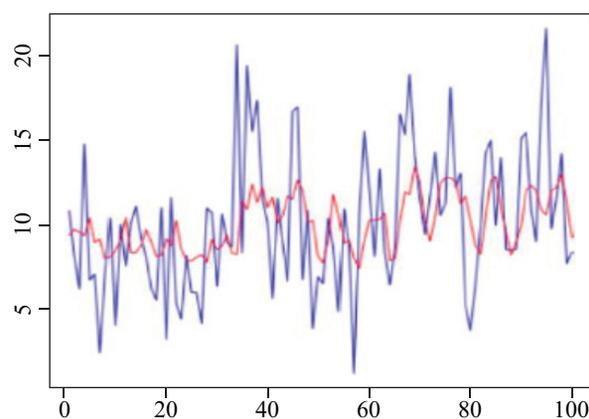


Рис. 1. Авторегрессия восьмого порядка. Временной интервал составляет 100 дней⁶

Fig. 1. Autoregression of the eighth order. The time interval is one hundred days⁶

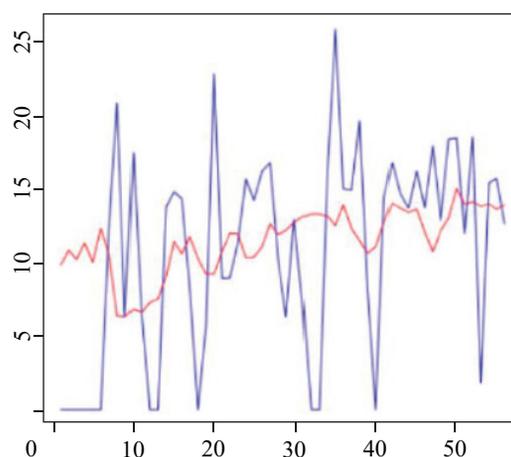


Рис. 2. Сравнение прогнозных и фактических данных (период прогнозирования на 50 дней)⁶

Fig. 2. Comparison of forecast and actual data (50-day forecast period)⁶

⁶ Forecas NOW. URL: <https://fnow.ru>

Сравнительный анализ порядков авторегрессии по критерию величины ошибки показывает, что именно восьмой порядок следует признать в качестве оптимального при иллюстрации данных. При этом крайне важным является подбор своего порядка и коэффициентов для каждого отдельного набора данных. Сравнительный анализ точности порядков продемонстрирован в табл. 2.

Табл. 2. Сравнительный анализ модели и ошибок прогноза строительных материалов, %

Table 2. Comparative analysis of the model and forecast errors of construction materials, %

Ошибка прогноза Forecast error	Порядок модели Model order
7,1126	1
7,1692	2
7,0793	4
7,0371	6
6,9600	7
6,9618	8
7,0216	13
7,0380	14
7,0385	15
7,3546	28
7,4529	32

Анализ данных (табл. 2) показывает, что для авторегрессии 8-го порядка значение ошибки прогнозирования RMSE не превышает 6,96 %, т.е. более точное по сравнению с предыдущими методами.

Для задач прогнозирования складских запасов строительных материалов также можно сравнить с предыдущими методами возможности имитационного моделирования, позволяющего посредством псевдослучайных величин имитировать процесс управления запасами строительных материалов⁷. С помощью этого метода можно и протестировать влияние нововведений на этот процесс, и получить широкую номенклатуру данных, необходимых для анализа. Чтобы использовать метод ИМ на практике, следует определить коэффициент вариации по формуле:

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}}, \quad (2)$$

где v — коэффициент вариации; σ — среднеквадратическое отклонение; \bar{x} — среднее значение количества продаж стройматериалов.

Получив значения необходимых величин и применив формулу, был вычислен коэффициент вариации:

⁷ Методы прогнозирования спроса и управления запасами. Их преимущества и недостатки. Вебинар // YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=R1sDMF7GX9Y>

$$v = \frac{47,09}{112,4} = 0,419.$$

На основе индикаторов и критериев установлено, что придется работать со случайными величинами, которые подчинены гамма-распределению. В таком случае расчет ежедневного количества заказов будет производиться по следующей формуле:

$$x_i = -\frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^{\eta} \ln(1 - \xi_j), \quad (3)$$

где x_i — имитируемое значение количества заказов; λ , η — вычисляемые коэффициенты; ξ_j — случайная величина, распределенная равномерно.

Далее необходимо вычислить параметры η и λ , которые определяются по формулам:

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{v}}; \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{x}{\sigma^2}. \quad (5)$$

Вычисления позволили установить следующие значения параметров η и λ :

$$\eta = \frac{1}{0,419^2} = 5,7 \approx 6;$$

$$\lambda = \frac{112,4}{47,09^2} = 0,05.$$

Далее следует смоделировать процесс расхода запасов строительных материалов. Необходимо учитывать, что среднее время поставки T_n составляет 10 дней, а страховой запас Q_s не превышает 2000 изделий. Данные расчетов по моделированию расхода запасов строительного товара представлены в табл. 3.

Данные табл. 3 дают возможность прийти к выводу о том, что дефицит строительного товара наступает ближе к 16 дню продаж. Такой вывод сделан на основе 30 итераций, а для достоверности их нужно минимум 50 тысяч. Полученная таблица позволяет с высоким уровнем точности определить размер страхового запаса, необходимого для обеспечения должного уровня торгового сервиса.

Установлено, что при фиксированном уровне запасов строительного товара и фиксированном времени поставки растет возможность обеспечения уровня сервиса до 93,4 % (значение среднеквадратической ошибки моделирования RMSE не превышает уже 6,6 %). Аналогично можно прогнозировать и другие величины (время поставки строительных товаров на склад и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведение итогов позволяет сделать вывод о том, что в процессе прогнозирования запасов стро-

Табл. 3. Моделирование расхода запасов строительного товара

Table 3. Modelling of inventory consumption of construction goods

День, номер Day, number	Случайное число ξ_i Random number ξ_i	Значение потребления x_i Consumption value x_i	Размер остатка Residue size
...
15	0,99	542	495,10
16	0,71	147	-47,31
17	0,17	23	-193,99
18	0,62	116	-216,51
....

ительных материалов важно учитывать связь между зависимыми (время) и независимыми переменными (величина запаса). Установлено, что существующие методы прогнозирования отличает ряд ограничений, связанных с периодом прогнозирования. Оценка возможностей методов показывает, что на качество прогнозирования влияние оказывает учет разного рода закономерностей, проявляющихся при расчетах прогнозов, количества временных рядов, качества выборки, компетентности специалистов.

В результате проведенного исследования на основе критерия среднеквадратической ошибки моделирования RMSE был произведен сравнительный

анализ методов прогнозирования и факторов, ограничивающих их использование. Следует признать, что для задач прогнозирования запасов строительных материалов эти методы имеют важное значение. Определено, что для эффективного прогнозирования запасов строительных материалов и спроса на них целесообразно применять имитационное моделирование в силу низкого значения ошибки среднеквадратического отклонения, избегая при этом финансовых потерь. Применение стандартных методов позволяет эффективно прогнозировать запасы строительных материалов и товаров на короткий временной интервал.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Богдасаров М.А., Шешко Н.Н., Маевская А.Н. Методические подходы к прогнозированию и оценке ресурсов минерального строительного сырья // Литасфера. 2021. № 1 (54). С. 138–146.
2. Пандас А.В., Дячук К.С. Аналіз методик прогнозування кон'юнктури будівельного ринку // Молодий вчений. 2018. № 3. С. 359–362.
3. Aktepe A., Yanik E., Ersöz S. Demand forecasting application with regression and artificial intelligence methods in a construction machinery company // Journal of Intelligent Manufacturing. 2021. Vol. 32. Pp. 1587–1604. DOI: 10.1007/s10845-021-01737-8
4. Augiseau V., Barles S. Studying construction materials flows and stock : a review // Resources, Conservation and Recycling. 2017. Vol. 123. Pp. 153–164. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.09.002
5. Bontempi G., Taieb S.B., Borgne Y.L. Machine learning strategies for time series forecasting // European Business Intelligence Summer School. 2013. Pp. 62–77. DOI: 10.1007/978-3-642-36318-4_3
6. Cheng M., Fang F., Kinouchi T., Navon I.M., Pain C.C. Long lead-time daily and monthly streamflow forecasting using machine learning methods // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 590. P. 125376. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125376
7. Ma Q., Shi S., Liang Y. Research on simulation method of material demand forecast // Communications in Computer and Information Science. 2012. Pp. 345–352. DOI: 10.1007/978-3-642-34396-4_42
8. Mansur A., Triyoso K. Product inventory predictions at small medium enterprise using market basket analysis approach-neural networks // Procedia Economics and Finance. 2012. Vol. 4. Pp. 312–320. DOI: 10.1016/s2212-5671(12)00346-2
9. Shirinov B., Mahas N. Forecasting sales volume in construction companies // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Pp. 825–830. DOI: 10.1007/978-3-031-17385-1_70
10. Shiha A., Dorra E.M., Nassar K. Neural networks model for prediction of construction material prices in Egypt using macroeconomic indicators // Journal of Construction Engineering and Management. 2020. Vol. 146. Issue 3. DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001785
11. Thormählen V. Suitability of oracle applications for standard and activity based costing // Vortragsband zur 11. Jahrestagung der DOAG-Konferenz Fellbach 1998, Proceedings. Hrsg : DOAG, Deutsche ORACLE-Anwendergruppe, Stuttgart, 1998. Pp. 164–182.
12. Грицай А.А. Интеллектуальная информационная система прогнозирования потребительского спроса и оптимизации товарных запасов // Программные продукты и системы. 2015. № 4. С. 219–230. EDN VIDCCX.

