

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал  
по строительству и архитектуре

Том 17 Выпуск 6/2022  
Vol. Issue

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction  
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 17. Выпуск 6  
2022**

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

Сквозной номер 163

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 17. Issue 6  
2022**

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

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

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

## Тематические рубрики

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

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Наименование органа, зарегистрировавшего издание:</b>                            | Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).<br>Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.                                                                                                                                       |
| <b>ISSN</b>                                                                         | 1997-0935 (Print)<br>2304-6600 (Online)                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Периодичность:</b>                                                               | 12 раз в год                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Учредители:</b>                                                                  | Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ),<br>129337, Москва, Ярославское ш., д. 26;<br>Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ»,<br>129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1. |
| <b>Выходит при научно-информационной поддержке:</b>                                 | Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН),<br>Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Издатель:</b>                                                                    | ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ<br>129337, Москва, Ярославское ш., д. 26.<br>Сайт: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a><br>E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>                                                          |
| <b>Типография:</b>                                                                  | Типография Издательства МИСИ – МГСУ<br>129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8.<br>Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Сайт журнала:</b>                                                                | <a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>E-mail:</b>                                                                      | <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Тел.:</b>                                                                        | (495) 287-49-14, доб. 23-93                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Подписка и распространение:</b>                                                  | Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке.<br>Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989.<br>Цена свободная.                                                                                                                                                                              |
| <b>Подписан в печать</b>                                                            | 27.06.2022.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Подписан в свет</b>                                                              | 30.06.2022.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 18,48. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 176 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

## Главный редактор

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

## Заместители главного редактора

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

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

## Редакционная коллегия

**Павел Алексеевич Акимов**, д-р техн. наук, проф., академик РААСН, ректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

**Александр Тевьетевич Беккер**, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., директор инженерной школы, 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, Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

**Александр Михайлович Белостоцкий**, д-р техн. наук, проф., академик РААСН, научный руководитель Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова, НИУ МГСУ, Москва, Россия

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

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

**Николай Иванович Ватин**, д-р техн. наук, проф., проф., Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Йозеф Вичан**, д-р, проф., Университет Жилина, Словацкая Республика

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Левон Рафазлович Маилян**, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., проф. каф. автомобильных дорог, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

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

**Андрей Будимирович Пономарев**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

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

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

**Владимир Николаевич Сидоров**, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН, зав. каф. информатики и прикладной математики, НИУ МГСУ, Москва, Россия

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

## Редакция журнала

**Выпускающий редактор:** Анна Александровна Дядичева

**Редактор:** Татьяна Владимировна Бердникова

**Корректор:** Оксана Валерьевна Ермихина

**Дизайн и верстка:** Ольга Григорьевна Горюнова

**Перевод на английский язык:** Ольга Валерьевна Юденкова

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

## Председатель редакционного совета

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

## Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

**Александр Витальевич Гинзбург**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

**Олег Васильевич Кабанцев**, д-р техн. наук, доц., директор научно-технических проектов, проф. 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**, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительной механики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Российская Федерация

**Рашид Абдуллович Мангушев**, д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. каф. геотехники, Федеральное государ-

ственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

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

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

**Владимир Ильич Травуш**, д-р техн. наук, проф., академик и вице-президент РААСН, зам. генерального директора-главный конструктор, ЗАО «Горпроект», Москва, Российская Федерация

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

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

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

**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 <sup>MGSU</sup>

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

|                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ISSN</b>                                                                  | 1997-0935 (Print)<br>2304-6600 (Online)                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Publication Frequency:</b>                                                | Monthly                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Founders:</b>                                                             | 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;<br>Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337. |
| <b>The Journal enjoys the academic and informational support provided by</b> | The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)                                                                                                                                                                                           |
| <b>Publisher:</b>                                                            | 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<br>Website: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a><br>E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>    |
| <b>Printing House:</b>                                                       | Printing house of the Publishing house MISI – MGSU<br>building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337<br>tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.                                                                                                                                                                      |
| <b>Website journal:</b>                                                      | <a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>E-mail:</b>                                                               | <a href="mailto:vestnikmgsu@mgsu.ru">vestnikmgsu@mgsu.ru</a> , <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Subscription:</b>                                                         | Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Signed for printing:</b>                                                  | 27.06.2022                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

## Editor-in-Chief

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

## Deputy Editor-in-Chief

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

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

## Editorial Board

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

**Piotr Banaszuk**, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Roode Liias**, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

**Miroslav Premrov**, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

**Josef Vichan**, University of Zilina, Slovak Republic

**Joost Walraven**, Delft University of Technology, Netherlands

**Zbigniew Wojcicki**, Wrocław University of Technology, Republic of Poland

## Editorial team of issues

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

**Editor:** *Tat'yana V. Berdnikova*    **Layout:** *Alina G. Aleynikova*

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

## Chairman of the Editorial Board

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

## Editorial Council

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

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

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

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

**Natalya N. Fedorova**, Professor, Leading research scientist, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

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

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

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

**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

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

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

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

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

# СОДЕРЖАНИЕ

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

*М.Н. Кирсанов, О.В. Свириденко, Е.В. Комерзан*

**Частота собственных колебаний мачты с произвольным числом панелей. . . . . 685**

*В.В. Надольский, А.И. Вихляев*

**Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки. . . . . 693**

## СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*А.О. Шанин, А.А. Баранов, Е.В. Жбанова, Н.С. Емельчикова*

**Исследование влияния различных типов цемента на физико-химические свойства автоклавного газобетона. . . . . 707**

*М.В. Баранников, И.В. Поляков, Л.А. Виноградова, В.С. Поляков*

**A multifunctional additive for heavy concretes  
(Многофункциональная добавка для тяжелого бетона). . . . . 720**

## ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

*Н.А. Анискин, А.М. Шайтанов*

**Натурный эксперимент по тепловыделению бетона и использование его результатов для верификации программного комплекса «ANSYS». . . . . 727**

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*О.А. Продоус, Д.И. Шлычков, П.П. Якубчик, С.В. Пархоменко*

**Влияние толщины слоя внутренних отложений в трубопроводах систем водоснабжения и водоотведения на продолжительность периода их остаточной эксплуатации. . . . . 738**

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*С.В. Федосов, А.А. Липидус, В.Н. Федосеев, А.М. Соколов*

**Перспективы использования тепловых насосов для тепловой обработки бетона в полевых условиях . . . . 747**

*Б.Л. Ефремян, В.С. Канхва*

**Перераспределение приоритетов в управлении рисками в жилищном строительстве в условиях последствий внешних шоков . . . . . 756**

*Н.Г. Верстина, О.Ф. Цуверкалова*

**Современное состояние инновационной деятельности регионов РФ . . . . . 769**

*Н.Н. Щепкина*

**Инновационный подход к организации внутреннего аудита строительных предприятий . . . . . 790**

*Т.С. Мещерякова, Е.С. Зуева*

**Механизм ГЧП при реализации инновационных проектов строительства и реконструкции объектов федерального имущественного комплекса . . . . . 803**

*Ю.О. Бакрунов, Е.Ю. Васильева*

**Внедрение инновационных технологий в управление строительной и специальной техникой . . . . . 813**

**Требования к оформлению научной статьи . . . . . 823**

# CONTENTS

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

*Mikhail N. Kirsanov, Olesya V. Sviridenko, Evgeny V. Komerzan*

**The natural frequency of a mast with an arbitrary number of panels . . . . . 685**

*Vitali V. Nadolski, Alexey I. Vikhlyayev*

**Using the finite element method to evaluate the load-bearing capacity of beams with a corrugated web  
subjected to local loading . . . . . 693**

## CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

*Aleksander O. Shanin, Aleksandr A. Baranov, Elena V. Zhbanova, Natalia S. Emel'chikova*

**An investigation of the influence of various types of cement on the physicochemical properties  
of autoclaved aerated concrete . . . . . 707**

*Mikhail V. Barannikov, Igor' V. Polyakov, Lyubov' A. Vinogradova, Vyacheslav S. Polyakov*

**A multifunctional additive for heavy concretes. . . . . 720**

## HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

*Nikolai A. Aniskin, Alexey M. Shaytanov*

**A full-scale study on the thermal emissivity of concrete and application of its findings to verify ANSYS  
software package . . . . . 727**

## ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

*Oleg A. Prodous, Dmitriy I. Shlychkov, Petr P. Jakubchik, Sergey V. Parkhomenko*

**Influence of the thickness of the layer of internal deposits in pipelines of water supply and discharge systems  
on their remaining service life . . . . . 738**

## TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

*Sergey V. Fedosov, Azariy A. Lapidus, Vadim N. Fedoseev, Alexander M. Sokolov*

**Prospects of using heat pumps for the thermal treatment of concrete in the field . . . . . 747**

*Boris L. Efremyan, Vadim S. Kankhva*

**Redistribution of risk management priorities in the housing construction sector under the conditions  
of external shocks. . . . . 756**

*Natalia G. Verstina, Olga F. Tsuverkalova*

**Current state of innovative activities in the Russian regions . . . . . 759**

*Natalia N. Shchepkina*

**Innovative approach to the organization of internal audit of construction enterprises . . . . . 790**

*Tatyana S. Meshcheryakova, Elena S. Zueva*

**The mechanism of public — private partnerships for the implementation of innovative projects entailing  
the construction and reconstruction of items of federal property. . . . . 803**

*Yuri O. Bakrunov, Elena Yu. Vasilyeva*

**Implementation of innovative technologies in control of the construction and special equipment . . . . . 813**

**Requirements for research paper design . . . . . 823**

## 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);
- 2.1.7. 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);
- 05.02.22. Организация производства (по отраслям) (технические науки);
- 05.23.07. Гидротехническое строительство (технические науки);
- 05.23.16. Гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);
- 08.00.05. Экономика — управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (экономические науки).

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

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

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

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

## AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04:531.391.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.685-692

## Частота собственных колебаний мачты с произвольным числом панелей

Михаил Николаевич Кирсанов, Олеся Вячеславовна Свириденко,  
Евгений Владиславович Комерзан

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»  
(НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Объектом исследования является пространственная модель статически определимой мачтовой фермы, состоящей из четырех одинаковых плоских ферм с перекрестной системой решетки и основания с четырьмя опорами по углам. Решается задача вывода аналитической зависимости низшей частоты колебаний мачтовой фермы от числа панелей, массы, линейных размеров ее конструкции и свойств материала.

**Материалы и методы.** С целью расчета значений усилий в стержнях мачтовой фермы с произвольным числом панелей и анализа полученных результатов использован метод индукции и операторы системы компьютерной математики Maple. Задача вывода аналитической зависимости низшей частоты колебаний мачтовой фермы от ее параметров решена с помощью метода Донкерлея, который дает нижнюю оценку собственной частоты. Жесткость конструкции фермы рассчитана по формуле Максвелла – Мора. Выведены и решены однородные линейные рекуррентные уравнения для вычисления общих членов последовательностей коэффициентов в формуле для частоты. Для обобщения ряда частных решений применен метод индукции, реализованный в системе компьютерной математики Maple, используемый для ферм с последовательно увеличивающимся числом панелей  $n$ .

**Результаты.** Получена формула для оценки первой частоты собственных колебаний фермы. Коэффициенты формулы имеют вид полиномов не выше четвертого порядка. Точность расчетной формулы, полученной с использованием метода Донкерлея, оценивается сравнением с первой частотой, полученной численным расчетом всего спектра собственных частот.

**Выводы.** Анализ аналитических результатов и их сравнение с численными показывает хорошую точность выведенной формулы. С увеличением числа панелей мачтовой фермы точность нижней оценки собственной частоты растет.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** мачтовая ферма, первая частота собственных колебаний, метод Донкерлея, нижняя оценка собственной частоты, метод индукции, жесткость конструкции, точность оценки, формула Максвелла – Мора

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-21-00473).

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кирсанов М.Н., Свириденко О.В., Комерзан Е.В. Частота собственных колебаний мачты с произвольным числом панелей // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 685–692. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.685-692

**Автор, ответственный за переписку:** Михаил Николаевич Кирсанов, kirsanovmn@mpei.ru.

## The natural frequency of a mast with an arbitrary number of panels

Mikhail N. Kirsanov, Olesya V. Sviridenko, Evgeny V. Komerzan

National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI); Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The article addresses a spatial model of a statically definable mast truss consisting of four identical planar trusses with a crosswise grid system and a base with four supports at the corners. The authors solve the problem of deriving the analytical dependence between the bottom vibration frequency of the mast truss and the number of panels, mass, linear dimensions of its construction and properties of the material.

**Materials and methods.** To calculate the values of forces, arising in the rods of a mast truss with an arbitrary number of panels, and analyze the obtained results, the induction method and operators of the Maple computer system for mathematics were used. The problem of deriving the analytical dependence between the bottom frequency of vibrations of the mast truss and its parameters is solved using the Dunkerley method, which generates the bottom estimate of the natural frequency.

The rigidity of the truss structure is calculated according to the Maxwell – Mohr formula. To calculate the common members of sequences of coefficients, homogeneous linear recurrent equations are derived and solved in the frequency formula.

**Results.** A formula is obtained for estimating the first frequency of natural vibrations of a truss. The formula coefficients have the form of polynomials of no higher than the fourth order. The accuracy of the calculation formula, obtained using the Dunkerley method, is estimated by the comparison with the first frequency, obtained through the numerical calculation of the entire spectrum of natural frequencies.

**Conclusions.** The analysis of the analytical results and their comparison with the numerical ones shows high accuracy of the derived formula. The authors have identified a dependence, whereby an increase in the number of mast truss panels boosts the accuracy of the bottom estimate of the natural frequency.

**KEYWORDS:** mast truss, first natural frequency, Dunkerley method, bottom natural frequency estimate, induction method, structural rigidity, estimation accuracy, Maxwell – Mohr formula

**Acknowledgements:** The project obtained the financial support from the Russian Science Foundation (Project No. 22-21-00473).

**FOR CITATION:** Kirsanov M.N., Sviridenko O.V., Komerzan E.V. The natural frequency of a mast with an arbitrary number of panels. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):685-692. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.685-692 (rus.).

*Corresponding author:* Mikhail N. Kirsanov, kirsanovmn@mpei.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Необходимой составляющей любого динамического расчета является частотный анализ конструкций. В настоящее время для расчета собственных частот обычно используют численные методы [1–3]. Когда требуется только первая (основная) частота для определения эксплуатационных характеристик механической системы, рассчитывать весь спектр частот нецелесообразно. С развитием средств автоматизации и, в частности, систем компьютерной математики [4], появилась возможность получать аналитическое выражение для первой частоты в зависимости от размеров, массы и свойств материала конструкции. В ряде источников [5–8] приведены зависимости для вычисления жесткости некоторых плоских статически определимых ферм. На базе этих формул строятся решения задач о частотах собственных колебаний. Точный расчет частот собственных колебаний особенно актуален при сейсмическом анализе зданий и сооружений [9–11].