13. Ефименко А.З., Бездомников Р.В. Моделирование запасов и ритмичных поставок строительных материалов // Вестник МГСУ. 2011. № 1–2. С. 263–267. EDN OUVZQD.

14. Лажсаунинкас Ю.В., Кочегарова О.С. Статистические методы прогнозирования : учебное пособие. Саратов : Амирит, 2017. 64 с.

15. Лопаткина А.А., Бжассо А.А. Анализ эффективности управления запасами организации: методические подходы и его значение в деятельности экономического субъекта // Экономика и бизнес: теория и практика. 2023. № 5–2 (99). С. 85–88. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-5-2-85-88. EDN FZPIYE.

16. Мельникова Ю.В. Совершенствование стратегического планирования производства и сбыта подсолнечника на основе прогнозирования рыночной конъюнктуры : дис. ... канд. экономических наук. Саратов, 2017. 216 с. EDN BRBTFT.

17. Новикова Н.Г., Щепина С.В. Факторы, влияющие на эффективность управления запасами в контексте управления конкурентоспособностью торговой компании // Известия Байкальского государственного университета. 2023. Т. 33. № 1. С. 74–83. DOI: 10.17150/2500-2759.2023.33(1).74-83. EDN RTLXNA.

18. Kabanov V.N. Supply volume forecasting of building materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698. Issue 5. P. 055018. DOI: 10.1088/1757-899x/698/5/055018

19. Khaimovich I.N., Didkovskaya O.V. Forecasting of the cost of building materials in a volatile market // The European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. 2022. DOI: 10.15405/epsbs.2022.08.29

20. Makarov S.I., Sevastyanova S.A., Ralyk D.V. Modeling and forecasting of economic indicators for building materials producers // European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. 2020. DOI: 10.15405/epsbs.2020.03.154

Поступила в редакцию 13 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 27 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 18 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Юлия Александровна Лаамарти** — кандидат социологических наук, доцент кафедры менеджмента; **Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет);** 125167, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 49/2; РИНЦ ID: 656106, ORCID: 0000-0002-2835-0892; Laamarti@yandex.ru;

Евгений Геннадьевич Дедов — кандидат педагогических наук, доцент кафедры экономики и менеджмента; **Смоленский филиал Финансового университета при Правительстве Российской Федерации (Смоленский филиал Финуниверситета);** 214018, г. Смоленск, пр-т Гагарина, д. 22; EvgeniyD15@yandex.ru;

Ольга Юрьевна Крамлих — кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и менеджмента; **Смоленский филиал Финансового университета при Правительстве Российской Федерации (Смоленский филиал Финуниверситета);** 214018, г. Смоленск, пр-т Гагарина, д. 22; kramlikh.olga@yandex.ru.

Вклад авторов:

Лаамарти Ю.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Дедов Е.Г. — научное редактирование текста, доработка текста.

Крамлих О.Ю. — доработка текста и итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bogdasarov M.A., Sheshko N.N., Maevskaja A.N. Methodological approaches to forecasting and evaluation of mineral resources of construction raw materials. *Lithosphere*. 2021; 1:138-146. (rus.).

2. Pandas A.V., Djachuk K.S. Analysis of methods for predicting construction market conditions. *Young scientist*. 2018; 3:359-362.

3. Aktepe A., Yanik E., Ersöz S. Demand forecasting application with regression and artificial intelligence methods in a construction machinery company. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2021; 32:1587-1604. DOI: 10.1007/s10845-021-01737-8

4. Augiseau V., Barles S. Studying construction materials flows and stock : a review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017; 123:153-164. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.09.002

5. Bontempi G., Taieb S.B., Borgne Y.L. Machine learning strategies for time series forecasting. *European Business Intelligence Summer School*. 2013; 62-77. DOI: 10.1007/978-3-642-36318-4_3

6. Cheng M., Fang F., Kinouchi T., Navon I.M., Pain C.C. Long lead-time daily and monthly streamflow forecasting using machine learning methods. *Journal of Hydrology*. 2020; 590:125376. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125376

7. Ma Q., Shi S., Liang Y. Research on simulation method of material demand forecast. *Communications in Computer and Information Science*. 2012; 345-352. DOI: 10.1007/978-3-642-34396-4_42
8. Mansur A., Triyoso K. Product inventory predictions at small medium enterprise using market basket analysis approach-neural networks. *Procedia Economics and Finance*. 2012; 4:312-320. DOI: 10.1016/s2212-5671(12)00346-2
9. Shirinov B., Mahas N. Forecasting sales volume in construction companies. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023; 825-830. DOI: 10.1007/978-3-031-17385-1_70
10. Shiha A., Dorra E.M., Nassar K. Neural networks model for prediction of construction material prices in Egypt using macroeconomic indicators. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020; 146(3). DOI: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001785
11. Thormählen V. Suitability of oracle applications for standard and activity based costing. *Vortragsband zur 11. Jahrestagung der DOAG-Konferenz Fellbach 1998, Proceedings*. Hrsg: DOAG, Deutsche ORACLE-Anwendergruppe, Stuttgart. 1998; 164-182.
12. Gricaj A.A. Intelligent information system for forecasting consumer demand and optimizing inventory. *Software Products and Systems*. 2015; 4:219-230. EDN VIDCCX. (rus.).
13. Efimenko A.Z., Bezdomnikov R.V. Modeling of stocks and rhythmical deliveries of building materials. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 1-2:263-267. EDN OUVZQD. (rus.).
14. Lazhauninkas Ju.V., Kochegarova O.S. *Statistical forecasting methods : Study guide*. Saratov, Amirit, 2017; 64. (rus.).
15. Lopatkina A.A., Bzhasso A.A. Analysis of the effectiveness of the organization's inventory management: methodological approaches and its significance in the activities of an economic entity. *Economics and Business: theory and practice*. 2023; 5-2(99):85-88. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-5-2-85-88. EDN FZPIYE. (rus.).
16. Mel'nikova Ju.V. *Improvement of strategic planning of sunflower production and marketing based on forecasting market conditions : dis. ... candidate of economic sciences*. Saratov, 2017; 216. EDN BRBTFT. (rus.).
17. Novikova N.G., Shchepina S.V. Factors affecting the efficiency of inventory management in the context of competitiveness management of a trading company. *Proceedings of the Baikal State University*. 2023; 33(1):74-83. DOI: 10.17150/2500-2759.2023.33(1). 74-83. EDN RTLXNA. (rus.).
18. Kabanov V.N. Supply volume forecasting of building materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 698(5):055018. DOI: 10.1088/1757-899x/698/5/055018
19. Khaimovich I.N., Didkovskaya O.V. Forecasting of the cost of building materials in a volatile market. *The European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. 2022. DOI: 10.15405/epsbs.2022.08.29
20. Makarov S.I., Sevastyanova S.A., Ralyk D.V. Modeling and forecasting of economic indicators for building materials producers. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. 2020. DOI: 10.15405/epsbs.2020.03.154.

Received November 13, 2023.

Adopted in revised form on November 27, 2023.

Approved for publication on December 18, 2023.

B I O N O T E S : **Yulia A. Laamarti** — Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor of the Department of Management; **Financial University under the Government of the Russian Federation**; 49/2 Leningradsky ave., Moscow, 125167, Russian Federation; ID RSCI: 656106, ORCID: 0000-0002-2835-0892; Laamarti@yandex.ru;

Evgeny G. Dedov — Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Economics and Management; **Smolensk branch of Financial University under the Government of the Russian Federation**; 22 Gagarina ave., Smolensk, 214018, Russian Federation; EvgeniyD15@yandex.ru;

Olga Yu. Kramlikh — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Economics and Management; **Smolensk branch of Financial University under the Government of the Russian Federation**; 22 Gagarina ave., Smolensk, 214018, Russian Federation; kramlikh.olga@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Yulia A. Laamarti — scientific guidance, research concept, development of methodology, writing the source text, final conclusions.

Evgeny G. Dedov — scientific text editing, text revision.

Olga Yu. Kramlikh — revision of the text and final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 339.137.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.315-327

Нейминг как один из факторов ценообразования в сфере жилищного строительства на примере жилых комплексов Москвы и Московской области

Елена Юрьевна Васильева, Мери Георгиевна Даниелян

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен вопрос конкуренции на современном российском рынке жилой недвижимости. Изучению подвергнут малоизученный аспект — выбор лексических средств и форм, способствующих лучшим продажам.

Материалы и методы. Материалами исследования послужили работы отечественных и зарубежных авторов, а также информация официальных сайтов, проспектов, наружной рекламы, ряда крупнейших застройщиков, действующих на территории Москвы и Московской области. Используются методы: наблюдение, описание, опрос, количественно-статистический анализ, сравнительно-сопоставительный анализ, структурный анализ, семантико-стилистический анализ, частотный анализ и др.

Результаты. Изучено влияние языкового образа на ценообразование и популярность у покупателей на рынке жилой недвижимости. Анализ предложений крупнейших застройщиков, действующих в Москве и Московской области, подтвердил предположение о том, что лучшим продажам, а также формированию более высоких цен способствует использование иностранных слов в названиях жилых комплексов (ЖК), иностранных заимствований для обозначения помещений и пространств (loungе-зона, плей-хаб, коворкинг), эпитетов «клубный дом» и др.

Выводы. Языковые образы в названиях, описании и рекламе ЖК сегодня являются эффективным инструментом повышения их конкурентоспособности, лучшего продвижения на рынке и выгодных продаж по более высоким ценам. В качестве дискуссионного положения выдвинута идея о том, что есть и обратная сторона данного явления: языковой образ, формирующий представление о ЖК как об элитарном, закрытом, доступном лишь узкому кругу проживающих, и одновременно самодостаточном, предоставляющим им не только жилье, но и широкий спектр социально-бытовых услуг и деловое пространство, приводит к изолированности и своего рода анклавности таких комплексов. В наши дни происходит асоциализация обитателей ЖК, распространение образа жизни, не предполагающего лишних контактов с внешним миром, что означает формирование новой парадигмы в жилищном строительстве и новой урбанистической философии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рынок недвижимости, новостройки, маркетинг в строительстве, конкуренция, реклама на рынке жилой недвижимости, языковые образы в названиях жилых комплексов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Васильева Е.Ю., Даниелян М.Г. Нейминг как один из факторов ценообразования в сфере жилищного строительства на примере жилых комплексов Москвы и Московской области // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 315–327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.315-327

Автор, ответственный за переписку: Мери Георгиевна Даниелян, DanielyanMG@mgsu.ru.

Naming as one of pricing factors in the field of house construction on the example of housing estates in Moscow and Moscow region

Elena Yu. Vasilyeva, Mary G. Danielyan

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

ABSTRACT

Introduction. The authors of the paper studied the issue of competition in the modern Russian market of the residential real estate. A little-studied aspect — the choice of the lexical means and forms contributing to better sales — is studied.

Materials and methods. Works of domestic and foreign authors, as well as the content from official websites, prospects, outdoor advertising and information from some of the largest developers operating in Moscow and Moscow region were considered as the materials of the research. The authors used such methods as observation, description, poll, quantitative statistical analysis, comparative analysis, structural analysis, semantic-stylistic analysis, frequency analysis, etc.

Results. The authors studied the influence of language image on pricing and popularity among buyers in the market of the residential real estate. The analysis of offers of the largest developers operating in Moscow and Moscow region confirmed the assumption that the best sales, as well as the formation of higher prices, are promoted by the use of foreign words in the names of housing estates, foreign loan words to denote rooms and spaces (“lounge zone”, “play-hub”, co-working), epithets like “club house”, etc.

Conclusions. As the result of the conducted research, the authors made the conclusion, that language images in names, in the description and advertizing of housing estates are an effective instrument to increase their competitiveness, better market promotion and profitable sales at higher prices. The idea that there is also a downside to this phenomenon and it is put forward as a debatable point: the language image, which forms an image of the housing estate as elite, closed, accessible only to a narrow circle of residents, and at the same time self-sufficient, providing them not only with housing, but also with a wide range of social and domestic services and even business space, leads to isolation and some kind of enclave in such complexes. Nowadays there is an a desocialization of the residents of housing estates, spreading a lifestyle that does not involve unnecessary contacts in the “outside world”, and in fact, that means the formation of a new paradigm in housing construction and a new urban philosophy.

KEYWORDS: real estate market, newly constructed buildings, marketing in construction, the competition, advertizing in the market of the residential real estate, language images in names of housing estates

FOR CITATION: Vasilyeva E.Yu., Daniyelyan M.G. Naming as one of pricing factors in the field of house construction on the example of housing estates in Moscow and Moscow region. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):315-327. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.315-327 (rus.).

Corresponding author: Mary G. Daniyelyan, DaniyelyanMG@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Конкуренция — важный фактор в экономической сфере. Одним из способов повысить конкурентоспособность продукта является проведение рекламной кампании, грамотно воздействующей на целевую аудиторию и нацеленной на обеспечение высокого уровня продаж. Рекламный текст, помимо визуальной составляющей, включает вербальную составляющую. Строительная компания, предъявляя тот или иной строительный объект, выбирает маркетинговую стратегию, способствующую повышению продаж, а перед разработчиками рекламы встает вопрос о выборе лексических средств и форм, привлекающих потенциальных покупателей.

Каждая социально-экономическая ситуация диктует новые языковые формы, которые должны соответствовать требованиям и желаниям потенциальных покупателей. Современные языковые образы, вступив в конкуренцию с традиционными, нередко выигрывают благодаря своей выразительности. Язык рекламы жилых комплексов отражает языковой вкус современного потребителя и может ускорить продвижение товара на рынке.

В названиях жилых комплексов (ЖК) используется немало метафор и аллюзий, воздействующих на эмоциональную сферу, например «Авеню 77», «TopHILLS», «iLove», «Discover», «River Sky», «City Park», «Нормандия», «Сакраменто». С точки зрения маркетинга эти названия эффективны и, как следствие, способны привлечь потенциальных клиентов. Конкуренция на рынке жилья спровоцировала использование заимствований, а в некоторых случаях и варваризмов, нестандартных языковых образов с целью эмоционального воздействия на целевую аудиторию.

На названия ЖК влияет как технический прогресс, так и сдвиг культурных ориентиров. Реклама как маркетинговая коммуникация представляется формой продвижения товара и стимулирования его продажи. Названия ЖК служат одновременно и рекламой и формируют эстетико-стереотипные образы, воспринимаемые как неделимое единство.

Рекламный текст является креолизированным, включающим языковую и визуальную составляющие. Выразительность и яркость заголовка рекламного текста — залог успеха всей PR-кампании. Именно поэтому ЖК даются «кричащие», запоминающиеся

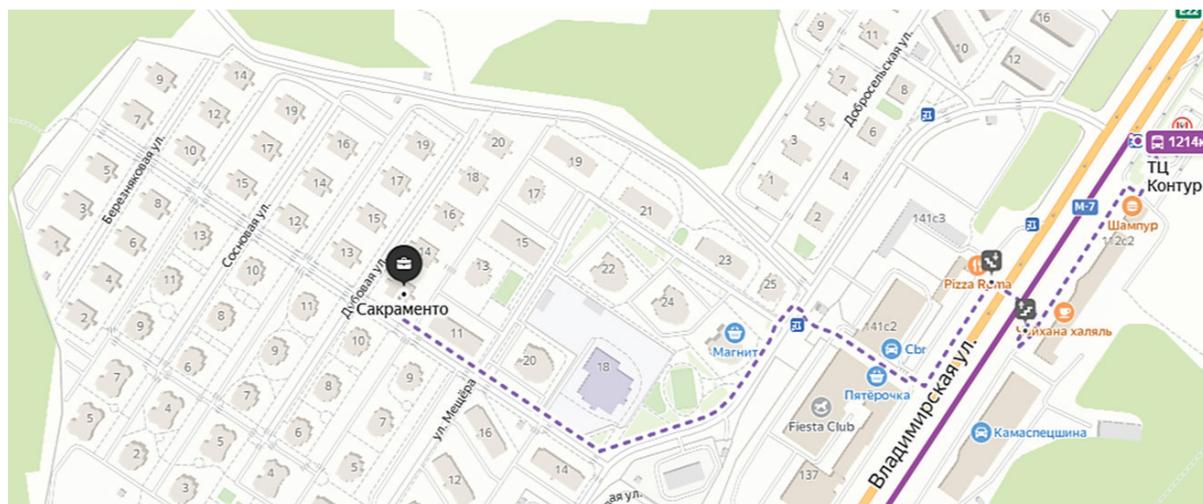


Рис. 1. Расположение ЖК «Сакраменто»

Fig. 1. Location of Housing estate “Sacramento”

названия. Очевидно, что название ЖК «Нормандия» выглядит достойнее, впечатляюще и результативнее, нежели только информация, что некий ЖК находится на Тайнинской ул. (СВАО, Москва). Другой пример — жилой комплекс с «говорящим» названием «Сакраменто» не произвел бы благоприятного впечатления, если бы была просто распространена информация о том, что фактически это жилье эконом-класса, без отделки, расположенное в Московской области посреди дачного поселка; от Москвы примерно 1 ч 40 мин езды на автомобиле, от железнодорожной станции Балашиха — 50 мин езды, ближайший маршрут общественного транспорта в сторону Балашихи и Москвы — трасса М7 (рис. 1).

Использование в названиях ЖК англицизмов — это, с одной стороны, дань моде [1], с другой — маркетинговый ход. Требования, предъявляемые к неймингу, должны способствовать хорошим продажам, быть запоминающимися и оригинальными. Для лучшего запоминания рекламы ее основная часть должна быть написана лаконично, без технических терминов, а слоган, содержащий главный рекламный аргумент, — быть наиболее выразительным. Текст, как правило, сопровождается изображением, дополняющим рекламный образ. Таким образом, соединение текста с содержательным зрительным образом создает коммуникативно-смысловое единство.

Авторы статьи исследовали, как применение языковых образов влияет на реакцию потребителя, способствует продвижению объекта на рынке недвижимости, какова взаимосвязь между ценообразованием на жилье в новостройках и названиями ЖК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретическую базу исследования составили работы отечественных и зарубежных авторов, посвященные рынку недвижимости, маркетингу, рекламе [2–11]. Одновременно принимались во внимание

работы в области прикладного языкознания¹ [1, 12–18].

Авторами статьи проанализировано содержание официальных сайтов, проспектов, а также наружной рекламы и информации ряда крупнейших застройщиков. В качестве объекта исследования выступили новостройки от различных застройщиков, действующих на территории Москвы и Московской области.