В аналитических расчетах собственных частот в основном используют два типа решений. Чаще всего применяют полуэмпирические или приближенные формулы. Например, для расчета частоты колебаний балочной фермы используют метод эквивалентной жесткости конструкции [12]. Для этого жесткость фермы приравнивают к жесткости эквивалентной балки, собственную частоту которой определяют методами сопротивления материалов. Следующий тип решения относится к регулярным конструкциям с периодической структурой, в частности к фермам. В этом случае с помощью метода индукции можно получить решения для целого класса конструкций путем ввода в качестве параметра количества элементов периодичности, например числа панелей или стержней. Если исследуемая конструкция статически определимая, то аналитическое решение имеет вид относительно простой формулы [8, 13]. Результаты изучения проблемы существования статически определимых регулярных стержневых структур приведены в трудах Р.Г. Хатчинсона, Н.А. Флека [14, 15]

и Ф.В. Зока, Р.М. Латтюрэ, М.Р. Бегли [16]. Предлагаемые аналитические решения могут быть применены для решения задач оптимизации [17, 18], а также для предварительной оценки свойств проектируемых конструкций.

В данной работе поставлены следующие задачи:

- разработать математическую модель статически определимой мачтовой фермы;
- составить алгоритм вывода аналитического решения задачи о первой частоте собственных колебаний, справедливого для любого числа панелей;
- сопоставить аналитическое решение с численным.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Модель мачтовой фермы состоит из  $n$  панелей, высотой  $(n + 1/2)h$  (рис. 1). Каждая панель имеет длину  $a$  и высоту  $h$  (рис. 1, 2). Моделирование выполнено в системе компьютерной математики Maple, графическое представление модели — в программе 3d Max 2016.

Опоры фермы представлены сферическим соединением в узле  $A$ , цилиндрическим соединением в узле  $B$  и двумя стойками в узлах  $C$  и  $D$ . Исследуемая конструктивная схема является внешне статически неопределимой. Невозможно рассчитать реакции опор отдельно от усилий в стержнях. Общее количество стержней в конструкции, включая стержни, моделирующие опоры, составляет  $q = 12n + 15$ . Инерционные свойства фермы задаются одинаковыми сосредоточенными массами, расположенными во всех узлах ферменной конструкции, за исключением четырех опор.

Поставлена задача получить аналитическую оценку зависимости нижней частоты собственных колебаний фермы от количества панелей. Решение выполнено в предположении, что массы в узлах колеблются вдоль оси  $y$ . Следовательно, число степеней свободы рассматриваемой модели ферменной конструкции равно  $N = 4n + 1$ . Жесткость конструкции

установлена по формуле Максвелла – Мора в предположении упругих деформаций стержней фермы. Полагаем, что семь стержней, которые моделируют опоры, — жесткие. Усилия в узлах фермы и реакции опор найдены из общей системы уравнений равновесия в проекциях на оси координат. Матрица системы уравнений равновесия включает направляющие косинусы сил, значения которых получены на основе сведений о координатах узлов и структуре соединений стержней. Координаты узлов при нумерации снизу вверх имеют вид:

$$\begin{aligned} x_{4i-3} &= x_{4i} = y_{4i-3} = y_{4i-2} = 0, \\ z_{4i-3} &= z_{4i-2} = z_{4i-1} = z_{4i} = h(i-1), \\ x_{4i-2} &= x_{4i-1} = y_{4i-1} = y_{4i} = a, \\ i &= 1, \dots, n+1. \end{aligned}$$

Для ввода данных о порядке соединения стержней конструкции в узлах осуществлена нумерация граничных точек векторов, разработаны и использованы их упорядоченные списки. В правой части системы уравнений равновесия узлов найдены значения внешних сил. В рассматриваемой задаче это единичные силы, направленные вдоль оси  $y$ . Решение системы уравнений позволило получить аналитические выражения для усилий, используемых при определении жесткости конструкции. Для обобщения ряда частных решений применен метод индукции, реализованный в системе компьютерной математики Maple, используемый для ферм с последовательно увеличивающимся числом панелей  $n$ .

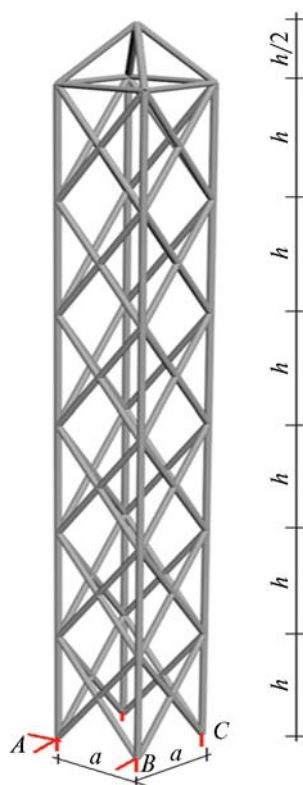


Рис. 1. Модель фермы,  $n = 6$

Fig. 1. Truss model,  $n = 6$

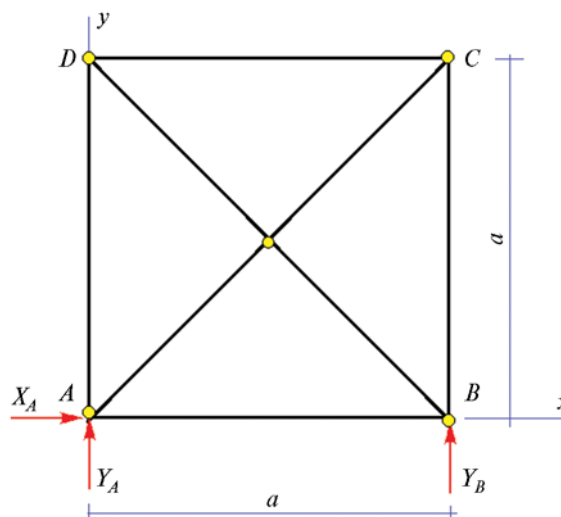


Рис. 2. Размеры фермы

Fig. 2. Truss dimensions

Система дифференциальных уравнений колебаний точечных масс в узлах фермы представлена в матричном виде:

$$\mathbf{M}_N \ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{D}_N \mathbf{Y} = 0, \quad (1)$$

где  $\mathbf{M}_N$  — диагональная матрица инерции размера  $N \times N$ ;  $\ddot{\mathbf{Y}}$  — вектор ускорений масс;  $\mathbf{D}_N$  — матрица жесткости;  $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$  — вектор всех смещений масс вдоль оси  $y$ . В случае одинаковых масс матрица инерции пропорциональна единичной матрице  $\mathbf{M}_N = m\mathbf{I}_N$ . Обозначим  $\mathbf{B}_N$  матрицу податливости, обратную матрице жесткости  $\mathbf{D}_N = \mathbf{B}_N^{-1}$ . Ее элементы определяются по формуле Максвелла – Мора:

$$b_{i,j} = \sum_{\alpha=1}^{q-7} S_{\alpha}^{(i)} S_{\alpha}^{(j)} l_{\alpha} / (EF), \quad (2)$$

где  $S_{\alpha}^{(i)}$  — усилие в стержне  $\alpha$  от действия единичной горизонтальной силы, действующей на узел  $i$  в направлении оси  $y$ ;  $l_{\alpha}$  — длина стержня  $\alpha$ ;  $EF$  — жесткость стержней. Предполагается, что семь опорных стержней не деформируются, и суммирование с использованием формулы Максвелла – Мора (2) к ним не применяется.

Усилия в стержнях нашли с помощью программного пакета символьных вычислений Maple [19].

Умножив равенство (1) на матрицу  $\mathbf{B}_N$  и приняв во внимание соотношение  $\ddot{\mathbf{Y}} = -\omega^2 \mathbf{Y}$ , справедливое для гармонических колебаний вида  $y_k = u_k \sin(\omega t + \varphi_0)$ , задачу сведем к задаче о собственных значениях матрицы  $\mathbf{B}_N$ :  $\mathbf{B}_N \mathbf{Y} = \lambda \mathbf{Y}$ , где  $\lambda = 1/(m\omega^2)$  — собственное значение матрицы  $\mathbf{B}_N$ ;  $\omega$  — собственная частота колебаний.

Для приближенного решения задачи о первой частоте использован метод Донкерлея [20, 21]. Нижняя оценка первой частоты колебаний найдена по формуле:

$$\omega_D^{-2} = \sum_{k=1}^N \omega_k^{-2}, \quad (3)$$

где  $\omega_k$  — частота колебаний одной массы  $m$ , расположенной в узле  $k$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Уравнение колебаний (1), записанное для одной массы, имеет скалярную форму:  $m\ddot{y}_k + d_k y_k = 0$ , где  $\ddot{y}_k$  — вектор ускорения;  $d_k$  — коэффициент жесткости;  $y_k$  — смещение массы. Следовательно, частота колебаний нагрузки равна  $\omega_k = \sqrt{d_k / m}$ . Коэффициент жесткости, обратный коэффициенту податливости, определяется по формуле Максвелла – Мора:

$$\delta_k = 1 / d_k = \sum_{\alpha=1}^N \left( \tilde{S}_{\alpha}^{(k)} \right)^2 l_{\alpha} / (EF), \quad \text{где } \tilde{S}_{\alpha}^{(k)} \text{ — усилие}$$

в стержне  $\alpha$  от действия единичной вертикальной силы, приложенной к узлу, где расположена масса с номером  $k$ . В соответствии с формулой Донкерлея (3):

$$\omega_D^{-2} = m \sum_{k=1}^N \delta_k = m \Delta_n. \quad (4)$$

Выполняя расчеты, получаем общую форму решения:

$$\Delta_n = (C_{1,n}a^3 + C_{2,n}c^3 + C_{3,n}g^3 + C_{4,n}h^3) / (a^2EF), \quad (5)$$

где  $c = \sqrt{a^2 + h^2}$ ;  $g = \sqrt{2a^2 + h^2}$ . Последовательно рассчитывая ряд ферм с разным числом панелей, получаем формулы:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= (18a^3 + 36c^3 + g^3 + 42h^3) / (8a^2EF), \\ \Delta_2 &= (34a^3 + 136c^3 + g^3 + 300h^3) / (8a^2EF), \\ \Delta_3 &= (50a^3 + 300c^3 + g^3 + 1046h^3) / (8a^2EF), \\ \Delta_4 &= (66a^3 + 528c^3 + g^3 + 2680h^3) / (8a^2EF), \dots \end{aligned}$$

Общие члены полученных последовательностей коэффициентов можно найти с помощью операторов системы компьютерной математики Maple, позволяющей определить рекуррентные уравнения, которым они удовлетворяют. Решение рекуррентных уравнений дает выражения для коэффициентов:

$$\begin{aligned} C_1 &= 2n + 1/4, \\ C_2 &= n(8n + 1)/2, \\ C_3 &= 1/8, \\ C_4 &= n(8n^3 + 20n^2 + 46n - 11)/12. \end{aligned} \quad (6)$$

Погрешность нижней оценки решения (5) с коэффициентами (6) оценивается из сравнения с численным решением задачи о колебании системы с числом степеней свободы  $N$ . Найдены собственные значения матрицы  $\mathbf{B}_N$ . Для этого применен оператор Eigenvalues поиска собственных значений из пакета LinearAlgebra системы Maple. На графике (рис. 3) приведено сравнение кривых зависимости от числа панелей первой частоты  $\omega_1$ , полученных численно,

и  $\omega_D$  по формуле (5) с коэффициентами (6). В решении использованы следующие константы: модуль упругости стали  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа; площадь поперечного сечения стержней  $F = 1,6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>;  $m = 500$  кг; размеры конструкции  $a = 2$  м и  $h = 4$  м. По мере увеличения количества панелей, начиная с некоторого их числа, точность результирующей оценки незначительно возрастает. Это можно видеть на рис. 4, на котором отображена зависимость относительной погрешности  $\varepsilon = (\omega_1 - \omega_D) / \omega_1$  от числа панелей. С увеличением высоты  $h$  точность приближенного решения также, хотя и незначительно, повышается.

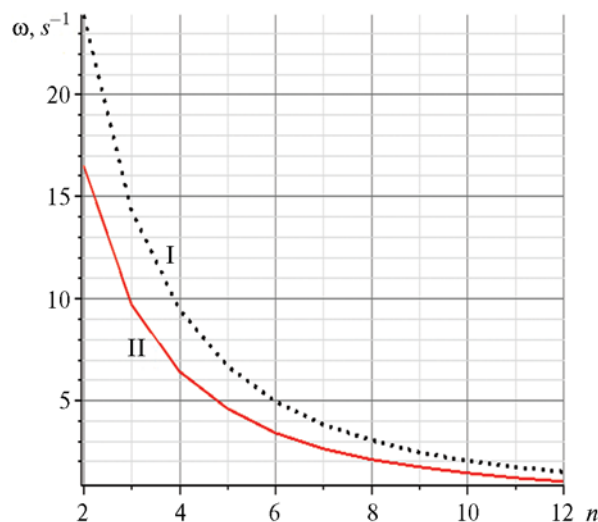


Рис. 3. Сравнение аналитической оценки и численного решения задачи о минимальной частоте: I — численное решение  $\omega_1$ ; II — решение (5) для  $\omega_D$

Fig. 3. Comparison of the analytical estimate and the numerical solution to the minimum frequency problem; I — numerical solution  $\omega_1$ ; II — solution (5) for  $\omega_D$

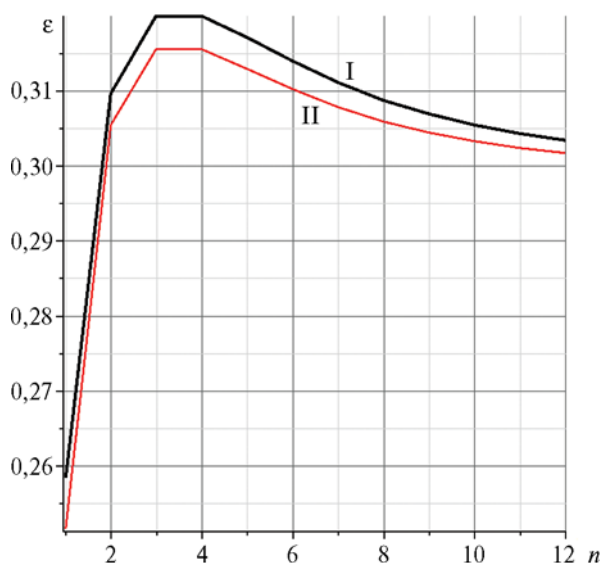


Рис. 4. Погрешности формулы (5): I —  $h = 3$  м; II —  $h = 4$  м  
Fig. 4. An error in formula (5): I —  $h = 3$  m; II —  $h = 4$  m

Оценивая полученный результат, заметим, что, несмотря на хорошее качественное совпадение кривых I и II на рис. 3, количественно точность аналитической оценки по сравнению с аналогичными задачами для плоских ферм [13, 22, 23] существенно хуже, но сопоставима с погрешностью оценки Донкерлея в других пространственных стержневых конструкциях [24]. Общим здесь является только то, что с увеличением числа панелей точность нижней оценки Донкерлея растет. Оценка первой собственной частоты возможна также методом Рэлея [13]. Этот метод дает оценку сверху и большую точность, однако аналитическое решение получается более громоздким.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Получена аналитическая зависимость первой частоты собственных колебаний мачтовой фермы

от количества панелей в предположении, что смещение массы в узлах происходит только в одном горизонтальном направлении. В решении учтена масса грузов в узлах, размеры конструкции и модуль упругости материала стержня. Используемая модель мачтовой фермы представляет собой упрощенную схему реальной конструкции. Введение жестких соединений в узлах вместо шарнирных соединений и добавление горизонтальных соединений позволит сделать конструкцию более жесткой и увеличит первую частоту собственных колебаний фермы. Следовательно, значение полученной с помощью метода Донкерлея формулы для оценки нижней границы частоты колебаний останется актуальным. Такое решение может быть использовано в качестве проверки для оценки численных расчетов, что особенно эффективно для систем с большим числом панелей, когда требуется значительное количество времени для получения частотного спектра.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Roy S., Kundu C.K. State of the art review of wind induced vibration and its control on transmission towers // *Structures*. 2021. Vol. 29. Pp. 254–264. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.11.015
2. Itam Z., Beddu S., Mohd Kamal N.L., Bamashmos K.H. Finite element analysis of the maximum stress at the joints of the transmission tower // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016. Vol. 32. P. 012044. DOI: 10.1088/1755-1315/32/1/012044
3. Shu Q., Huang Z., Yuan G., Ma W., Ye., Zhou J. Impact of wind loads on the resistance capacity of the transmission tower subjected to ground surface deformations // *Thin-Walled Structures*. 2018. Vol. 131. Pp. 619–630. DOI: 10.1016/j.tws.2018.07.020
4. Zotos K. Performance comparison of Maple and Mathematica // *Applied Mathematics and Computation*. 2007. Vol. 188. Issue 2. Pp. 1426–1429. DOI: 10.1016/j.amc.2006.11.008
5. Ilyushin A.S. The formula for calculating the deflection of a compound externally statically indeterminate frame // *Structural Mechanics and Structures*. 2019. No. 3 (22). Pp. 29–38.
6. Ovsyannikova V.M. Dependence of deformations of a trapezous truss beam on the number of panels // *Structural Mechanics and Structures*. 2020. No. 3 (26). Pp. 13–20.
7. Kirsanov M. Trussed frames and arches: Schemes and formulas. Newcastle upon Tyne, GB : Cambridge Scholars Publishing Lady Stephenson Library, 2020. P. 186.
8. Kirsanov M. Planar trusses: Schemes and formulas. Newcastle upon Tyne, GB : Cambridge Scholars Publishing Lady Stephenson Library. 2019. P. 194.
9. Resatalab S., Ahmadi M.T., Alembagheri M. Seismic response sensitivity analysis of intake towers interacting with dam, reservoir and foundation // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. No. 7 (99). P. 9901. DOI: 10.18720/MCE.99.1
10. Vatin N.I., Ivanov A.Yu., Rutman Y.L., Chernogorskiy S.A., Shvetsov K.V. Earthquake engineering optimization of structures by economic criterion // *Magazine of Civil Engineering*. 2017. No. 8. Pp. 67–83. DOI: 10.18720/MCE.76.7
11. Kumar R., Sahoo D.R. Seismic fragility of steel special truss moment frames with multiple ductile vierendeel panels // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021. Vol. 143. P. 106603. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106603
12. Liu M., Cao D., Zhang X., Wei J., Zhu D. Nonlinear dynamic responses of beamlike truss based on the equivalent nonlinear beam model // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 194. P. 106197. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106197
13. Vorobev O.V. Bilateral analytical estimation of the first frequency of a plane truss // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020. No. 92 (7). Pp. 9204–9204. DOI: 10.18720/CUBS.92.4
14. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006. Vol. 54. Issue 4. Pp. 756–782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008
15. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses // *ZAMM*. 2005. Vol. 85. Issue 9. Pp. 607–617. DOI: 10.1002/zamm.200410208

16. Zok F.W., Latture R.M., Begley M.R. Periodic truss structures // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2016. Vol. 96. Pp. 184–203. DOI: 10.1016/j.jmps.2016.07.007

17. Kaveh A., Zolghadr A. Truss optimization with natural frequency constraints using a hybridized CSS-BBBC algorithm with trap recognition capability // Computers & Structures. 2012. Vol. 102–103. Pp. 14–27. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.03.016

18. Ho-Huu V., Vo-Duy T., Luu-Van T., Le-Anh L., Nguyen-Thoi T. Optimal design of truss structures with frequency constraints using improved differential evolution algorithm based on an adaptive mutation scheme // Automation in Construction. 2016. Vol. 68. Pp. 81–94. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.05.004

19. Бука-Вайваде К., Кирсанов М.Н., Сердюк Д.О. Calculation of deformations of a cantileverframe planar truss model with an arbitrary number of panels // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 4. С. 510–517. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517

20. Levy C. An iterative technique based on the Dunkerley method for determining the natural

frequencies of vibrating systems // Journal of Sound and Vibration. 1991. Vol. 150 (1). Pp. 111–118. DOI: 10.1016/0022-460X(91)90405-9

21. Low K.H. A Modified Dunkerley formula for eigenfrequencies of beams carrying concentrated masses // International Journal of Mechanical Sciences. 2000. Vol. 42. Issue 7. Pp. 1287–1305. DOI: 10.1016/S0020-7403(99)00049-1

22. Petrenko V. The natural frequency of a two-span truss // AlfaBuild. 2021. No. 5 (20). DOI: 10.57728/ALF.20.1

23. Петренко В.Ф. Оценка собственной частоты двухпролетной фермы с учетом жесткости опор // Строительная механика и конструкции. 2021. № 4 (31). С. 16–25. DOI: 10.36622/VSTU.2021.31.4.002

24. Kirsanov M.N. Deformations and spatial structure vibrations frequency of the rectangular contour type cover: Analytical solutions // Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. No. 5 (98). P. 9805. DOI: 10.4123/CUBS.98.5

Поступила в редакцию 23 апреля 2022 г.

Принята в доработанном виде 31 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 31 мая 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Михаил Николаевич Кирсанов** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин; **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»);** 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; SPIN-код: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFwAAAAJ, IstinaresearcherID: 2939132; kirsanovmn@mpei.ru;

**Олеся Вячеславовна Свириденко** — кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин; **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»);** 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; SPIN-код: 7086-7641, Scopus: 57205083629, ORCID: 0000-0001-6799-5311; SviridenkoOV@mpei.ru;

**Евгений Владиславович Комерзан** — кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин; **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»);** 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; SPIN-код: 5940-0488, Scopus: 57205083504, ORCID: 0000-0001-5920-1366; KomerzanYV@mpei.ru.

Вклад авторов:

Кирсанов М.Н. — научное руководство, разработка схемы фермы, написание программы, вычисление коэффициентов.

Свириденко О.В. — оформление текста, проверка формул.

Комерзан Е.В. — оформление текста, проверка формул.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Roy S., Kundu C.K. State of the art review of wind induced vibration and its control on transmission towers. Structures. 2021; 29:254-264. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.11.015

2. Itam Z., Beddu S., Mohd Kamal N.L., Bamashmos K.H. Finite element analysis of the maxi-

mum stress at the joints of the transmission tower. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016; 32:012044. DOI: 10.1088/1755-1315/32/1/012044

3. Shu Q., Huang Z., Yuan G., Ma W., Ye S., Zhou J. Impact of wind loads on the resistance capacity of the transmission tower subjected to ground surface

deformations. *Thin-Walled Structures*. 2018; 131:619-630. DOI: 10.1016/j.tws.2018.07.020

4. Zotos K. Performance comparison of Maple and Mathematica. *Applied Mathematics and Computation*. 2007; 188(2):1426-1429. DOI: 10.1016/j.amc.2006.11.008

5. Ilyushin A.S. The formula for calculating the deflection of a compound externally statically indeterminate frame. *Structural Mechanics and Structures*. 2019; 3(22):29-38.

6. Ovsyannikova V.M. Dependence of deformations of a trapezous truss beam on the number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 3(26):13-20.

7. Kirsanov M. *Trussed frames and arches: Schemes and formulas*. Newcastle upon Tyne, GB, Cambridge Scholars Publishing Lady Stephenson Library, 2020; 186.

8. Kirsanov M. *Planar trusses: Schemes and formulas*. Newcastle upon Tyne, GB, Cambridge Scholars Publishing Lady Stephenson Library, 2019; 194.

9. Resatalab S., Ahmadi M.T., Alembagheri M. Seismic response sensitivity analysis of intake towers interacting with dam, reservoir and foundation. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 7(99):9901. DOI: 10.18720/MCE.99.1

10. Vatin N.I., Ivanov A.Yu., Rutman Y.L., Chernogorskiy S.A., Shvetsov K.V. Earthquake engineering optimization of structures by economic criterion. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 8:67-83. DOI: 10.18720/MCE.76.7

11. Kumar R., Sahoo D.R. Seismic fragility of steel special truss moment frames with multiple ductile vierendeel panels. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021; 143:106603. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106603

12. Liu M., Cao D., Zhang X., Wei J., Zhu D. Nonlinear dynamic responses of beamlike truss based on the equivalent nonlinear beam model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021; 194:106197. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106197

13. Vorobev O.V. Bilateral analytical estimation of the first frequency of a plane truss. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020; 92(7):9204-9204. DOI: 10.18720/CUBS.92.4

14. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006; 54(4):756-782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008

15. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses. *ZAMM*. 2005; 85(9):607-617. DOI: 10.1002/zamm.200410208

16. Zok F.W., Latture R.M., Begley M.R. Periodic truss structures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2016; 96:184-203. DOI: 10.1016/j.jmps.2016.07.007

17. Kaveh A., Zolghadr A. Truss optimization with natural frequency constraints using a hybridized CSS-BBBC algorithm with trap recognition capability. *Computers & Structures*. 2012; 102-103:14-27. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.03.016

18. Ho-Huu V., Vo-Duy T., Luu-Van T., Le-Anh L., Nguyen-Thoi T. Optimal design of truss structures with frequency constraints using improved differential evolution algorithm based on an adaptive mutation scheme. *Automation in Construction*. 2016; 68:81-94. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.05.004

19. Buka-Vaivade K., Kirsanov M.N., Serdjuk D.O. Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(4):510-517. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517

20. Levy C. An iterative technique based on the Dunkerley method for determining the natural frequencies of vibrating systems. *Journal of Sound and Vibration*. 1991; 150(1):111-118. DOI: 10.1016/0022-460X(91)90405-9

21. Low K.H. A Modified Dunkerley formula for eigenfrequencies of beams carrying concentrated masses. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2000; 42(7):1287-1305. DOI: 10.1016/S0020-7403(99)00049-1

22. Petrenko V. The natural frequency of a two-span truss. *AlfaBuild*. 2021; 5(20). DOI: 10.57728/ALF.20.1

23. Petrenko V.F. Estimation of the natural frequency of a two-span truss, taking into account the support stiffness. *Structural Mechanics and Structures*. 2021; 4(31):16-25. DOI: 10.36622/VSTU.2021.31.4.002 (rus.).

24. Kirsanov M.N. Deformations and spatial structure vibrations frequency of the rectangular contour type cover: Analytical solutions. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021; 5(98):9805. DOI: 10.4123/CUBS.98.5

Received April 23, 2022.

Adopted in revised form on May 31, 2022.

Approved for publication on May 31, 2022.

**BIONOTES:** **Mikhail N. Kirsanov** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFWAAAAJ, IstiniaResearcherID: 2939132; kirsanovmn@mpei.ru;

**Olesya V. Sviridenko** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 7086-7641, Scopus: 57205083629, ORCID: 0000-0001-6799-5311; SviridenkoOV@mpei.ru;

**Evgeny V. Komerzan** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 5940-0488, Scopus: 57205083504, ORCID: 0000-0001-5920-1366; KomerzanYV@mpei.ru.

*Authors' contribution:*

*Mikhail N. Kirsanov — scientific guidance, development of a truss scheme, writing a program, calculating coefficients.*

*Olesya V. Sviridenko — text formatting, formula checking.*

*Evgeny V. Komerzan — text formatting, formula checking.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.046 : 624.014

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706

## Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки

Виталий Валерьевич Надольский, Алексей Игоревич Вихляев

Белорусский национальный технический университет (БНТУ); г. Минск, Республика Беларусь

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Стальные балки с гофрированной стенкой все чаще находят практическое применение в промышленном и гражданском строительстве благодаря своей экономичности. Существуют многочисленные исследования, доказывающие преимущества гофрированных балок. Однако вопрос расчета таких элементов в нормативной и технической литературе недостаточно освещен, что является одним из основных факторов, сдерживающих их широкое использование.

**Материалы и методы.** Наряду с применением аналитических зависимостей, которые, как правило, ориентированы на специфический вид гофрирования стенки и имеют ограничения по области экспериментальной подверженности, распространение получают численные методы. Применен метод конечных элементов (КЭ).

**Результаты.** Представлены принципы построения КЭ модели для оценки несущей способности и эксплуатационной пригодности гофрированных балок при действии локальной нагрузки, верифицированные на основании экспериментальных данных. Выполнен анализ влияния параметров КЭ модели и входных переменных на точность и неопределенность результатов моделирования.

**Выводы.** Показано, что использование КЭ моделей позволяет с высокой точностью оценить значение несущей способности и поведение балки с гофрированной стенкой под действием локальной нагрузки. Работа стали оказывает одно из доминирующих влияний на точность КЭ моделей, при этом главное влияние оказывает значение предела текучести, а значения предела прочности и вид диаграммы деформирования имеют сопутствующее влияние. Изменчивость толщины стенки прямо пропорционально воздействует на значение несущей способности. Размер КЭ следует определять из условия сходимости результатов по критериям критической и предельной силы. Наиболее оптимальный размер составляет около 3–5 толщин стенки элемента. Для уменьшения общего количества КЭ рекомендуется использовать локальное сгущение в местах локализации напряжений. Форму эквивалентных геометрических несовершенств предлагается назначать на основании форм упругой потери устойчивости стенки.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** метод конечных элементов, локальная нагрузка, гофрированная стенка, КЭ модель, несовершенства, дискретизация, критическая сила

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за конструктивные замечания и предложения.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Надольский В.В., Вихляев А.И. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706

Автор, ответственный за переписку: Виталий Валерьевич Надольский, Nadolskiv@mail.by.

## Using the finite element method to evaluate the load-bearing capacity of beams with a corrugated web subjected to local loading

Vitali V. Nadolski, Alexey I. Vikhlyayev

Belarusian National Technical University (BNTU); Minsk, Republic of Belarus

### ABSTRACT

**Introduction.** Steel beams with a corrugated web are increasingly frequently applied in industrial and civil engineering due to their cost effectiveness. There are numerous studies proving the advantages of corrugated beams. However, the issue of calculating such elements is insufficiently covered in the standards and engineering literature, which is one of the main factors restraining their widespread use.

**Materials and methods.** Along with the use of analytical dependencies, which, as a rule, are focused on a specific type of web corrugation and have limitations in terms of the area of experimental susceptibility, numerical methods are widely used. The finite element (FE) method is applied in the article.