При подготовке статьи использованы такие методы, как наблюдение, описание, опрос, количественно-статистический анализ, сравнительно-сопоставительный анализ, структурный анализ, семантико-стилистический анализ, частотный анализ, метод аналогии и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При изучении названий, применяемых для ЖК, выставленных на рынок в Москве либо недавно проданных, авторы выявили ряд закономерностей.

В названиях жилых комплексов нередко встречаются названия мест застройки: «Западное Тушино», «Речной». В последние два десятилетия популярность приобрели названия с использованием англицизмов. Как правило, заимствования присутствуют в названиях ЖК сегментов «Комфорт+» и «Премиум». Так, появились комплексы City Sky, River, Residence, House, De Luxe. В названии ЖК часто встречаются русско-английские комбинации, например Фили City, Клубный дом Smolensky, ЖК Barkli Park, ЖК WellHouse на Ленинском, Chekhov, Bunin, White Khamovniki.

Были проанализированы предложения застройщиков Москвы и Московской области, выставивших на продажу наибольшее количество квартир (табл. 1).

¹ Macmillan Dictionary and Thesaurus: Free English Dictionary Online. URL: <http://www.macmillan.dictionary.com/>

Табл. 1. Топ-50 продавцов и застройщиков Москвы и Подмосквья по количеству предложений на рынке и анализ их предложений (составлено авторами²)

Table 1. Top-50 sellers and developers in Moscow and Moscow region according to the quantity of offers in the market and the analysis of their offers (compiled by the authors²)

Компании-застройщики Project developers	Количество квартир, выставленных на продажу по состоянию на 3-й квартал 2023 г. Quantity of apartments offered for sale in the 3rd quarter, 2023	Место в рейтинге популярности Place in popularity rating	Особенности наименований ЖК Features of housing estates naming	
			Русскоязычные Russian-language names	Иноязычные или комбинированные с использованием иностранных слов Foreign-language names or combined names with the use of foreign words
ПИК / PИК	19 186	2	47	3
A101	11 860	7	14	4
Группа «Самолет» “Samolet” Group	8896	Ниже 100 Below 100	29	1

² По данным Новострой-М. URL: <https://www.novostroy-m.ru>

Продолжение табл. 1 / Continuation of the Table 1

Компании-застройщики Project developers	Количество квартир, выставленных на продажу по состоянию на 3-й квартал 2023 г. Quantity of apartments offered for sale in the 3rd quarter, 2023	Место в рейтинге популярности Place in popularity rating	Особенности наименований ЖК Features of housing estates naming	
			Русскоязычные Russian-language names	Иноязычные или комбинированные с использованием иностраннных слов Foreign-language names or combined names with the use of foreign words
ГК ФСК / FSK GC	4361	19	30	14
Группа ЛСР / LSR Group	3379	15	7	4
МИЦ / MIC	3326	17	10	7
MR Group / MR Group	2790	3	13	2
Донстрой / Donstroy	1606	1	9	6
ГК «Гранель» / “Granel” GC	1601	6	26	12
Level Group	1445	4	4	11
Главстрой / Glavstroy	1441	Ниже 100 Below 100	15	4
ГК «Основа» / “Osнова” GC	1376	39	7	11
Кортрос ГК / Kortros GC	1343	12	7	6
Seven Suns Development	1106	45	4	1
INGRAD	1062	Ниже 100 Below 100	18	12
Sminex-Интеко Sminex-Inteko	1039	16	9	21
РосЕвроСити / RosEuroCity	1027	Ниже 100 Below 100	3	0
Группа «Эталон» “Etalon” Group	1009	5	33	20
DOGMA	935	62	0	1
СЗ Стройком 1 SD Stroycom 1	795	52	1	0
Профи-Инвест / Profi-Invest	788	13	6	5
Концерн «Русич» Concern “Rusich”	734	41	3	0
3-RED	720	32	9	1
Концерн «КРОСТ» Concern “KROST”	705	9	9	17
Спутник / Sputnik	664	Ниже 100 Below 100	1	0
Абсолют Недвижимость Absolut Real Estate	648	8	7	1
AFI Development	636	10	2	9
ООО СЗ ГАРАНТ-ИНВЕСТ LLC SD GARANT-INVEST	630	60	1	0
РГ — Девелопмент RG — Development	628	34	12	2
АО «Центр-Инвест» JSC “Centre-Invest”	559	28	6	7
ООО «СЗ Град Домодедово» LLC “SD Grad Domodedovo”	535	Ниже 100 Below 100	1	0
FORMA	533	11	0	6
Специализированный застройщик «Аверус» Specialized developer “Averus”	527	Ниже 100 Below 100	1	0
ТехноСтройОлимп TechnoStroyOlymp	460	Ниже 100 Below 100	6	3
Capital Group	448	78	14	18
СИТИ21 / CITY21	427	21	5	7
ГК Пионер / Pioneer GC	398	18	3	20
Группа Родина Rodina Group	361	51	2	1

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Компании-застройщики Project developers	Количество квартир, выставленных на продажу по состоянию на 3-й квартал 2023 г. Quantity of apartments offered for sale in the 3rd quarter, 2023	Место в рейтинге популярности Place in popularity rating	Особенности наименований ЖК Features of housing estates naming	
			Русскоязычные Russian-language names	Иноязычные или комбинированные с использованием иностранных слов Foreign-language names or combined names with the use of foreign words
ООО «Минские холмы» LLC “Minsk Hills”	348	Ниже 100 Below 100	0	1
СЗ Инвест Групп / SD Invest Group	323	Ниже 100 Below 100	2	0
ДМ Холдинг / DM Holding	311	Ниже 100 Below 100	2	0
Apsis Globe (Апсис Глоб) Apsis Globe (Apsis Globe)	300	Ниже 100 Below 100	1	1
ООО «ТКС Риэлти» LLC “TKS Realty”	297	Ниже 100 Below 100	1	0
RDI (АрДиАй) / RDI	288	14	5	0
КомфортИнвест ComfortInvest	285	Ниже 100 Below 100	0	1
ТЕКТА GROUP	271	74	3	12
IKON-Development	265	42	2	1
Regions Development	258	Ниже 100 Below 100	2	1
Messier Group	242	Ниже 100 Below 100	0	1
St Michael	226	Ниже 100 Below 100	1	1

Анализ предложений 50 крупнейших застройщиков демонстрирует активное использование иноязычных названий или комбинированных с использованием иностранных слов (табл. 1, рис. 2), и нередко именно те, кто пользуется этим инструментом, выигрывают в рейтинге популярности у покупателей. Причем застройщик «Донстрой», который многие свои новостройки позиционирует как элитные, активно применяет эффектные языковые образы и обогнал по популярности у покупателей даже такого гиганта, как ПИК.

Тенденции в нейминге в сфере жилищного строительства в РФ таковы, что из 50 застройщиков,

предлагающих в настоящее время наибольшее количество квартир на продажу, 30 выбрали в качестве своего названия либо иноязычное слово, либо комбинацию русских и иностранных слов. 256 жилых комплексов, представленных на рынке недвижимости (т.е. 39,4 % от общего объема предложений застройщиков), носят иноязычное либо комбинированное название [19].

Замечено, что зачастую цены на квартиры в ЖК, которые не отличаются ни выгодным расположением, ни выигрышным видом из окон, ни удачным окружением (парки, исторические объекты, достопримечательности, культурные объекты и др.), ни развитой



Рис. 2. Соотношение числа застройщиков, использующих русскоязычные и иностранные (комбинированные) названия своих компаний (а), и числа русскоязычных и иностранных (комбинированных) названий объектов (б)

Fig. 2. Ratio of quantity of the developers using Russian names and foreign (combined) names of their companies (a), and quantity of Russian names and foreign (combined) names of objects (b)

инфраструктурой, практически приближаются к цене в ЖК, расположенных в более престижных районах города, но не имеющих выигрышных названий.

Другой пример — аналогичные в архитектурно-планировочном аспекте и по расположению на карте города ЖК стоят дороже, если в их название входят иноязычные слова, претендующие на изысканность, элитарность. Некоторые сравнения показаны на рис. 3 в менее престижных районах.

Строго говоря, группа «ПИК», ввиду масштабов своей деятельности, могла бы быть исключена из статистического анализа при изучении данной тенденции, однако и среди объектов этого застройщика есть определенные закономерности: например, 1 м² в комплексе с претенциозным названием ЖК Vangarden (м. Аминьевская, ЗАО) стоит 466 087 руб., в аналогичном по качеству строительного объекта ЖК «Большая Очаковская 2» (м. Аминьевская) — 432 146 руб., а 1 м² в ЖК «Новое Очаково» (м. Аминьевская, станция D4 Очаково) — всего 380 450 руб. (рис. 4).

Как видно на рис. 5, расположение перечисленных ЖК примерно равноценное: в застроенных многоэтажными домами кварталах, довольно далеко от парков. Культурных объектов, крупных торговых

или торгово-развлекательных центров, спортивных комплексов в непосредственной близости не имеется. Зато в изучаемом районе расположены завод ЖБИ, Очаковский завод ЖБК, производство термопластичных композиционных полимерных материалов НПП «Полипластик», склады (в том числе склад металла), несколько автосервисов.

Обеспеченность транспортной инфраструктурой (наличие автодорог, доступность общественного транспорта) у изучаемых ЖК примерно одинаковая (табл. 2).