**Results.** The article presents the principles of constructing a FE model for evaluating the load-bearing capacity and service ability of corrugated beams subjected to local loading (patch loading), verified by using the experimental data. The authors

have analysed the influence of parameters of the FE model and input variables on the accuracy and uncertainty of modeling results.

**Conclusions.** The article shows that the use of FE models allows for a highly accurate evaluation of the load-bearing capacity and the behaviour of a beam with a corrugated web subjected to local loading. The description of the behaviour of steel has one of dominant influences on the accuracy of FE models, while the value of yield strength has a dominant influence; values of ultimate strength and the type of deformation diagram have an auxiliary influence. The variability in the web thickness has a directly proportional effect on the value of the bearing capacity. The size of the finite element should be determined according to the condition of convergence of results against the criteria of critical and ultimate forces. The most optimal size of the finite element is about 3–5 web thicknesses. To reduce the total number of finite elements, it is recommended to use local condensation in areas of stresses. The shape of equivalent geometric imperfections is recommended to be assigned based on the forms of elastic buckling of the web.

**KEYWORDS:** finite element method (FEM), local loading, corrugated web, FE model, imperfections, discretization, critical force

**Acknowledgements:** The authors are grateful to anonymous reviewers for constructive remarks and suggestions.

**FOR CITATION:** Nadolski V.V., Vikhlyaev A.I. Using the finite element method to evaluate the load-bearing capacity of beams with a corrugated web subjected to local loading. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):693-706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706 (rus.).

**Corresponding author:** Vitali V. Nadolski, Nadolskivv@mail.by.

## ВВЕДЕНИЕ

Применение балок с гофрированной стенкой получает все большее распространение в строительстве ввиду экономической эффективности [1, 2], по данной теме выполнены значительные экспериментальные и теоретические исследования [3–7]. Однако разработанные методики расчета, как правило, ориентированы на специфический вид гофрирования стенки и экспериментально верифицированы для ограниченной области использования [8, 9], а нормативные документы<sup>1, 2, 3</sup> не в полной мере отражают требования по проектированию стальных балок с гофрированной стенкой. Сложность развития универсальной методики расчета балок с гофрированной стенкой заключается в зависимости поведения таких балок от вида и параметров гофрирования стенки, что практически невозможно учесть в явном виде при разработке моделей несущей способности. Дополнительным осложняющим фактором является то, что модели содержат параметры, определенные на основании экспериментов, и для оценки несущей способности новых форм или параметров гофрирования необходимо проводить дорогостоящие экспериментальные испытания.

В качестве альтернативного решения можно использовать численные методы, в частности метод конечных элементов (МКЭ). В настоящее время МКЭ широко применяется в исследовательских целях, в которых параметры конечных элементов (КЭ) моделей верифицируются на основании экспериментальных данных, и далее КЭ модели используют для

экстраполяции ограниченных экспериментальных испытаний или тщательного изучения влияния различных параметров конструктивного исполнения и условий нагружения. С целью применения КЭ моделей в практической деятельности при оценке поведения и значений несущей способности можно выделить три ключевые задачи, которые следует решить. Для практического использования, кроме понимания общей идеологии МКЭ, безусловно, более важную роль приобретают конкретные указания по назначению параметров построения КЭ моделей (таких как рекомендации по назначению размера и типа КЭ, диаграмм деформирования стали, формы и величины несовершенств и т.д.), поэтому в качестве первого этапа стоит выделить разработку и унификацию принципов и параметров построения КЭ моделей. Решение этой задачи, в первую очередь, позволит снизить погрешности использования и обеспечит сопоставимость результатов, полученных разными исполнителями. Далее необходимо выполнить оценку точности результатов на основании сравнения с экспериментальными данными [10, 11]. В качестве окончательного этапа требуется определить параметры надежности, в частности коэффициенты надежности, с учетом погрешности КЭ моделей несущей способности, изменчивости базисных переменных, входящих в модель несущей способности и модель эффектов воздействий (усилий) [12].

В качестве объекта исследования приняты балки с гофрированной стенкой. Цель исследования — развитие принципа проектирования стальных конструкций на основании КЭ моделей несущей способности. В рамках настоящей работы основное внимание уделено решению первых двух задач, т.е. разработке унифицированных принципов построения КЭ моделей и определению погрешности КЭ модели путем сравнения экспериментальных и численных результатов. Мотивом к проведению данного исследования послужил тот факт, что в литературе практически отсутствуют работы, посвященные КЭ

<sup>1</sup> СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\* (с Поправками и Изменениями № 1, 2). М.: Стандартинформ, 2017.

<sup>2</sup> СП 5.04.01-2021. Стальные конструкции : введ. 06.10.2021. Минск : Минстройархитектуры, 2021.

<sup>3</sup> EN 1993-1-5. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–5: Plated structural elements. Brussels, Belgium : CEN, 2006.

моделированию балок с гофрированной стенкой, верифицированных на основании экспериментальных сведений. Общие указания можно найти в публикациях [13–16], однако, во всех работах КЭ модели рассмотрены как абсолютно точные и не представлена информация по чувствительности результатов к параметрам модели и их верификация на базе сравнения с результатами экспериментальных исследований [17].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

За основу изучения создания и опыта применения КЭ моделей для оценки поведения и несущей способности тонкостенных сварных балок с гофрированной стенкой положены результаты экспериментальных исследований, опубликованных в работах [18, 19]. Результаты испытания двенадцати балок SP1–SP12 под локальной нагрузкой с разными параметрами по геометрии представлены в публикации [18] (рис. 1, табл. 1). В данном исследовании

осуществлена обширная программа вариации ширины зоны нагружения и толщин полки, что позволило проанализировать разные схемы работы образцов. В одних случаях отказ носил резкий характер, в других случаях наблюдалась значительная стадия пластических деформаций.

Образцы SP1–SP12 выполнены с холодногнутой стенкой толщиной 6 мм и высотой 500 мм, с полками толщиной 20 и 30 мм. Ребра жесткости на обоих концах балок сделаны из такого же стального листа, что и полки, толщиной 20 мм. Внутренний радиус изгиба гофры составлял 60 мм. Нагрузка передавалась на всю ширину полки балки через пластину толщиной 50 мм, различной ширины (90, 200 и 380 мм). Дополнительно были испытаны два образца со штампом 80 × 300 мм, расположенным длинной стороной вдоль балки, при этом в одном эксперименте штамп располагался по центру полки, а в другом с эксцентриситетом 30 мм. Геометрические характеристики всех балок и размеры штампов приведены в табл. 1.

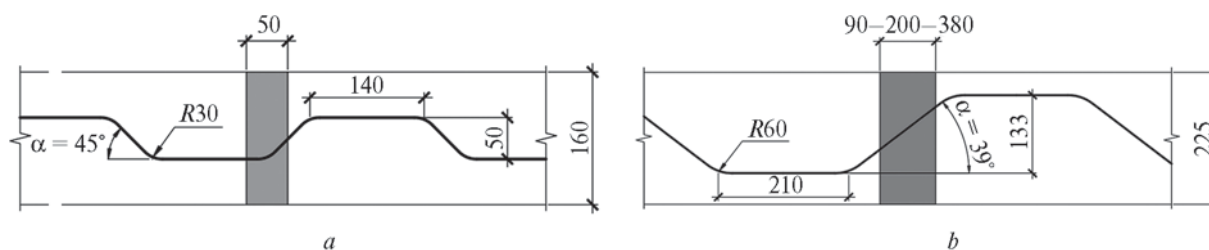


Рис. 1. Геометрические характеристики образцов: *a* — образцы SP1–SP12; *b* — образцы A1–A3, B1–B3

Fig. 1. Geometric characteristics of specimens: *a* — specimens SP1–SP12; *b* — specimens A1–A3, B1–B3

Табл. 1. Геометрические параметры моделируемых балок

Table 1. Geometric parameters of simulated beams

| Образцы<br>Samples | $b_f$ , мм<br>mm | $t_f$ , мм<br>mm | $h_w$ , мм<br>mm | $t_w$ , мм<br>mm | $\alpha$ , ° | $h_{corr}$ , мм<br>mm | $l_{corr}$ , мм<br>mm | $ss$ , мм<br>mm | Зона нагружения<br>Loading zone |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|---------------------------------|
| SP1                | 225              | 20               | 500              | 6                | 39           | 139                   | 210 + 165             | 90              | Диагональная<br>Diagonal        |
| SP2                | 225              | 20               | 500              | 6                | 39           | 139                   | 210 + 165             | 200             | Диагональная<br>Diagonal        |
| SP3                | 225              | 20               | 500              | 6                | 39           | 139                   | 210 + 165             | 90              | Параллельная<br>Parallel        |
| SP4                | 225              | 20               | 500              | 6                | 39           | 139                   | 210 + 165             | 200             | Параллельная<br>Parallel        |
| SP5                | 225              | 30               | 500              | 6                | 39           | 139                   | 210 + 165             | 200             | Параллельная<br>Parallel        |
| SP6                | 225              | 30               | 500              | 6                | 39           | 139                   | 210 + 165             | 200             | Диагональная<br>Diagonal        |
| SP7                | 225              | 20               | 500              | 6                | 39           | 139                   | 210 + 165             | 200             | Параллельная<br>Parallel        |

| Образцы<br>Samples | $b_f$ , мм<br>mm | $t_f$ , мм<br>mm | $h_w$ , мм<br>mm | $t_w$ , мм<br>mm | $\alpha$ , ° | $h_{corr}$ , мм<br>mm | $l_{corr}$ , мм<br>mm | $ss$ , мм<br>mm | Зона нагружения<br>Loading zone |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|---------------------------------|
| SP8                | 225              | 20               | 500              | 6                | 39           | 139                   | 210 + 165             | 380             | Диагональная<br>Diagonal        |
| SP9                | 225              | 30               | 500              | 6                | 39           | 139                   | 210 + 165             | 300 × 80        | Диагональная<br>Diagonal        |
| SP11               | 225              | 20               | 500              | 6                | 39           | 139                   | 210 + 165             | 380             | Параллельная<br>Parallel        |
| SP12               | 225              | 20               | 500              | 6                | 39           | 139                   | 210 + 165             | 90              | Изгиб<br>Bend                   |
| A1, B3             | 160              | 12               | 578              | 3                | 45           | 50                    | 140 + 50              | 50              | Диагональная<br>Diagonal        |
| A2, B2             | 160              | 12               | 578              | 3                | 45           | 50                    | 140 + 50              | 50              | Изгиб<br>Bend                   |
| A3, B1             | 160              | 12               | 578              | 3                | 45           | 50                    | 140 + 50              | 50              | Параллельная<br>Parallel        |

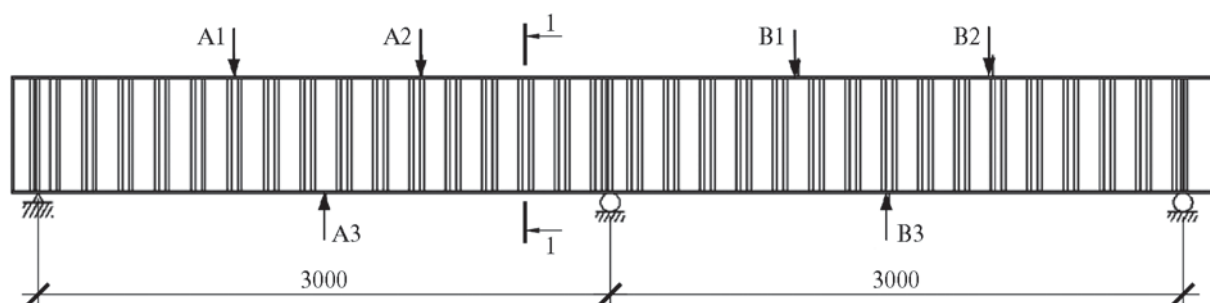


Рис. 2. Варианты нагружений

Fig. 2. Loading options

В работе [19] представлены результаты испытаний на одной балке. Испытания A1, A2, B1 и B2 первоначально проводились на одной стороне балки, затем балку перевернули и выполнили испытания A3 и B3 (рис. 2). Нагружение производилось в определенной части гофры — диагональной (положение A1 и B3), зоне изгиба (A2 и B2), параллельной (A3 и B1) (см. табл. 1). На каждой опоре были установлены вертикальные ребра жесткости. Испытания на одном образце могли оказать влияние на результаты вследствие возможных повышенных начальных несовершенств (искривлений, пластических деформаций) после первых серий испытания, что повышает неопределенность экспериментального значения.

С целью реализации реальных условий нагружения, как и при лабораторных испытаниях, нагрузка на балку передавалась с помощью нагрузочного штампа, передающего усилия на верхнюю полку. Для штампа использовался конечный элемент R3D4. Для достижения взаимодействия между штампом и верхней полкой использована связь «поверхность—

поверхность» с коэффициентом трения 0,3. Поверхность нижней части штампа определялась как ведущая часть (master surface), в то время как верхняя сторона полки определялась как ведомая (slave). Нагрузка на штамп передавалась сконцентрированной силой через референтную точку.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведен сравнительный анализ моделей, состоящих из объемных (solid) и оболочечных (shell) элементов для выбора **типа конечного элемента**. В качестве объемного был выбран трехмерный двадцатиузловой элемент C3D20R, а в качестве оболочечного — четырехузловой КЭ общего назначения S4R. Результаты сравнения графиков зависимости вертикального перемещения нагрузочного штампа  $U_v$  от приложенной нагрузки  $F$  показаны на рис. 3.

Расхождение результатов КЭ моделей из объемных элементов составило более 10 %, а в отдельном случае (A2) больше 15 %. Результаты моделей из плоских элементов при этом имеют погрешность

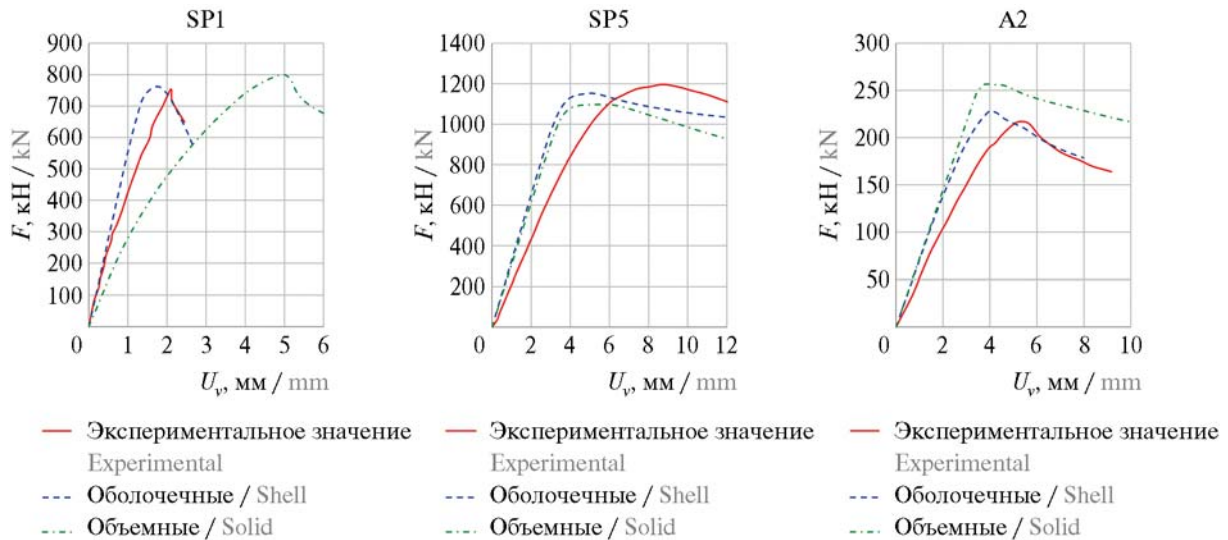


Рис. 3. Сравнение кривых «нагрузка–перемещение» при различных типах конечного элемента

Fig. 3. Comparison of load-to-displacement curves for different types of finite elements

не более 5 % относительно экспериментального значения. С учетом сложностей моделирования балок из объемных элементов и значительно меньшей точности их результатов для всех базовых моделей применен оболочечный КЭ S4R.