Как видно из рис. 5 и табл. 2, только более низкую цену жилья в ЖК «Новое Очаково» еще можно попытаться объяснить с точки зрения транспортной доступности (ЖК проигрывает по удаленности от станции м. Аминьевская, что, впрочем, компенсируется близостью станции D4). Но ЖК Vangarden и «Большая Очаковская 2» по отношению к станции Аминьевская находятся в равных условиях. Что касается остановок автобусов, ЖК Vangarden даже проигрывает другим ЖК (16 мин до ближайшей остановки по сравнению с 3–4 мин, маршруты те же, что и рядом с ЖК «Новое Очаково», один маршрут совпадает с проходящим мимо

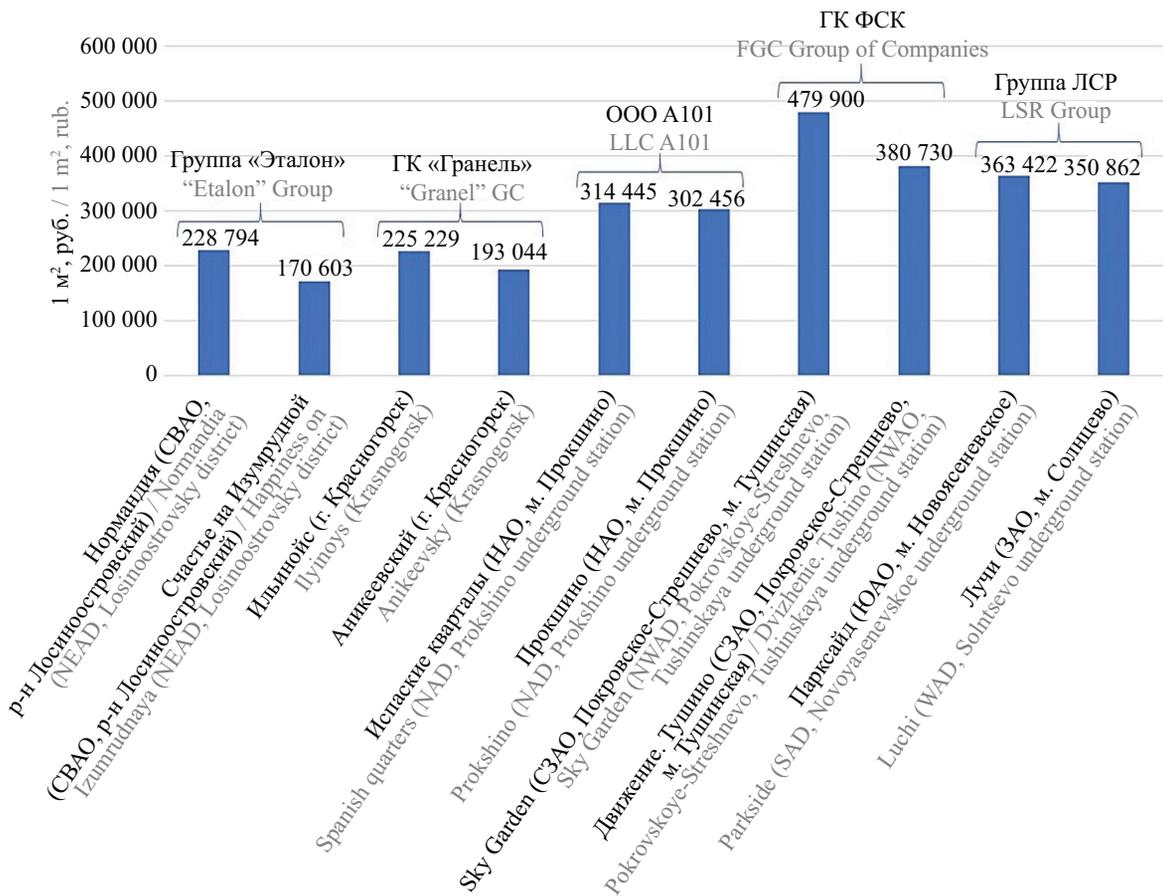


Рис. 3. Стоимость квартир в некоторых жилых комплексах с русскоязычными и иностранными (комбинированными) названиями (составлено авторами)

Fig. 3. The cost of apartments in some housing estates with the Russian-language names and foreign (combined) names (compiled by the authors)

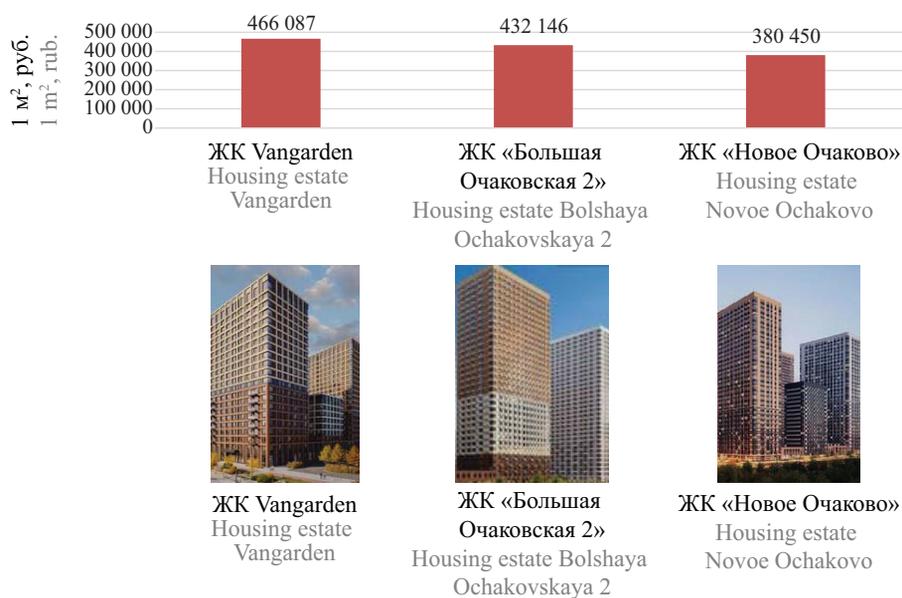


Рис. 4. Сравнение трех предложений Группы «ПИК» (составлено авторами)

Fig. 4. Comparison of three offers of the “PIK” Group (compiled by the authors)

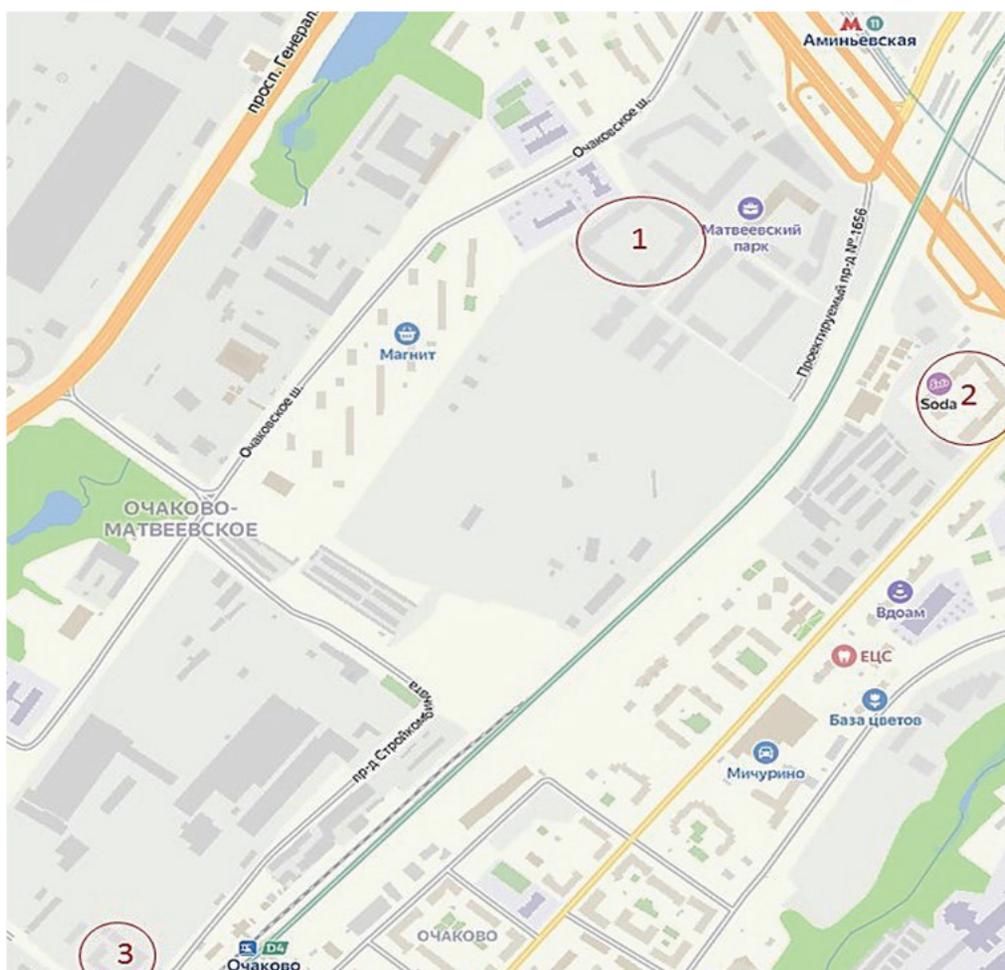


Рис. 5. Расположение трех ЖК группы «ПИК»: 1 — ЖК Vangarden; 2 — ЖК «Большая Очаковская 2»; 3 — ЖК «Новое Очаково»

Fig. 5. Location of three housing estates of the “PIK” group: 1 — Vangarden; 2 — Bolshaya Ochakovskaya 2; 3 — New Ochaково

Табл. 2. Доступность общественного транспорта для жилых комплексов группы «ПИК» (составлено авторами)

Table 2. Availability of public transport for the housing estates of the “PIK” group (compiled by the authors)

Жилые комплексы Housing estates	Наземный транспорт Land transport		Метро (МЦК, МЦД) Underground (MCC, MCD)	
	маршруты routes	до ближайшей остановки, мин to the next stop, min	станции stations	до ближайшей станции, мин to the next stop, min
Vangarden Vangarden	11, 807, c17	16	Аминьевская Aminyevskaya	8
Большая Очаковская 2 Bolshaya Ochakovskaya 2	120, 329, c17	3	Аминьевская Aminyevskaya	10
Новое Очаково New Ochakovo	11, 807, c17	4	Аминьевская Aminyevskaya	20
			D4 Очаково D4 Ochakovo	5

ЖК «Большая Очаковская 2»). Таким образом, очевидных и бесспорных преимуществ у ЖК Vangarden нет и его завышенная цена обусловлена англоязычным названием.

В современных условиях город не располагает существенными незастроенными территориями, а те немногочисленные места, где можно застроить точно, не будут нуждаться в дополнительной рекламе посредством англицизмов. В таких случаях названия ЖК говорят сами за себя: «Титул на Серебряничной», «Лаврушинский», «Софийский» и пр. Жилье такого уровня высоко ценится на рынке недвижимости, например 1 м² в ЖК «Лаврушинский» (Москва, ЦАО, район Якиманка) стоит от 1 750 467 руб.

Для новых ЖК, расположенных на периферии города или в области, наличие в названии слов «парк», «река», «набережная» становится ключевым. Использование этих слов является с точки зрения маркетинга беспроектным, что оказывает соответствующее влияние и на ценообразование: цена 1 м² в ЖК «Белый мыс» (г. Мытищи) — 232 750 руб., в ЖК «Город в лесу» (г. Красногорск, Московская область) — 275 601 руб., в ЖК «Зеленый парк» (административный округ Зеленоград) — 330 000 руб., в ЖК «Ривер Парк Коломенское» (г. Москва, ЮАО) — 410 000 руб., в ЖК «Остров» (Терехово, СЗАО Москвы) — 503 336 руб. и т.д.

Начиная рекламную кампанию, маркетологи дифференцируют ЖК, а именно выделяют признак, отличающий их дом от ряда подобных. Такими дифференцирующими признаками могут стать элементы, присутствующие в инфраструктуре комплекса. Использование в рекламе ЖК словосочетаний «клубный дом», «lounge зона», «плей-хаб» относит данное строение в ранг элитного жилья несмотря на то, что оно не является таковым по планировке или типу здания и расположено в спальных районах, вблизи окружной дороги и даже за пределами Москвы. Например, у застройщика «Донстрой» на рынке представлено два объекта: ЖК «Сим-

вол» (м. Римская, внутри старой кольцевой линии, ЮВАО) по цене 438 129 руб. за 1 м² и клубный дом «Река» (м. Мичуринский, пр-т Большой кольцевой линии, район Раменки, ЗАО, до МКАД 12 мин на автомобиле) по цене 826 023 руб. за 1 м². Потенциальным покупателям ЖК «Река» презентуется как место, где «живут те, кто понимает ценность однородного социального окружения», а также как одно из самых экологически чистых мест столицы со множеством парков и заповедников, с видом на природный парк у реки. Жилье в ЖК «Река» позиционируется как элитное.

На анализе предложений элитного (или псевдо-элитного) жилья следует остановиться подробнее.

Если исходить из того, что анализ продуктовых границ рынка применяет подход Джоан Робинсон [18], который предполагает выбор конкурентного товара и выявление всех его заменителей по цепочке, то разрыв в цепи товаров, являющихся взаимозаменяемыми, формирует границы рынка или его сегмента. В таком случае надо признать, что рынок истинно элитного жилья отличается низкой степенью взаимозаменяемости объектов или отсутствием заменителей [20], а также относительной дефицитностью в связи с ограниченностью площадей.

В случае с элитным жильем разрыв цепи заменителей и достижение границы рынка происходит тогда, когда жилье не соответствует определенным признакам элитарности или располагается за пределами определенной территории (например, ЦАО в Москве, исторические районы, набережные, экологические зоны в городе и т.д.). Теоретически можно рассматривать возможность замены одного объекта элитной недвижимости другим объектом, но тогда возникает вопрос: до какого момента можно заменить одно жилье другим? Маловероятно, что покупатель, нацеленный на приобретение элитного жилья в Москве, готов переключиться на элитную недвижимость в Одинцово, Клину, Солнечногорске, Подольске или других городах Московской области. В подобной ситуации существуют «издержки пере-

езда», «психологические издержки», а также имеется расположение рабочего места, доступность различного рода благ на территории проживания.

При этом стоит добавить, что рассматриваемая категория жилья — элитное жилье — в границах территориального образования априори не может быть заменена другой, поскольку типовое жилье, жилье комфорт- и бизнес-класса не идентичны по уровню элитному жилью как по качеству, так и по уровню издержек. Если рассматривать рынок недвижимости в рамках строительства многоквартирного жилья в целом, например в Москве, то здесь не так много истинно элитной недвижимости, причем не все элитные новостройки находятся в пределах «старой» Москвы³.

На этой почве перспективен такой ход, как рекламное позиционирование ЖК как «элитного» с помощью языковых образов. В рекламном проспекте ЖК AFI TOWER (застройщик AFI Development), расположенный в районе Ботанического сада, представлен как «культовый небоскреб», в котором застройщики большое внимание уделяют развитой инфраструктуре. Так, в небоскребе есть пространство для «твоей приватной и тотальной безопасности», «место для самопознания и ухода от лишнего внимания», «спасе для рабочего процесса и чистого удовольствия от процесса», «пространство для интересов и зона для снятия стресса», «lounge-зона с кинопросмотром». Все перечисленные дифференциальные особенности, безусловно, выделяют этот жилой комплекс в своем сегменте, что сказывается на ценообразовании: 1 м² в ЖК AFI TOWER (монолитно-кирпичный дом бизнес-класса, потолки 3 м, чистовая отделка помещений) выставлен на продажу за 393 750 руб., в то время как 1 м² в аналогичной квартире в ЖК «Сильвер» того же застройщика, расположенном в том же районе Ботанического сада (монолитно-кирпичный дом бизнес-класса, потолки 3,1 м, чистовая отделка помещений, закрытая территория, охрана), стоит 363 235 руб. При этом в комплексе ЖК AFI TOWER, сдача которого запланирована на 2024 г., уже продано 582 квартиры из 1215 (48 %), а в комплексе «Сильвер», сданном в 2019 г., квартиры все еще не распроданы.

Подобное позиционирование жилых комплексов как престижных, современных и даже прогрессивных соответствует последним исследованиям⁴, предсказывающим, что в скорой перспективе должно наступить преобразование всего отечественного рынка недвижимости в систему mixed-use — многофункциональных комплексов, которые должны удовлетворять все потребности человека будуще-

го [21]. Заимствованное понятие mixed-use (дословно означающее «смешанное использование») в современном строительстве предполагает в одном объекте комбинацию не менее трех функций комплекса: жилую, торговую и деловую. Жилая зона (квартиры/апартаменты) должна будет совмещаться с рабочей (коворкинг/офисы), рекреационной (плейхаб, воркаут-площадка), бытовыми услугами (барбершоп, салон красоты, прачечная, клининговые услуги), торговой (весь спектр) и минимальными складами для оперативной доставки заказов. Причем торговая часть комплекса должна быть представлена не просто продуктовым отделом, а в идеале значительным пространством с отделами одежды и обуви, спортивными, хозяйственными товарами, аптеками, предприятиями общественного питания и т.д. Жителям обеспечивается возможность посетить магазин, кафе, получить бытовую услугу в «тапочковой» доступности от квартиры, а также арендовать офис в одном из ближайших зданий и организовать там свое рабочее пространство. Застройщики подчеркивают, что их цель — сократить для жителей необходимость передвижения по городу, ведь все нужное расположено в доме или в непосредственной близости.

Соответственно эксперты прогнозируют, что жилая недвижимость будет цениться только при наличии разнообразной инфраструктуры. Далее можно ожидать отказ от оценки недвижимости в зависимости от квадратных метров в пользу формирования цен согласно принципу space-as-a-service (речь идет о полном комплексе услуг и практически отдельном обслуживании в квартире/апартаментах) [22, 23].

Нередко на рынке жилой недвижимости встречаются и синонимичные словосочетания, но одно написано по-русски, другое — по-английски. Так, чистовая отделка и white box означает, по сути, одно и то же: шпатлевание поверхности перегородочных стен, стяжку полов, прокладку труб водоснабжения, разводку электрических кабелей. Надпись white box в рекламном проспекте действует на потенциальных покупателей сильнее и убедительнее, создает более привлекательное впечатление и никак не предполагает банального дословного перевода «белая коробка». Разница в восприятии сказывается и на ценообразовании: так, например, жилье с чистовой отделкой в районе м. Хорошевская (САО) обойдется покупателю за 1 м² 301 310 руб.⁵, а жилье примерно той же категории, находящееся в районе м. Давыдково (ЗАО), т.е. на той же Большой кольцевой линии метро, но несколько дальше от центра города, но при этом представленное как white box, выставлено по цене за 1 м² 401 315 руб.⁶ (рис. 6).