**Механические свойства материала** были приняты на основе результатов испытаний образцов стали на одноосное растяжение. В работе [18] представлены измеренные значения предела текучести и предела прочности для трех образцов толщиной 6 мм и трех образцов 20 мм. Однако в экспериментальных образцах использовался также прокат толщиной 30 мм. При этом в тексте отмечено, что для стали полки средние значения предела текучести и предела прочности составляют 379 и 517 МПа соответственно, для стенки толщиной 6 мм — 373 и 542 МПа соответственно. Из-за отсутствия более точных данных и второстепенного влияния полки на несущую способность при действии локальной нагрузки для проката толщиной 30 мм приняты такие же значения как для толщины 20 мм. Модуль упругости и коэффициент Пуассона приняты равными общепринятым значениям  $E = 210$  ГПа и  $\nu = 0,3$  соответственно. В работе [19] для полки средние значения предела текучести равнялись 406 МПа, предела прочности — 568 МПа; для стенки предел текучести — 375 МПа, предел прочности — 491 МПа. Модуль упругости для стали полки и стенки составил 195 и 193 ГПа соответственно.

Одним из наиболее важных параметров КЭ модели является диаграмма деформирования материала, поэтому для анализа влияния **разных моделей материала** рассмотрены следующие варианты:

- билинейная зависимость «напряжение–деформация» без деформационного упрочнения;
- трехлинейная зависимость «напряжение–деформация» с деформационным упрочнением с уклоном, равным  $E/100$ ;

- четырехлинейная модель материала в соответствии со шведским стандартом BSK07<sup>4</sup>;
- пятилинейная модель материала в соответствии с работой [20] (рис. 4). Анализ различных моделей материалов приведен в табл. 2.

На рис. 4, с приняты следующие обозначения:

$$\varepsilon_1 = \frac{f_y}{E}, \varepsilon_2 = 0,025 - 5 \frac{f_y}{E}, \varepsilon_3 = 0,02 + 50 \frac{f_u - f_y}{E}.$$

На рис. 4, d приняты следующие обозначения:

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \varepsilon_u - \varepsilon_{sh}}, C_1 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0,25(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u},$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0,4(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u},$$

$$\varepsilon_{sh} = 0,1 \frac{f_y}{f_u} - 0,055 \text{ при } 0,015 \leq \varepsilon_{sh} \leq 0,03,$$

$$\varepsilon_{sh} = 0,6 \left( 1 - \frac{f_y}{f_u} \right) \text{ при } \varepsilon_u \geq 0,06.$$

С целью определения оптимального **размера конечного элемента**, достаточного для моделирования поведения реальной балки, выполнен анализ сходимости сетки КЭ (рис. 5). Для этого были установлены значения критической силы  $F_{cr}$  потери устойчивости и предельной силы  $F_u$  с учетом геометрических несовершенств для различных размеров сетки. При моделировании стенки, полки и ребер жесткости использовался КЭ общего назначения S4R.

<sup>4</sup> BSK. Boverkets Handbok om Stålkonstruktioner, BSK07, November 2007.

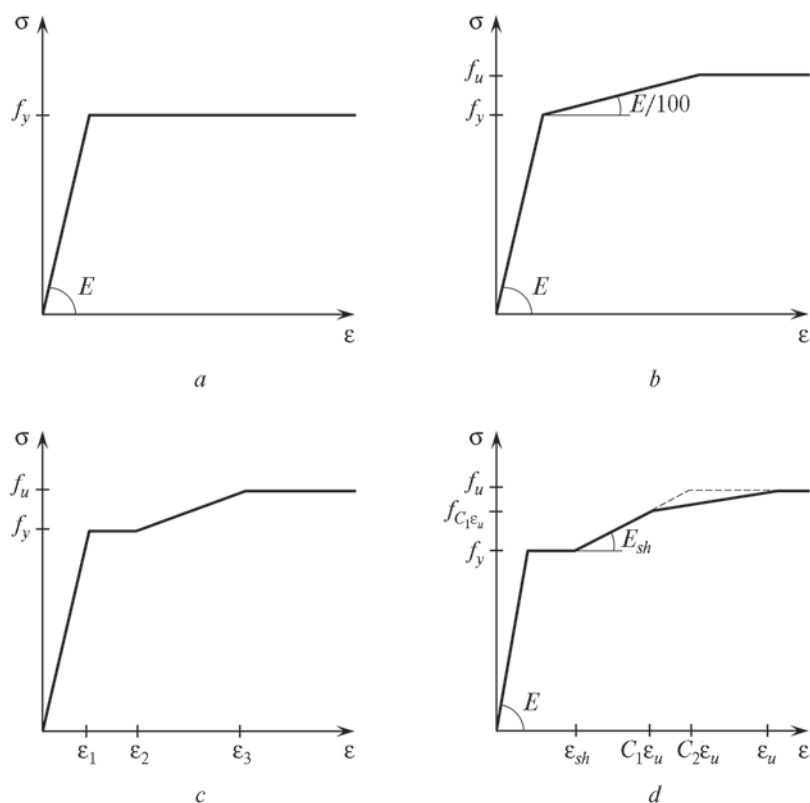


Рис. 4. Модели материала: *a* — билинейная без деформационного упрочнения; *b* — трехлинейная с деформационным упрочнением; *c* — четырехлинейная; *d* — пятилинейная

Fig. 4. Material models: *a* — bilinear without deformation hardening; *b* — three-linear with deformation hardening; *c* — four-linear; *d* — five-linear

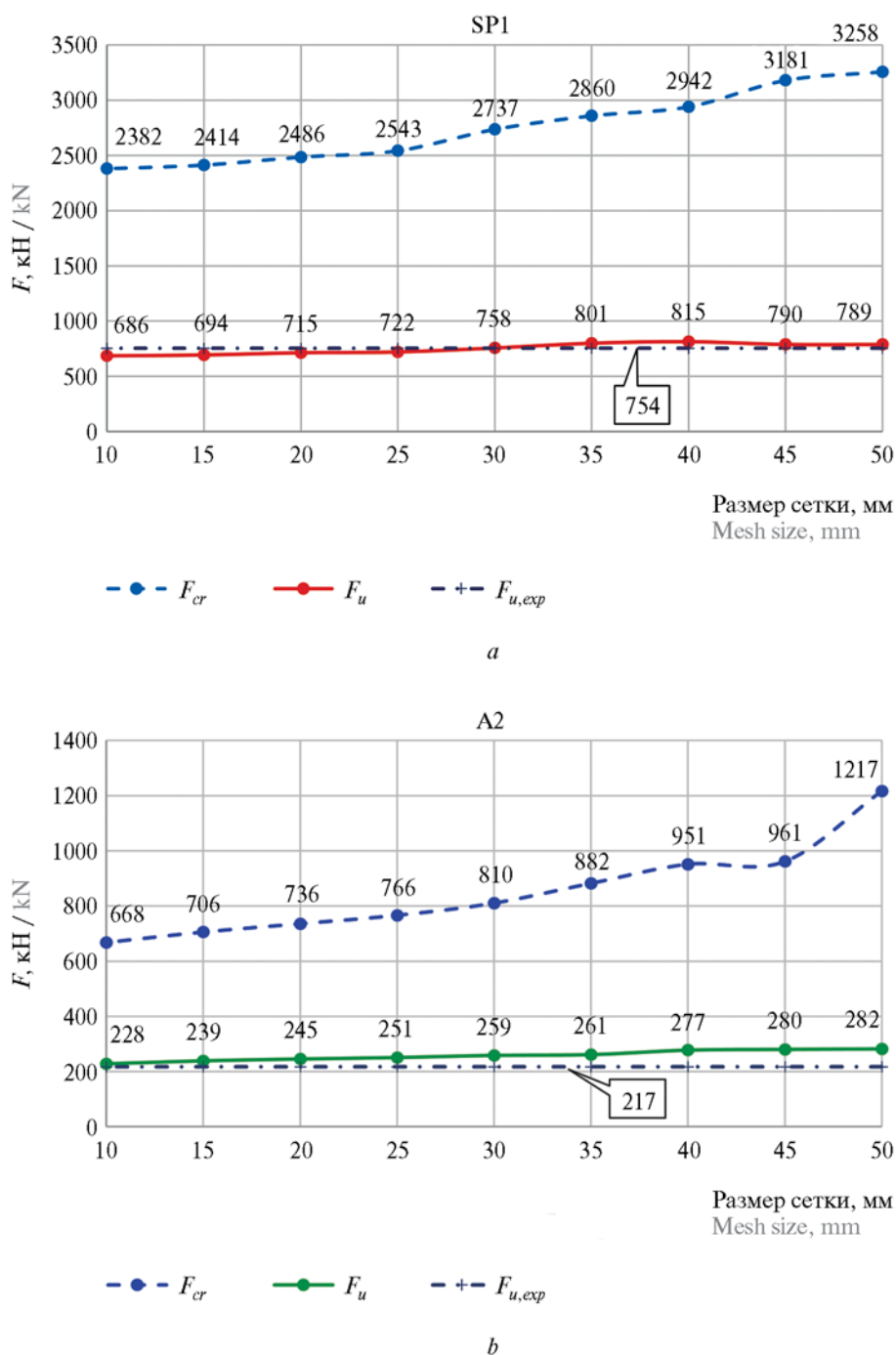
Табл. 2. Сравнение результатов КЭ модели с экспериментальными при различных моделях материала

Table 2. Comparison of the results of the FE modeling with the experimental ones for different models of the material

| Образец<br>Specimen | Модель материала<br>Model of the material           | $F_{exp}$ , кН<br>kN | $F_{FE}$ , кН<br>kN | $F_{exp}/F_{FE}$ |
|---------------------|-----------------------------------------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| SP1                 | По рис. 4, <i>a</i><br>Pursuant to Fig. 4, <i>a</i> | 753,5                | 677,1               | 1,110            |
|                     | По рис. 4, <i>b</i><br>Pursuant to Fig. 4, <i>b</i> |                      | 731,4               | 1,030            |
|                     | По рис. 4, <i>c</i><br>Pursuant to Fig. 4, <i>c</i> |                      | 694,7               | 1,085            |
|                     | По рис. 4, <i>d</i><br>Pursuant to Fig. 4, <i>d</i> |                      | 714,6               | 1,054            |
| SP5                 | По рис. 4, <i>a</i><br>Pursuant to Fig. 4, <i>a</i> | 1196,4               | 1099,1              | 1,089            |
|                     | По рис. 4, <i>b</i><br>Pursuant to Fig. 4, <i>b</i> |                      | 1146,4              | 1,044            |
|                     | По рис. 4, <i>c</i><br>Pursuant to Fig. 4, <i>c</i> |                      | 1105,6              | 1,082            |
|                     | По рис. 4, <i>d</i><br>Pursuant to Fig. 4, <i>d</i> |                      | 1116,3              | 1,072            |
| A2                  | По рис. 4, <i>a</i><br>Pursuant to Fig. 4, <i>a</i> | 217,0                | 212,9               | 1,019            |
|                     | По рис. 4, <i>b</i><br>Pursuant to Fig. 4, <i>b</i> |                      | 228,3               | 0,951            |

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

| Образец<br>Specimen | Модель материала<br>Model of the material | $F_{exp}$ , кН<br>kN | $F_{FE}$ , кН<br>kN | $F_{exp}/F_{FE}$ |
|---------------------|-------------------------------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| A2                  | По рис. 4, с<br>Pursuant to Fig. 4, c     | 217,0                | 224,4               | 0,967            |
|                     | По рис. 4, d<br>Pursuant to Fig. 4, d     |                      | 222,1               | 0,977            |



**Рис. 5.** Графики зависимости критической силы потери устойчивости  $F_{cr}$  и предельной нагрузки  $F_u$  от размеров КЭ сетки  
**Fig. 5.** Graphs of dependence between the critical force of the loss of stability  $F_{cr}$  and ultimate load  $F_u$  on the size of the finite element of the mesh

Для образцов SP1–SP12 сходимость результатов была достигнута при размерах КЭ, равного 20 мм, при этом общее количество элементов не приводило к существенным потерям в скорости расчета. Для балок А1–А3, В1–В3 при 10–15 мм при таких размерах существенно возрастало время расчета. Чтобы решить эту проблему, выполнено локальное сгущение сетки КЭ в месте наибольших деформаций. Принятая сетка КЭ с зонами перехода от 30 до 5 мм.

Обязательным условием использования КЭ модели для оценки несущей способности является **учет начальных геометрических и структурных несовершенств**. Форма несовершенств задана на основании первой собственной формы потери устойчивости [21, 22]. С этой целью для каждой модели произведен бифуркационный расчет потери устойчивости. Форма потери устойчивости принята в ка-

честве эквивалентного начального геометрического несовершенства для модели с нелинейным поведением. Значение выгиба определено на основании рекомендаций EN 1993-1-5 путем деления меньшей стороны отсека на 200. Однако в EN 1993-1-5 отсутствуют рекомендации по установлению размера отсека для балки с гофрированной стенкой, поэтому выполнен сравнительный анализ, в котором в качестве отсека определены меньшая часть гофры и стенка балки. Для образцов SP1–SP12 начальные геометрические несовершенства с учетом размеров гофры назначены 1 и 2,5 мм, для образцов А1–А3, В1–В3 — 0,7 и 2,9 мм. Анализ результатов различных значений несовершенств представлен в табл. 3. Отрицательные значения величин несовершенств указывают на противоположное направление выпучивания относительно экспериментально полученных деформаций.