⁵ Группа компаний «МонАрх». URL: <https://mon-arch.ru/projects/apart-otel-aist-residence>

⁶ Новостройки, ЖК с отделкой white-box в Москве. URL: <https://realty.ya.ru/moskva/kupit/novostrojka/white-box/>

³ Топ-10 самых успешных застройщиков Москвы (по данным на 30 апреля 2020 г.) // Портал элитной недвижимости «Элитное.ру». URL: <https://elitnoe.ru/magazines/454-uspeshnye-developery-moskvy-2020>

⁴ PwC. Новые тенденции на рынке недвижимости 2020. URL: <https://www.pwc.ru/publications/etre/etre-2020.pdf>



Рис. 6. Сравнение двух предложений на рынке: с чистовой отделкой и white box
 Fig. 6. Comparison of two offers in the market: with "final finishing" and "white box"

Жилье за пределами Москвы также вызывает большой интерес у покупателей, оно представлено на рынке недвижимости по более высоким ценам, благодаря своим звучным названиям и использованию иноязычных слов для обозначения помещений и площадок, например в предлифтовой зоне, названной холлом, устанавливаются лапкомойки для собак.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В современных условиях маркетологи, работающие на рынке жилой недвижимости, не могут полагаться на стабильный платежеспособный спрос населения. Они должны применять все новые и новые приемы, причем не только традиционного характера, но и заимствованные из смежных наук: психологии экономики (психологии потребителя), PR и даже психолингвистики.

Сегодня маркетологи, работающие в инвестиционно-строительной сфере, выстраивают свою программу по продажам, генерируют общую идею на основе выбранных отличительных инфраструктурных атрибутов.

Почему так важно применение дифференцированных атрибутов?

Использование «громких» отличительных объектов инфраструктуры соотносится с психологией потребления. Покупка жилья — это прохождение клиентом психологического этапа, начинающегося от проявления интереса к конкретному объекту, затем желания его приобрести и, как логическое завершение, — приобретение выбранной жилой площади [24–26]. Вот почему маркетологи уделяют такое пристальное внимание к названиям даже элементарной отделки перегородочных стен. Слушая об особенностях инфраструктуры ЖК, потребитель воспринимает

сначала внешний облик слова, а потом осознает его значение, а это с точки зрения психологии снижает контролируемые эмоциональные действия и подталкивает к определенным действиям. Анализируя отзывы владельцев квартир элитных клубных домов, можно сказать, что жильцы практически никогда не пользуются местами для самопознания или зонами для снятия стресса, а lounge-зону не рассматривают как место для кинопросмотров или приема личных гостей. Однако языковые образы в описании и рекламе жилых объектов работают и способствуют быстрым и высокодоходным продажам.

Аналогичная ситуация складывается с ЖК, названия которых эксплуатируют иностранные слова. В психологии потребителя срабатывает давно укоренившийся и довольно распространенный стереотип: иностранное — значит более высокого качества, что создает предпосылки для завышенных цен на жилье с иноязычными и/или комбинированными названиями.

В этом плане названия объектов, языковые средства рекламы и информации можно считать эффективным маркетинговым манипулятором, который позволяет продвигать на рынке даже те объекты недвижимости, которые не имели бы объективных конкурентных преимуществ [27]. Проведенные исследования позволяют говорить о том, что среди факторов, позитивно либо стабильно влияющих на первичный рынок жилой недвижимости в Москве, Новой Москве и Московской области, немаловажную роль играют маркетинг и реклама, включая и работу над языковым образом выставленных на продажу ЖК [28–32].

С другой стороны, выявленные подходы к позиционированию и рекламе жилья порождает тен-

денции к асоциализации и даже своего рода анклавному [33, 34]. Элитарность, избранность ЖК и представление их как space-as-a-service оборачивается значительной независимостью и изолированностью их обитателей от внешнего мира. Действительно, в начале XXI в. все чаще стали появляться и набирать популярность закрытые жилищные комплексы, в которых размещают всю необходимую инфраструктуру. На закрытой территории некоторых

ЖК есть частные дошкольные образовательные учреждения, магазины, рестораны, кафе, спортивные залы. Считается ли, что закрытое пространство элитных ЖК представляет собой место взаимоотношений людей, имеющих одинаковый социальный статус? Если это так, то можно вести речь не просто о маркетинговом ходе, а об изменении парадигмы в жилищном строительстве и развитии новой урбанистической философии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Сидакова Н.В.* Употребление иностранных слов в русском языке: логика речи или дань моде? // Балтийский гуманитарный журнал. 2016. Т. 5. № 4 (17). С. 111–114. EDN XUVFOV.
2. *Хруцкий В.Е., Корнеева И.В.* Современный маркетинг: настольная книга по исследованию рынка. М. : Финансы и статистика, 2002. 527 с.
3. *Юданов А.Ю.* Конкуренция: теория и практика. М. : Гном и Д, 2001. 304 с.
4. Маркетинг в строительстве / под ред. И.С. Степанова, В.Я. Шайтанова. М. : Юрайт-М, 2003. 44 с.
5. *Котлер Ф.* Основы маркетинга / пер. с англ. В.Б. Боброва. М. : Прогресс, 1991. 733 с.
6. *Кныш М.И.* Конкурентные стратегии. СПб., 2000. 284 с.
7. *Еремин В.Н.* Маркетинг: основы и маркетинг информации. М. : КНОРУС, 2014. 648 с.
8. *Tomat G.M.* Real estate market // Financial Markets Efficiency and Economic Behaviour. 2023. Pp. 111–132. DOI: 10.1007/978-3-031-36836-3_8
9. *Робинсон Дж.* Экономическая теория несовершенной конкуренции / пер. с англ. М. : Прогресс, 1986. 471 с.
10. *Porter M.* Competitive strategy: Techniques for analyzing industries and competitors. N. Y. : Free Press, 1980. 396 p.
11. *Березин И.С.* Маркетинговый анализ. Принципы и практика. Российский опыт. М. : ЭКСМО, 2002. 389 с.
12. *Дейк ван Т.* Дискурс и власть: репрезентация доминирования в языке и коммуникации. М. : Либроком, 2014. 344 с.
13. *Крысин Л.П.* Иноязычные слова в современном русском языке. М. : Наука, 1968. 208 с.
14. *Крысин Л.П.* Иноязычное слово в контексте современной общественной жизни // Русский язык конца XX столетия. М. : Просвещение, 1996. С. 142–161.
15. *Брейтер М.А.* Англицизмы в русском языке: история и перспективы : пособие для иностранных студентов-русистов. М. : Диалог-МГУ, 1997. 156 с.
16. *Новиков В.И.* Словарь модных слов: языковая картина современности. М. : АСТ-Пресс, 2016. 352 с.
17. *Розенталь Д.Э.* Практическая стилистика русского языка. 5-е изд., исп. и доп. М. : Высшая школа, 1987. 399 с.
18. *Ахутина Т.В.* Психология, лингвистика и междисциплинарные связи. М. : Смысл, 2008. 391 с.
19. *Оленина О.А., Ступникова Е.А., Кузьминов В.В.* Основные тенденции и перспективы развития рынка жилой и коммерческой недвижимости в России // Журнал прикладных исследований. 2021. № 6–5. С. 479–485. DOI: 10.47576/2712-7516_2021_6_5_479. EDN GYLINX.
20. *Перский Ю.К., Катаева Ю.В.* Исследование организационно-продуктовой специфики рынка жилищного строительства // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. 2010. № 3 (6). С. 49–58. EDN OUIJTL.
21. *Положенцева Ю.Н., Салиховская А.С., Серeda М.А.* Анализ российского рынка элитной недвижимости и перспективы его развития // Скиф. Вопросы студенческой науки. 2020. № 11 (51). С. 45–54. EDN KCZZKA.
22. *Princy A.J.* A Concise Outlook on the Space as a Service Concept: Its Advantages and Challenges. 2022. URL: <https://www.researchdive.com/blog/a-concise-outlook-on-the-space-as-a-service-concept-its-advantages-and-challenges>
23. *Arndt J.* Toward a concept of domesticated markets // Journal of Marketing. 1979. Vol. 43. Issue 4. Pp. 69–75. DOI: 10.1177/002224297904300408
24. *Leibenstein H.* Individual behavior and economic outcome (Book Reviews: beyond economic man. A new foundation for microeconomics) // Science. 1976. DOI: 10.2307/2231480
25. *Алешина И.В.* Паблик Рилейшнз для менеджеров и маркетеров. М. : Гном-пресс, 1997. 255 с.
26. *Гусева М.Н., Коготкова И.З.* Маркетинг строительного бизнеса. М. : Ассоциация профессионального образования, 2009. 200 с.
27. *Васильева Е.Ю.* Инновации в жилищном строительстве РФ // Сметно-договорная работа в строительстве. 2022. № 12. С. 40–45. DOI: 10.33920/str-01-2212-07. EDN MNMKEY.
28. *Trinh T.H.* Theoretical foundations of real estate market behavior // Cogent Business & Management.

2022. Vol. 9. Issue 1. DOI: 10.1080/23311975.2022.2132590

29. Шпангель Ф.Ф. Рынок недвижимого имущества: общая характеристика, новые объекты недвижимости, круг субъектов посреднической деятельности // Теория и практика общественного развития. 2023. № 9 (185). С. 140–144. DOI: 10.24158/tpor.2023.9.19. EDN LDUETW.