**Табл. 3.** Сравнение результатов КЭ модели с экспериментальными при различных размерах несовершенств

**Table 3.** Comparison between the results of the FE model and the experimental data in case of different sizes of imperfections

| Образец<br>Specimen | Величина несовершенств, мм<br>The magnitude of imperfections, mm | $F_{exp}$ , кН<br>kN | $F_{FE}$ , кН<br>kN | $F_{exp}/F_{FE}$ |
|---------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| SP1                 | 1                                                                | 753,5                | 762,0               | 0,989            |
|                     | –1                                                               |                      | 702,7               | 1,072            |
|                     | 2,5                                                              |                      | 682,3               | 1,104            |
|                     | –2,5                                                             |                      | 709,5               | 1,062            |
| SP5                 | 1                                                                | 1196,4               | 1152,3              | 1,038            |
|                     | –1                                                               |                      | 1134,1              | 1,055            |
|                     | 2,5                                                              |                      | 1084,6              | 1,103            |
|                     | –2,5                                                             |                      | 1100,2              | 1,087            |
| A2                  | 0,7                                                              | 219,4                | 228,6               | 0,949            |
|                     | –0,7                                                             |                      | 207,2               | 1,059            |
|                     | 2,9                                                              |                      | 224,6               | 0,977            |
|                     | –2,9                                                             |                      | 205,9               | 1,066            |

По итогам сравнительного анализа моделей с различной величиной начальных геометрических несовершенств видно, что значение несовершенств, вычисленное с использованием меньшей части гофры в качестве отсека, дает наиболее близкие к эксперименту результаты.

Для оценки влияния изменения значений входных переменных (предел текучести, модуль упругости, толщина стенки и т.д.) и параметров модели (размер сетки КЭ, тип КЭ и т.д.) на результаты моделирования выполнен анализ чувствительности. Оценка чувствительности является исключительно важной и необходимой процедурой, которая позволяет снизить неопределенность результатов и выявить наиболее значимые параметры модели.

Для **анализа чувствительности к геометрическим размерам** выполнены КЭ модели с отличающимися от экспериментальных толщинами полок и стенок на 10 %. В ходе анализа очевидно, что изменение толщины полок на 10 % влечет изменение значения предельной несущей способности в среднем на 5,2 % (табл. 4). Изменение значения толщины стенки для гофрированных балок в среднем прямо пропорционально влияет на результаты КЭ моделей (табл. 5).

С целью определения **чувствительности к значениям механических характеристик** проведен сравнительный анализ КЭ моделей с различными значениями предела текучести (рис. 6) и модуля упругости (рис. 7) в 10 %. Как видно по результатам анализа, значение предела текучести оказывает влияние на результаты КЭ моделей в среднем на 7 %.

Табл. 4. Сравнение результатов КЭ модели с экспериментальными данными при различных значениях толщин полок

Table 4. Comparison between the results of the FE model and the experimental data for different values of flange thicknesses

| Образец<br>Specimen | $t_f$ , мм<br>mm | $F_{exp}$ , кН<br>kN | $F_{FE}$ , кН<br>kN | $F_{exp}/F_{FE}$ |
|---------------------|------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| SP1                 | 6                | 753,5                | 762,0               | 0,989            |
|                     | 6,6 (+10 %)      |                      | 729,5               | 1,033            |
|                     | 5,4 (–10 %)      |                      | 653,5               | 1,153            |
| SP5                 | 6                | 1196,4               | 1152,3              | 1,038            |
|                     | 6,6 (+10 %)      |                      | 1143,7              | 1,046            |
|                     | 5,4 (–10 %)      |                      | 1064,6              | 1,124            |
| A2                  | 3                | 219,4                | 228,6               | 0,949            |
|                     | 3,3 (+10 %)      |                      | 236,6               | 1,005            |
|                     | 2,7 (–10 %)      |                      | 216,0               | 0,864            |

Табл. 5. Сравнение результатов КЭ модели с экспериментальными данными при различных значениях толщин стенок

Table 5. Comparison between the results of the FE model with experimental data in case of different values of web thicknesses

| Образец<br>Specimen | $t_w$ , мм<br>mm | $F_{exp}$ , кН<br>kN | $F_{FE}$ , кН<br>kN | $F_{exp}/F_{FE}$ |
|---------------------|------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| SP1                 | 20               | 753,5                | 762,0               | 0,989            |
|                     | 22 (+10 %)       |                      | 772,2               | 0,967            |
|                     | 18 (–10 %)       |                      | 612,5               | 1,230            |
| SP5                 | 30               | 1196,4               | 1152,3              | 1,038            |
|                     | 33 (+10 %)       |                      | 1233,7              | 0,970            |
|                     | 27 (–10 %)       |                      | 978,9               | 1,222            |
| A2                  | 12               | 219,4                | 228,6               | 0,949            |
|                     | 13,2 (+10 %)     |                      | 251,1               | 0,864            |
|                     | 10,8 (–10 %)     |                      | 202,11              | 1,074            |

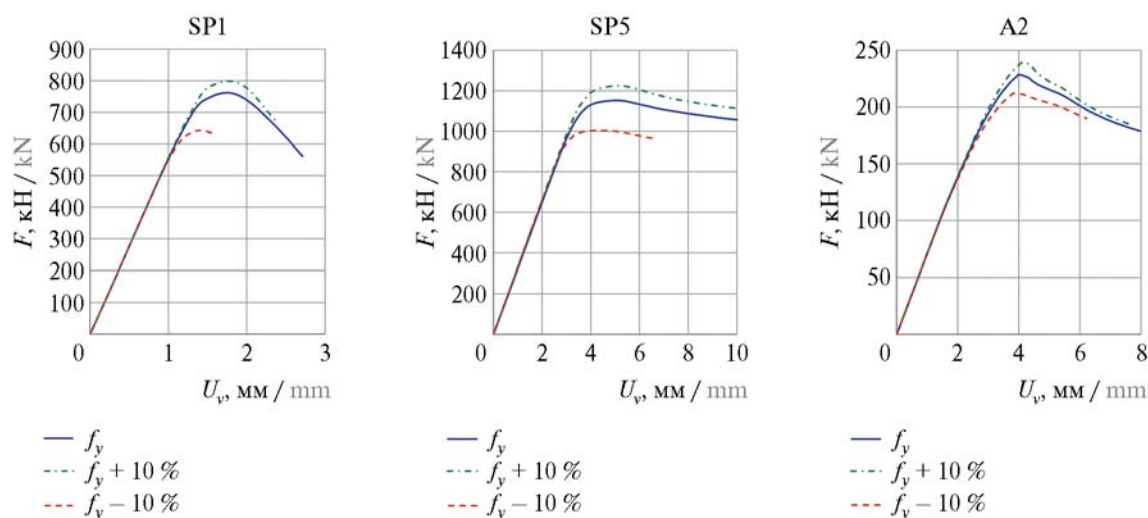


Рис. 6. Сравнение кривых «нагрузка–перемещение» при различных значениях предела текучести

Fig. 6. Comparison between load-displacement curves made for different values of yield strength

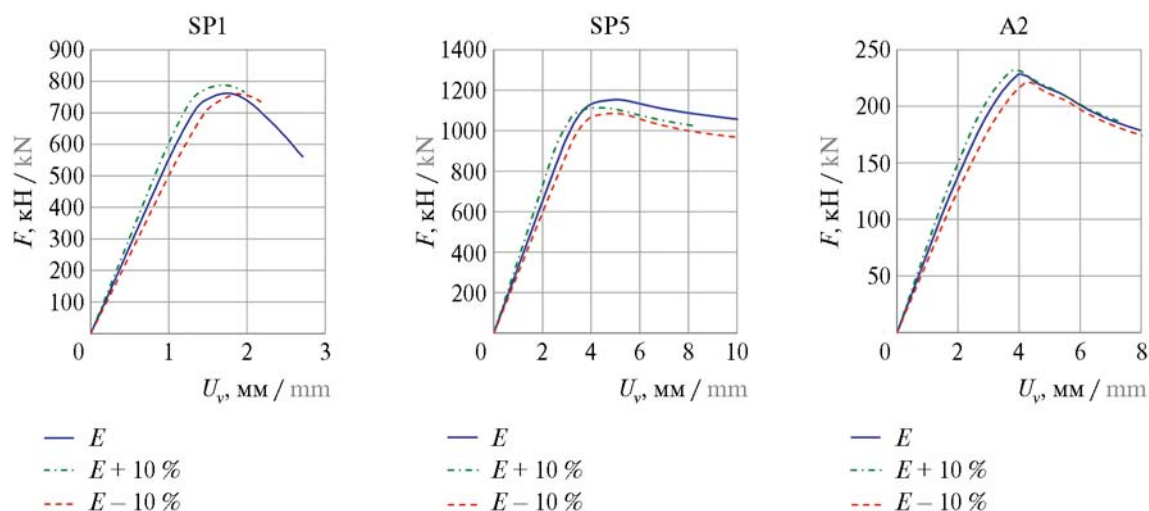


Рис. 7. Сравнение кривых «нагрузка–перемещение» при различных значениях модуля упругости

Fig. 7. Comparison between load-displacement curves made for different values of the modulus of elasticity

Анализ чувствительности результатов к изменению модуля упругости представлен на рис. 7. На рисунке приведены кривые деформирования, полученные с помощью КЭ моделей при изменении значения модуля упругости на 10 % в большую и меньшую сторону относительно измеренного значения. Изменение величины модуля упругости влияет на угол наклона линейной части графика зависимости перемещений от нагрузки и на значение предельной силы, однако, учитывая реальную изменчивость модуля упругости (в большинстве нормативных документов изменчивостью модуля упругости пренебрегают, принимая в расчетах среднее значение), данные изменения в значениях предельной силы не существенные.

Исходя из выполненного анализа выработаны основные параметры построения КЭ моделей балок с гофрированной стенкой.

1. Описание работы стали оказывает одно из доминирующих влияний на поведение и точность КЭ моделей. Наибольшая чувствительность проявляется к значению предела текучести стали: при изменении значения предела текучести на  $\pm 10\%$  предельное значение несущей способности меняется на  $\pm 7\%$ . Выбор диаграммы деформирования оказывает сопутствующее влияние. Билинейная зависимость без стадии упрочнения приводит к минимальным значениям несущей способности, билинейная или трехлинейная зависимость со стадии упрочнения (без площадки текучести) приводит к максимальным значениям. Поэтому в качестве консервативной оценки несущей способности следует использовать билинейную зависимость без стадии упрочнения, а в качестве наиболее достоверной оценки отдать предпочтение зависимостям с площадкой текучести и стадией упрочнения.

2. Анализ чувствительности показал, что изменчивость толщины стенки влияет на результат расчета, для большинства случаев наблюдается прямо пропорциональная зависимость. Изменчивость толщины полки оказала сопутствующее влияние. Поэтому учет изменчивости толщины проката должен быть учтен при определении коэффициентов надежности.

3. Форму эквивалентных геометрических несовершенств рекомендуется назначать на основании форм упругой потери устойчивости стенки. А значение начальных геометрических несовершенств назначать равным  $1/100$ – $1/200$  от ширины нагруженной части гофры.

4. Размер КЭ необходимо определять из условия сходимости результатов по критериям критической и предельной силы. Изменения размера КЭ для оценки сходимости рекомендуется уменьшать в два раза. Сходимость по критерию упругой критической силы более выражено проявляется даже при малых изменениях размера КЭ, при этом данный расчет требует значительно меньших вычислительных затрат, поэтому этот критерий особенно эффективно использовать для первоначальных этапов анализа, а на последних этапах сходимость следует дополнительно проверить по критерию предельной силы. В большинстве случаев сходимость результатов была достигнута при размерах КЭ, равного 3–5 толщинам стенки. Однако для балок A1–A3, B1–B3 такой размер КЭ приводил к существенному увеличению общего количества КЭ и, соответственно, времени расчета. Для решения этой проблемы рекомендуется использовать локальное сгущение сетки КЭ в месте наибольших деформаций, что показало высокую эффективность.

На основании перечисленных выше рекомендаций проведены расчеты для всех 17 образцов. Для

модели материала применена четырехлинейная модель материала с площадкой текучести и деформационным упрочнением. Для образцов SP1–SP12 размер КЭ принят 20 мм, для образцов A1–A3, B1–B3 выполнено локальное сгущение сетки КЭ от 30 до 5 мм в зоне приложения локальной нагрузки. Для образцов SP1–SP12 начальные геометрические несовершенства назначены 1 мм, для образцов A1–A3, B1–B3 — 0,7 мм. Результаты сравнения КЭ расчетов с экспериментальными данными представлены в табл. 6.

**Табл. 6.** Сравнение результатов МКЭ с экспериментальными для всех образцов

**Table 6.** Comparison between FEM results with the experimental ones for all specimens

| Образец<br>Sample | $F_{exp}$ , кН<br>kN | $F_{FE}$ , кН<br>kN | $F_{exp}/F_{FE}$ |
|-------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| SP1               | 753,5                | 762,0               | 0,99             |
| SP2               | 953,4                | 929,1               | 1,03             |
| SP3               | 763,7                | 691,5               | 1,10             |
| SP4               | 948,1                | 914,7               | 1,04             |
| SP5               | 1196,4               | 1152,3              | 1,04             |
| SP6               | 1121,1               | 1067,4              | 1,05             |
| SP7               | 1078,2               | 1005,5              | 1,07             |
| SP8               | 1264,0               | 1180,8              | 1,07             |
| SP9               | 1220,8               | 1199,0              | 1,02             |
| SP11              | 1284,6               | 1277,7              | 1,01             |
| SP12              | 773,7                | 753,9               | 1,03             |
| A1                | 219,0                | 237,0               | 0,92             |
| A2                | 217,0                | 228,6               | 0,95             |
| A3                | 181,0                | 190,5               | 0,95             |
| B1                | 188,0                | 190,5               | 0,99             |
| B2                | 213,0                | 228,6               | 0,93             |
| B3                | 218,0                | 237,0               | 0,92             |

Результаты исследования свидетельствуют о хорошей инженерной сходимости экспериментальных значений несущей способности и значений, полученных посредством КЭ моделей, при этом следует отметить, что графики деформирования, т.е. поведение элемента под нагрузкой, также носят близкий характер. Однако для установления статистических характеристик неопределенности (погрешности) КЭ моделей необходимо выполнить дальнейшие исследования на более широкой репрезентативной базе экспериментальных данных. Также требуется учесть, что экспериментальные значения учитывают неточности проведения эксперимента (неточности приложения нагрузки, измерений и т.д.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании анализа принципов построения КЭ моделей определены обобщенные параметры модели, которые наибольшим образом влияют на значение несущей способности гофрированной балки при воздействии локальной нагрузки: модель материалов, несовершенства и размер КЭ. Для описания диаграммы деформирования стали предложено использовать четырехлинейную зависимость с площадкой текучести и деформационным упрочнением. Анализ размеров КЭ сетки показал, что наиболее оптимальный размер составляет около 3–5 толщин стенки элемента. Для уменьшения общего количества конечных элементов рекомендуется использовать локальное сгущение в местах локализации напряженно-деформированного состояния.

Результаты работы позволяют сделать вывод, что метод конечных элементов отлично подходит для задач, связанных с устойчивостью гофрированных стенок балок. Расхождение между экспериментальными значениями несущей способности и значениями, полученными посредством КЭ моделей, находится в пределах 10 %, что дает возможность говорить о достаточной инженерной точности КЭ моделей при решении поставленной задачи.

Важным фактором, в значительной степени влияющим на неопределенность результатов, является точность исходных данных, особенно таких, как предел текучести и толщина стенки. Анализ чувствительности КЭ модели к входным переменным показал, что наибольшая чувствительность связана с изменчивостью толщины стенки (при изменении на  $\pm 10$  % несущая способность меняется на  $\pm 9$  %) и предела текучести (при изменении на  $\pm 10$  % несущая способность меняется на  $\pm 7$  %).