30. Tao Y., Guo Z., Shan Z., Ye M., Xu Y. Explore the password of the current real estate market // Frontiers in Humanities and Social Sciences. 2022. Vol. 2. Issue 11. Pp. 123–128. DOI: 10.54691/fhss.v2i11.2793

31. Лидовская О. Оценка эффективности маркетинга и рекламы. Готовые маркетинговые решения. СПб. : Питер, 2008. 294 с.

32. Satpati A. An exploratory study on consumer preferences and priorities in the real estate market of Ahmedabad district // International Journal of Management Public Policy and Research. 2023. Vol. 2. Issue 4. Pp. 80–87 DOI: 10.55829/ijmpr.v2i4.192

33. Даниелян М.Г., Васильева Е.Ю., Давлетов И.Х. Необоснованные заимствования в метаязыке государственного управления в строительстве // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 988–1001. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.988-1001

34. Awad T., Guardiola J., Jiménez M., González-Lezcano R.A. Sustainability in construction, housing, and the city // Advances in Religious and Cultural Studies. 2023. Pp. 163–184. DOI: 10.4018/978-1-6684-6924-8.ch008

Поступила в редакцию 28 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 30 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 10 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Юрьевна Васильева — кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента и инноваций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 702671, Scopus: 57192662530. ResearcherID: AAD-1693-2019, ORCID: 0000-0001-7797-1954; elena.chibisova_metr@mail.ru;

Мери Георгиевна Даниелян — кандидат филологических наук, доцент, заведующий кафедрой русского языка как иностранного; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 308030, Scopus: 5865814100, ResearcherID: AAE-4329-2022, ORCID: 0000-0002-0585-8765; DanielyanMG@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Васильева Е.Ю. — сбор материала, написание статьи, научное редактирование и оформление статьи.

Даниелян М.Г. — идея, сбор материала, написание статьи, научное редактирование статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Sidakova N.V. The use of foreign words in the Russian language: the logic of speech or a tribute to fashion? *Baltic Humanitarian Journal*. 2016; 5(4):111-114. EDN XUVFOV. (rus.).

2. Hrutsky V.E., Korneeva I.V. *Modern marketing: the reference book on the market research*. Moscow, Finance and statistics Publ., 2002; 527. (rus.).

3. Yudanov A.Yu. *Competition: theory and practice*. Moscow, Gnome and D Publ., 2001; 304. (rus.).

4. *Marketing in construction* / Under the editorship of I.S. Stepanov, V.Ya. Shaytanov. Moscow, Yurayt-M Publ., 2003; 44. (rus.).

5. Kotler F. *Marketing fundamentals*. Moscow, Progress Publ., 1990; 736. (rus.).

6. Knysh M.I. *Competitive strategy*. St. Petersburg, 2000; 284. (rus.).

7. Eremin V.N. *Marketing: fundamentals and marketing of information*. Moscow, KNORUS Publ., 2014; 648. (rus.).

8. Tomat G.M. Real Estate Market. *Financial Markets Efficiency and Economic Behaviour*. 2023; 111-132. DOI: 10.1007/978-3-031-36836-3_8

9. Robinson J. *Economic theory of imperfect competition*. Moscow, Progress Publ., 1986; 471. (rus.).

10. Porter M. *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*. N. Y., Free Press, 1980; 396.

11. Berezin I.S. Marketing analysis. Principles and practice. *Russian experience*. Moscow, Eksmo Publ., 2002; 389. (rus.).

12. Dijk van T. *Discourse and power: representation of domination in language and communication*. Moscow, Publishing house Librok, 2014; 344. (rus.).

13. Krysin L.P. *Foreign-language words in modern Russian*. Moscow, Nauka Publ., 1968; 208. (rus.).

14. Krysin L.P. *Foreign-language word in the context of modern public life. Russian of the end of the XX century*. Moscow, Education Publ., 1996; 142-161. (rus.).

15. Breyter M.A. *Anglicisms in Russian: history and prospects: grant for foreign students specialists in Russian philology*. Moscow, Dialog-MSU Publ., 1997; 156. (rus.).
16. Novikov V.I. *Dictionary of fashionable words: language picture of the present*. Moscow, AST-Press Publ., 2016; 352. (rus.).
17. Rosenthal D.E. *Practical stylistics of Russian. The 5th edition corrected and added*. Moscow, Higher School, 1987; 399. (rus.).
18. Akhutina T.V. *Psychology, linguistics and cross-disciplinary communications*. Moscow, Sense Publishing House, 2008; 391. (rus.).
19. Olenina O.A., Stupnikova E.A., Kuzminov V.V. Main trends and prospects for the development of the residential and commercial real estate market in Russia. *The Journal of Applied Research*. 2021; 6-5:479-485. DOI: 10.47576/2712-7516_2021_6_5_479. EDN GYLINX. (rus.).
20. Persky Yu.K., Katayeva Yu.V. Research of organizational-and-product specifics of the housing construction market. *Perm University Herald. Economy*. 2010; 3(6):49-58. EDN OUJTBL. (rus.).
21. Polozhentseva Y.N., Salikhovskaya A.S., Sereda M.A. Analysis of the Russian luxury estate market and its development prospects. *Sciif. Questions of Student Science*. 2020; 11(51):45-54. EDN KCZZKA. (rus.).
22. Princy A.J. *A Concise Outlook on the Space as a Service Concept: its Advantages and Challenges*. 2022. URL: <https://www.researchdive.com/blog/a-concise-outlook-on-the-space-as-a-service-concept-its-advantages-and-challenges> (rus.).
23. Arndt J. Toward a concept of domesticated markets. *Journal of Marketing*. 1979; 43(4):69-75. DOI: 10.1177/002224297904300408
24. Leibenstein H. Individual behavior and economic outcome (Book reviews: beyond economic man. A new foundation for microeconomics). *Science*. 1976. DOI: 10.2307/2231480
25. Alyoshina I.V. *Public relations for managers and marketer*. Moscow, Gnom-Press Publ., 1997; 255. (rus.).
26. Guseva M.N., Kogotkova I.Z. *Marketing of construction business*. Moscow, Association of professional education, 2009; 200. (rus.).
27. Vasilyeva E.Yu. Innovations in housing construction in the Russian Federation. *Estimate and Contractual Work in Construction*. 2022; 12:40-45. DOI: 10.33920/str-01-2212-07. EDN MNMKEY. (rus.).
28. Trinh T.H. Theoretical foundations of real estate market behavior. *Cogent Business & Management*. 2022; 9(1). DOI: 10.1080/23311975.2022.2132590
29. Shpanagel F.F. Real estate market: general characteristics, new real estate objects, the range of subjects of intermediary activity. *Theory and Practice of Social Development*. 2023; 9(185):140-144. DOI: 10.24158/tipor.2023.9.19. EDN LDUETW. (rus.).
30. Tao Y., Guo Z., Shan Z., Ye M., Xu Y. Explore the password of the current real estate market. *Frontiers in Humanities and Social Sciences*. 2022; 2(11):123-128. DOI: 10.54691/fhss.v2i11.2793
31. Lidovskaya O. Efficiency evaluation of marketing and advertizing. *Ready marketing decisions*. St. Petersburg, Peter Publ., 2008; 294. (rus.).
32. Satpati A. An exploratory study on consumer preferences and priorities in the real estate market of Ahmedabad district. *International Journal of Management Public Policy and Research*. 2023; 2(4):80-87 DOI: 10.55829/ijmpr.v2i4.192
33. Daniyelyan M.G., Vasilyeva E.Yu., Davletov I.H. Unreasonable borrowings in the metalanguage of public administration of the construction industry. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(6):988-1001. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.988-1001 (rus.).
34. Awad T., Guardiola J., Jiménez M., González-Lezcano R.A. Sustainability in construction, housing, and the city. *Advances in Religious and Cultural Studies*. 2023; 163-184. DOI: 10.4018/978-1-6684-6924-8.ch008

Received November 28, 2023.

Adopted in revised form on November 30, 2023.

Approved for publication on December 10, 2023.

BIONOTES: **Elena Yu. Vasilyeva** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Management and Innovations; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 702671, Scopus: 57192662530, ResearcherID: AAD-1693-2019, ORCID: 0000-0001-7797-1954; elena.chibisova_metr@mail.ru;

Mary G. Daniyelyan — Candidate of Philological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Russian as a Foreign Language; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 308030, Scopus: 5865814100, ResearcherID: AAE-4329-2022, ORCID: 0000-0002-0585-8765; DaniyelyanMG@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Elena Yu. Vasilyeva — material collecting, writing of the article, scientific editing and formatting of the article.

Mary G. Daniyelyan — idea, material collecting, writing of the article, scientific editing of the article.

The authors declare no conflict of interests.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

*если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициал

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (a , b и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «**Вклад авторов:**» (**Contribution of the authors:**). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже

известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить пункты прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников **на английском языке (reference)** оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupurev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип Статьи

Тип статьи - научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т. п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

*если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

*если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи – на английском языке

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указы-

вают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательнее раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Вклад авторов:

Фамилия И.О. - описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С. С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)
 7 7 1 6 1 0 3 3 9 1 (ИНН получателя платежа) 0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0 (номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО (наименование банка получателя платежа) БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО 4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
 подписка на январь, февраль, март, апрель,
 май, июнь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О. _____

плательщика _____

Адрес _____

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)
 7 7 1 6 1 0 3 3 9 1 (ИНН получателя платежа) 0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0 (номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО (наименование банка получателя платежа) БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО 4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
 подписка на январь, февраль, март, апрель,
 май, июнь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О. _____

плательщика _____

Адрес _____

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безоплатательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