Представлены результаты моделирования 17-и балок с различными вариантами нагружения, и проведен анализ чувствительности принципов построения КЭ моделей (размер сетки, свойства материала, геометрические характеристики), однако неизученным остается влияние формы и способа задания геометрических несовершенств, а также влияние типа КЭ. При дальнейших исследованиях следует более детально изучить влияние изменения свойств стали в местах изгиба стенки из-за деформационного упрочнения и влияние сварных швов между полкой и стенкой. Также представляет интерес анализ чувствительности к эксцентриситету приложения силы. Необходимы дальнейшие исследования в области нормирования коэффициентов надежности, которые будут учитывать неопределенность и погрешность КЭ моделей несущей способности и обеспечивать целевые уровни надежности, сопоставимые с моделями, принятыми в нормативных документах [23, 24].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дмитриева Т.Л., Уламбаяр Х. Использование балок с гофростенкой в современном проектировании // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2015. № 4 (15). С. 132–139.
2. Максимов Ю.С., Остриков Г.М. Стальные балки с тонкой гофрированной стенкой — эффективный вид несущих конструкций производственных зданий // Промышленное строительство. 1984. № 4. С. 10–11.
3. Бондаренко О.С., Кикоть А.А. Анализ балок с гофрированной стенкой // Ползуновский альманах. 2016. № 3. С. 38–41.
4. Митрофанов С.В., Митрофанов В.А. Работа балки с гофрированной стенкой с различными профилями гофрирования // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 9 (61). С. 87–92.
5. Leiva-Aravena L., Edlund B. Buckling of trapezoidally corrugated webs // ECCS colloquium on stability of plates and shells. Belgium : Ghent University, 1987. Pp. 107–116.
6. Egaaly M., Seshadri A. Girders with corrugated webs under partial compressive edge loading // Journal of Structural Engineering. 1997. Vol. 123. Issue 6. Pp. 783–791. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1997)123:6(783)
7. Макеев С.А., Силина Н.Г. Разработка методики уточненного расчета гофробалок на общую устойчивость // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 12. С. 52–60. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.52-60
8. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 6. С. 676–687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687
9. Тишков Н.Л., Степаненко А.Н., Шипелев И.Л., Устименко М.Б. Совершенствование конструкции стальной двутавровой балки с тонкой поперечно-гофрированной стенкой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 104–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-104-111
10. Крылов А.С. Экспериментальная оценка точности расчетов стальных балок при различных граничных условиях // Строительство и реконструкция. 2019. № 1 (81). С. 48–55. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-81-1-48-55
11. Надольский В.В. Неопределенности расчетных моделей сопротивления стальных конструкций // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2016. № 8. С. 66–72.
12. Тур В.В., Надольский В.В. Калибровка значений частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций для условий Республики Беларусь. Часть 2 // Строительство и реконструкция. 2016. № 5 (67). С. 69–75.
13. Притыкин А.И., Мисник А.В., Лаврова А.С. Особенности расчета перфорированных балок МКЭ // Известия КГТУ. 2016. № 43. С. 249–259.
14. Rogač M., Aleksić S., Lučić D. Influence of patch load length on resistance of I-girders. Part-II: Numerical research // Journal of Constructional Steel Research. 2021. Vol. 176. Pp. 106–138. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106388
15. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders — Tests and numerical model verification // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 85. Pp. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.05.016
16. Tryland T., Hopperstad O.S., Langseth M. Steel girders subjected to concentrated loading — validation of numerical simulations // Journal of Constructional Steel Research. 1999. Vol. 50. Issue 2. Pp. 199–216. DOI: 10.1016/S0143-974X(98)00248-X
17. Nadolski V., Sykora M. Uncertainty in resistance models for steel members // Transactions of the VŠB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series. 2014. Vol. 14. Issue 2. Pp. 26–37. DOI: 10.2478/tvsv-2014-0028
18. Kövesdi B., Kuhlmann U., Dunai L. Combined shear and patch loading of girders with corrugated webs // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2010. Vol. 54. Issue 2. P. 79. DOI: 10.3311/pp.ci.2010-2.02
19. Al-Emrani M., Ljungström N., Karlberg O. Girders with trapezoidally corrugated webs under patch loading // Proceedings of the 6th European Conference on Steel and Composite Structures (Eurosteel 2011), 31 August – 2 September 2011. Budapest, Hungary, 2011. Pp. 620–625.
20. Yun X., Gardner L. Stress-strain curves for hot-rolled steels // Journal of Constructional Steel Research. 2017. Vol. 133. Pp. 36–46. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.01.024
21. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading // Thin-Walled Struct. 2012. Vol. 53. Pp. 15–25. DOI: 10.1016/j.tws.2011.12.003
22. Pavlovčič L., Beg D., Kuhlmann U. Shear resistance of longitudinally stiffened panels. Part 1: Tests and numerical analysis of imperfections // Journal of Constructional Steel Research. 2007. Vol. 63. Issue 3. Pp. 351–364. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.05.009
23. Перельмутер А.В. Использование критерия отпорности для оценки предельного состояния конструкции // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 12. С. 1559–1566. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1559-1566
24. Тур В.В., Тур А.В., Лизогуб А.А. Проверка живучести конструктивных систем из сборного железобетона по методу энергетического баланса // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 8. С. 1015–1033. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1015-1033

Поступила в редакцию 26 апреля 2022 г.

Принята в доработанном виде 30 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 30 мая 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Виталий Валерьевич Надольский** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65; РИНЦ ID: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolski.vv@mail.by;

**Алексей Игоревич Вихляев** — аспирант кафедры строительных конструкций; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65; alexvihlae@mail.com.

Вклад авторов:

Надольский В.В. — концепция исследования, разработка методологии, построение и анализ КЭ моделей, обработка данных и составление графиков зависимостей, написание текста, итоговые выводы и заключение.

Вихляев А.И. — построение КЭ моделей, участие в оформлении статьи, составление графиков зависимостей.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Dmitrieva T.L., Ulambaiar Kh. Use of sin beams in modern design. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*. 2015; 4(15):132-139. (rus.).
2. Maksimov Y.S., Ostrikov G.M. Steel beams with thin corrugated web — an effective form of supporting structures for industrial buildings. *Industrial Construction*. 1984; 4:10-11. (rus.).
3. Bondarenko O.S., Kikot A.A. Analysis of beams with corrugated web. *Polzunov Almanac*. 2016; 3:38-41. (rus.).
4. Mitrofanov S.V., Mitrofanov V.A. The work of beams with corrugated web with different corrugation profiles. *Construction and Technogenic Safety*. 2017; 9(61):87-92. (rus.).
5. Leiva-Aravena L., Edlund B. Buckling of trapezoidally corrugated webs. *ECCS colloquium on stability of plates and shells*. Belgium, Ghent University, 1987; 107-116.
6. Egaaly M., Seshadri A. Girders with corrugated webs under partial compressive edge loading. *Journal of Structural Engineering*. 1997; 123(6):783-791. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1997)123:6(783)
7. Makeev S.A., Silina N.G. Technique for refined calculation of corrugated beams for general stability. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 12:52-60. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.52-60 (rus.).
8. Saiyan S.G., Paushkin A.G. The numerical parametric study of the stress-strain state of I-beams having versatile corrugated webs. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(6):676-687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687 (rus.).
9. Tishkov N.L., Stepanenko A.N., Shipilev I.L., Ustimenko M.B. Structural improvement of steel I-beam with thin transversely corrugated wall. *Proceedings of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2020; 22(2):104-111. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-104-111 (rus.).
10. Krylov A.S. Experimental assessment numerical simulation of steel beams with different boundary conditions. *Construction and Reconstruction*. 2019; 1(81):48-55. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-81-1-48-55 (rus.).
11. Nadolski V.V. Uncertainty of the design resistance models of steel structures. *Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences*. 2016; 8:66-72. (rus.).
12. Tur V.V., Nadolski V.V. The partial factor values calibration for the ultimate limit state checking of steel structures for the conditions Republic of Belarus. Part 2. *Construction and Reconstruction*. 2016; 5(67):69-75. (rus.).
13. Pritykin A.I., Misnik A.V., Lavrova A.S. Features of calculation of perforated beams by FEM. *Proceedings of KSTU*. 2016; 43:249-259. (rus.).
14. Rogač M., Aleksić S., Lučić D. Influence of patch load length on resistance of I-girders. Part-II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021; 176:106-138. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106388
15. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders — Tests and numerical model verification. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013; 85:116-129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.05.016
16. Tryland T., Hopperstad O.S., Langseth M. Steel girders subjected to concentrated loading — validation of numerical simulations. *Journal of Constructional Steel Research*. 1999; 50(2):199-216. DOI: 10.1016/s0143-974x(98)00248-x

17. Nadolski V., Sykora M. Uncertainty in Resistance Models for Steel Members. *Transactions of the VŠB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2014; 14(2):26-37. DOI: 10.2478/tvsb-2014-0028
18. Kövesdi B., Kuhlmann U., Dunai L. Combined shear and patch loading of girders with corrugated webs. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2010; 54(2):79. DOI: 10.3311/pp.ci.2010-2.02
19. Al-Emrani M., Ljungström N., Karlberg O. Girders with trapezoidally corrugated webs under patch loading. *Proceedings of the 6th European Conference on Steel and Composite Structures (Eurosteel 2011), 31 August – 2 September 2011*. Budapest, Hungary, 2011; 620-625.
20. Yun X., Gardner L. Stress-strain curves for hot-rolled steels. *Journal Construction Steel Research*. 2017; 133:36-46. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.01.024
21. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading. *Thin-Walled Structures*. 2012; 53:15-25. DOI: 10.1016/j.tws.2011.12.003
22. Pavlovčič L., Beg D., Kuhlmann U. Shear resistance of longitudinally stiffened panels. Part 1: Tests and numerical analysis of imperfections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007; 63(3):351-364. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.05.009
23. Perelmuter A.V. Using the criterion of resistibility to assess of a structural limit state. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(12):1559-1566. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1559-1566 (rus.).
24. Tur V.V., Tur A.V., Lizahub A.A. Checking of the robustness of precast structural systems based on the energy balance method. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(8):1015-1033. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1015-1033 (rus.).

*Received April 26, 2022.*

*Adopted in revised form on May 30, 2022.*

*Approved for publication on May 30, 2022.*

**B I O N O T E S :** **Vitali V. Nadolski** — PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; ID RISC: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskivv@mail.by;

**Alexey I. Vikhlyayev** — postgraduate student of the Department of Building Structures; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; alexvihlae@mail.com.

*Authors' contribution:*

*Vitali V. Nadolski — research concept, methodology development, development and analysis of FE models, data processing and dependency graphs, text writing, final conclusions and conclusion.*

*Alexey I. Vikhlyayev — building of the FE models, participation in the design of the article, drawing up dependency graphs.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

## Исследование влияния различных типов цемента на физико-химические свойства автоклавного газобетона

Александр Олегович Шанин<sup>1</sup>, Александр Алексеевич Баранов<sup>2</sup>,  
Елена Валентиновна Жбанова<sup>1</sup>, Наталия Сергеевна Емельчикова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ); г. Иваново, Россия;

<sup>2</sup> ПК «КУБИ БЛОК ЕГОРЬЕВСКИЙ»; г. Егорьевск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассмотрено влияние различных типов цемента на физико-химические свойства газобетонной смеси и готовой продукции плотностью Д600, изготовленной по ударной технологии. Цель исследования — улучшение физико-химических свойств газобетонной смеси для стабилизации процесса производства автоклавного газобетона (АГБ) и увеличение коэффициента конструктивного качества готовой продукции.

**Материалы и методы.** Для анализа влияния различных типов цемента на АГБ изготавливались пробные партии. Применяли: ЦЕМ I 52,5Н, ЦЕМ I 42,5Б, ПЦ 500-Д0-Н, ЦЕМ II/A-К (Ш-И) 42,5Н, ЦЕМ II/A-И 42,5Н, ЦЕМ II/A-И 42,5Б. В качестве факторов, влияющих на реологические свойства газобетонной смеси, выделены химический и минералогический составы цемента. Свойства газобетонной смеси оценивались по параметрам: подвижность по Суттарду, температура во время кипения массива, время наступления кипения, пластическая прочность, температура на резке. Конечные свойства продукции оценивались по параметрам: прочность и плотность. Расплав измерялся на приборе Суттарда, значение пластической прочности устанавливали при помощи пенетromетра. Прочность и плотность АГБ определялась согласно ГОСТ 10180-2012 и ГОСТ 12730.5-2018.

**Результаты.** Выявлены зависимости изменения реологических свойств смеси и эксплуатационных показателей АГБ от минералогического состава цемента. Представлены графики зависимостей: пластической прочности от содержания  $C_3A$ ; пластической прочности от содержания  $MgO$ ; конечной прочности от содержания  $MgO$ ; прочности от содержания  $C_3S$ ; плотности от содержания  $C_3S + C_4AF$ . Показан график влияния добавок известняка и шлака на подвижность смеси. Описано, как влияет количество щелочных оксидов в цементе на конечную прочность АГБ. Установлены виды брака, возникающие при применении того или иного типа цемента. Подобран цемент с наибольшим коэффициентом конструктивного качества.

**Выводы.** Показано, что в АГБ можно использовать цемент с содержанием добавок известняка и шлака без ухудшения физико-химических и эксплуатационных характеристик. Применение ЦЕМ II позволяет снизить себестоимость продукции, также уменьшить «углеродный след».

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** газобетон, цемент, плотность, прочность, минералогический состав, физико-химические свойства, газобетонная смесь

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Шанин А.О., Баранов А.А., Жбанова Е.В., Емельчикова Н.С. Исследование влияния различных типов цемента на физико-химические свойства автоклавного газобетона // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 707–719. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.707-719

Автор, ответственный за переписку: Александр Олегович Шанин, aleksandr1998yandex@mail.ru.

## An investigation of the influence of various types of cement on the physicochemical properties of autoclaved aerated concrete

Aleksander O. Shanin<sup>1</sup>, Aleksandr A. Baranov<sup>2</sup>, Elena V. Zhbanova<sup>1</sup>,  
Natalia S. Emel'chikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU); Ivanovo, Russian Federation;

<sup>2</sup> PC "KUBI BLOCK EGORIEVSKY"; Egorievsk, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The article addresses the influence of various types of cement on the physicochemical properties of the aerated concrete mix and finished products that have D600 density and are manufactured according to the impact technology. The study is aimed at improving the rheological properties of the mix and the operational parameters of autoclaved aerated concrete (AAC). The authors study a reduction in the "carbon footprint" of AAC CEM II. The aim of the study is to improve the physicochemical properties of the aerated concrete mix to stabilize the AAC production process and increase the strength-density ratio of the ultimate product.

**Materials and methods.** To analyze the influence of various types of cement on AAC, trial batches were manufactured. The following grades of cement were used in testing: CEM I 52.5 N, CEM I 42.5B, PC 500-D0-N, CEM II/A-M (S-I) 42.5N, CEM II/A-L 42.5N, CEM II/A-L 42.5B. Chemical and mineralogical compositions of cements were identified as factors affecting the rheological properties of the aerated concrete mix. The properties of the aerated concrete mix were evaluated against the following parameters: consistency identified using the Southard viscosimeter, mix boiling point, boiling time, plastic strength, and cutting temperature. Final properties of products were evaluated against such parameters as strength and density. The flow was measured using the Southard viscosimeter; the value of plastic strength was identified using the penetrometer. The strength and density of ACC were identified pursuant to GOST (State Standard) 10180-2012 and GOST 12730.5-2018.

**Results.** The authors have identified dependences between changes in the rheological properties of the mix, operational parameters of AAC and the mineralogical composition of cement. The authors present graphs describing dependencies between plastic strength and the  $C_3A$  content, plastic strength and the  $MgO$  content, ultimate strength and the  $MgO$  content, strength and the  $C_3S$  content; density and the  $C_3S + C_4AF$  content. A graph describing the effect of limestone and slag additives on the mix consistency is presented. The authors describe the way the amount of alkaline oxides in cement affects the ultimate strength of AAC. The types of defects caused by particular types of cement have been identified. The cement, having the highest value of the strength-density ratio, has been selected.

**Conclusions.** It is shown that the cement, containing limestone and slag additives, cannot deteriorate any physicochemical or operational characteristics of AAC. The use of CEM II reduces the cost of production and the "carbon footprint".

**KEYWORDS:** autoclaved aerated concrete, cement, density, strength, mineralogical composition, physicochemical properties, aerated concrete mix

**FOR CITATION:** Shanin A.O., Baranov A.A., Zhbanova E.V., Emel'chikova N.S. An investigation of the influence of various types of cement on the physicochemical properties of autoclaved aerated concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):707-719. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.707-719 (rus.).

Corresponding author: Alexander O. Shanin, aleksandr1998yandex@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Современный российский рынок стеновых материалов представлен отечественными производителями, а объемы импортных поставок не оказывают на него существенного воздействия. Производство автоклавного газобетона (АГБ) и других материалов в стране напрямую зависит от динамики развития строительной отрасли. Изменение технологий строительства оказывает влияние на показатели спроса различных видов материалов. Основным сегментом потребления штучных изделий является жилищное строительство. По оценкам ГС-Эксперт на его долю приходится порядка 77 % общей площади строящихся в стране зданий и 79–87 % потребления стеновых материалов. На протяжении последних лет в жилищном строительстве наблюдается устойчивая тенденция к снижению доли кирпичных и панельных домов на фоне роста монолитного домостроения. Это обеспечивает увеличение потребления АГБ [1].

Спрос на все виды стеновых материалов в РФ снижался с 2015 по 2018 гг. из-за общего сокращения объемов строительства. При этом АГБ показал наименьшие темпы снижения по сравнению с другими видами штучных стеновых материалов. По итогам 2018 г. сокращение объемов производства АГБ, по сравнению с показателями 2014 г., составило всего около 10 %. В то же время выпуск керамических материалов (кирпич, поризованные крупноформатные блоки) за тот же период уменьшился на 29 %, а выпуск силикатных материалов (кирпич, силикатные стеновые перегородки и стеновые блоки) упал на 54 %. Согласно итогам развития рынка стеновых материалов за последние 5 лет доля применения АГБ в РФ выросла на 10 % и достигла своего исторического максимума 44 %. С 2017 г. автоклавный газо-

бетон стал наиболее востребованным в стране материалом [1].

В последнее время перед производителями газобетонной продукции встают проблемы высокой кредитной нагрузки и возрастающей конкуренции. С ростом спроса на продукцию параллельно идет и рост значимых характеристик самого блока. Повышается прочность, долговечность и снижается плотность, теплопроводность. Растет качество блока. Благодаря улучшению вышеперечисленных характеристик АГБ, жилье становится намного комфортнее и безопаснее. Предприятие, производящее качественную продукцию, является конкурентоспособным [2]. Правильно выбранное сырье, в частности цемент, позволяет улучшить эксплуатационные и физико-химические свойства и уменьшить себестоимость АГБ.

На сегодняшний день влияние различных типов цемента на газобетонную смесь изучено мало. Исследования в данной области проводили Н.П. Сажнев, В.А. Пинскер, Т.К. Пауэрс. Известно, что при добавлении цемента в состав газобетона значительно повышаются эксплуатационные характеристики материала. Цемент дает возможность стабилизировать структуру АГБ и получить высокие прочностные показатели [2].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Тестовые партии газобетона изготовлены на заводе по производству газобетона ООО ПК «КУБИ БЛОК ЕГОРЬЕВСКИЙ». Состав смеси включает: песок кварцевый, известь, вода, гипс, алюминиевая пудра, портландцементы ЦЕМ I 52,5Н, ЦЕМ I 42,5Б, ПЦ 500-Д0-Н, ЦЕМ II/A-К (Ш-И) 42,5Н, ЦЕМ II/A-И 42,5Н, ЦЕМ II/A-И 42,5Б.

По каждому цементу оценивали химический и минералогический состав, который указан в паспортах качества. В производственной лаборатории измеряли удельную поверхность на приборе ПСХ. Нормальную густоту и сроки схватывания цемента измеряли по ГОСТ 310.3-76<sup>1</sup>.

Каждая партия изготавливалась в соответствии с установленным тактом производства. Были произведены 6 партий по плотности D600 по ударной технологии с постоянным количеством компонентов в рецепте. Подвижность смеси измерялась на вискозиметре Суттарда по ГОСТ 23789-79<sup>2</sup>. Далее определяли наступление времени кипения и температуру кипения смеси в зоне ферментации. С целью установления температуры кипения использовали глубоинный термометр марки Pt 1000. После выхода из зоны ферментации на пункт резки измеряли температуру

массива-сырца и его пластическую прочность. Пластическую прочность определяли пенетрометром марки Т636, погружая конус на глубину 2 см.

Затем после выхода тестовых массивов из автоклава выявлялись виды и количество дефектов. Влияние цемента на выпущенную продукцию оценивалось значениями прочности при сжатии газобетона и плотности. Прочность и плотность образцов устанавливались в соответствии с ГОСТ 10180-2012<sup>3</sup>. Влажность измеряли согласно ГОСТ 12730.5-2018<sup>4</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Перед проведением экспериментальных исследований был выполнен сравнительный анализ различных типов цемента. Данные, полученные в ходе сравнительного анализа, представлены в табл. 1.

<sup>1</sup> ГОСТ 310.3-763. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема. МИПК, 1978. 8 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 23789-79. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний. МИС, 1979. 10 с.

<sup>3</sup> ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Технические условия. МНТКС, 2012. 23 с.

<sup>4</sup> ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. МНТКС, 2018. 19 с.

Табл. 1. Качественные характеристики цемента

Table 1. Qualitative characteristics of cement

| Параметры<br>Parameters                                                                                                   | Номер / Name               |                            |                                      |                                                |                                                                                                                    |                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|                                                                                                                           | 1                          | 2                          | 3                                    | 4                                              | 5                                                                                                                  | 6                                    |
|                                                                                                                           | ЦЕМ I 52,5Н<br>CEM I 52.5N | ПЦ 500-Д0-Н<br>PC 500-S0-N | ЦЕМ I 42,5Б<br>CEM I 42.5B           | ЦЕМ II/A-И 42,5Н<br>CEM II/A-L 42.5N           | ЦЕМ II/A-К (Ш-И) 42,5Н<br>CEM II/A-M (S-L) 42.5N                                                                   | ЦЕМ II/A-И 42,5Б<br>CEM II/A-L 42.5B |
| Содержание минеральных добавок<br>(вспомогательный компонент), %<br>Content of mineral additives (auxiliary component), % | Нет<br>None                | Нет<br>None                | Известняк<br>0–5<br>Limestone<br>0–5 | Известняк<br>11,9±0,4<br>Limestone<br>11.9±0.4 | Гранули-<br>рованный<br>шлак 7,2±0,4<br>Известняк<br>6,4±0,4<br>Granulated<br>slag 7.2±0.4<br>Limestone<br>6.4±0.4 | Известняк 10<br>Limestone 10         |
| Потери при прокаливании, %<br>Calcination losses, %                                                                       | 1,45±0,2                   | 4,30±0,2                   | 7,70±0,2                             | 8,30±0,2                                       | 1,45±0,2                                                                                                           | 7,70                                 |
| Оксид серы SO <sub>3</sub> (VI), %<br>Sulfur oxide SO <sub>3</sub> (VI), %                                                | 3,45±0,05                  | 2,10±0,05                  | 2,60±0,05                            | 2,55±0,05                                      | 2,46±0,02                                                                                                          | 2,60±0,05                            |
| Оксид магния MgO в клинкере, %<br>Magnesium oxide MgO in clinker, %                                                       | 1,15±0,2                   | 1,35±0,2                   | 1,20±0,2                             | 1,20±0,2                                       | 1,85±0,08                                                                                                          | 1,20±0,2                             |
| Хлор-ион Cl <sup>-</sup> , %<br>Chlorine ion Cl <sup>-</sup> , %                                                          | 0,016±0,001                | 0,021±0,001                | 0,02±0,001                           | 0,019±0,001                                    | 0,042±0,001                                                                                                        | 0,02±0,001                           |

Продолжение табл. 1 / Continuation of the Table 1

| Параметры<br>Parameters                                                                                                                                                                         | Номер / Name               |                            |                            |                                      |                                                  |                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                 | 1                          | 2                          | 3                          | 4                                    | 5                                                | 6                                    |
|                                                                                                                                                                                                 | ЦЕМ I 52,5Н<br>CEM I 52.5N | ПЦ 500-ДЮ-Н<br>PC 500-S0-N | ЦЕМ I 42,5Б<br>CEM I 42.5B | ЦЕМ II/A-И 42,5Н<br>CEM II/A-L 42.5N | ЦЕМ II/A-К (Ш-И) 42,5Н<br>CEM II/A-M (S-L) 42.5N | ЦЕМ II/A-И 42,5Б<br>CEM II/A-L 42.5B |
| Щелочные оксиды в пересчете на Na <sub>2</sub> O (Na <sub>2</sub> O + 0,658K <sub>2</sub> O), %<br>Alkaline oxides in terms of Na <sub>2</sub> O (Na <sub>2</sub> O + 0,658K <sub>2</sub> O), % | 0,55±0,05                  | 0,53±0,05                  | 0,50±0,05                  | 0,52±0,05                            | 0,69±0,01                                        | 0,50±0,05                            |
| Массовое отношение оксида кальция к оксиду кремния CaO/SiO <sub>2</sub> в клинкере<br>Mass ratio of calcium oxide to silicon oxide CaO/SiO <sub>2</sub> in clinker                              | Более 2<br>More than 2     | Более 2<br>More than 2     | Более 2<br>More than 2     | Более 2<br>More than 2               | Более 2<br>More than 2                           | Более 2<br>More than 2               |
| Тонкость помола (остаток на сите № 008), %<br>Fineness of grinding (residue on sieve No. 008), %                                                                                                | 1,20±0,1                   | 1,20±0,1                   | 1,10±0                     | 1,00±0,1                             | 1,10±0,1                                         | 1,10±0,                              |
| Сроки схватывания, мин: начало, конец<br>Setting time, min: start, end                                                                                                                          | 120±15<br>165±10           | 140±15<br>200±10           | 150±15<br>190±10           | 175±15<br>228±10                     | 160±6<br>240±7                                   | 150±15<br>190±10                     |
| Равномерность изменения объема (расширение), мм<br>Uniformity of volume change (expansion), mm                                                                                                  | 0,50±0,5                   | 0,80±0,5                   | 0,90±0,5                   | 0,85±0,5                             | 0,40±0,5                                         | 0,90±0,5                             |
| Нормальная плотность, %<br>Normal density, %                                                                                                                                                    | 29,00±0,4                  | 28,00±0,4                  | 26,20±0,4                  | 28,80±0,4                            | 26,75±0,4                                        | 26,20±0,4                            |
| Признаки ложного схватывания (ГОСТ Р 56588-2015)<br>Signs of false setting (GOST R 56588-2015)                                                                                                  | Нет<br>None                | Нет<br>None                | Нет<br>None                | Нет<br>None                          | Нет<br>None                                      | Нет<br>None                          |
| Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г<br>Specific surface area, cm <sup>2</sup> /g                                                                                                           | 3521                       | 3333                       | 3530                       | 4089                                 | 3997                                             | 4930                                 |
| Прочность при сжатии, МПа в возрасте 2 сут<br>Compressive strength, MPa at the age of 2 days                                                                                                    | 22,80±1,1                  | 27,70±1,1                  | 25,90±1,1                  | 22,10±1,1                            | 20,40±0,5                                        | 25,90±1,1                            |
| Прочность при сжатии, МПа в возрасте 28 сут<br>Compressive strength, MPa at the age of 28 days                                                                                                  | 54,60±0,5                  | 56,25±0,5                  | 47,60±0,5                  | 47,40±0,5                            | 50,80±0,5                                        | 47,60±0,5                            |
| Прочность при сжатии после пропаривания, МПа, (I группа)<br>Post-steaming compressive strength, MPa, (Group I)                                                                                  | 44,25±1,5                  | 48,00±1,5                  | 38,45±1,5                  | 45,30±1,5                            | 39,25±1,5                                        | 38,45±1,5                            |

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

| Параметры<br>Parameters                                                                                                                                          | Номер / Name               |                             |                            |                                      |                                                  |                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|
|                                                                                                                                                                  | 1                          | 2                           | 3                          | 4                                    | 5                                                | 6                                    |
|                                                                                                                                                                  | ЦЕМ I 52,5Н<br>CEM I 52.5N | ПЦ 500-Д10-Н<br>PC 500-S0-N | ЦЕМ I 42,5Б<br>CEM I 42.5B | ЦЕМ II/A-И 42,5Н<br>CEM II/A-L 42.5N | ЦЕМ II/A-К (Ш-И) 42,5Н<br>CEM II/A-M (S-L) 42.5N | ЦЕМ II/A-И 42,5Б<br>CEM II/A-L 42.5B |
| Трехкальциевый силикат $C_3S$ , %<br>Tricalcium silicate $C_3S$ , %                                                                                              | 68,10±4,0                  | 66,50±4,0                   | 69,40±4,0                  | 68,70±4,0                            | 64,60±1,8                                        | 69,40±4,0                            |
| Двухкальциевый силикат $C_2S$ , %<br>Bicalcium silicate $C_2S$ , %                                                                                               | 9,40±0,4                   | 8,94±0,4                    | 9,00±0,4                   | 9,60±0,4                             | 10,00±1,4                                        | 9,00±0,4                             |
| Четырехкальциевый алюмоферрит $C_4AF$ , %<br>Four-calcium aluminoferrite $C_4AF$ , %                                                                             | 18,20±0,4                  | 13,47±0,4                   | 12,60±0,4                  | 4,40±0,4                             | 12,40±0,24                                       | 12,60±0,4                            |
| Трехкальциевый алюминат $C_3A$ , %<br>Tricalcium aluminate $C_3A$ , %                                                                                            | 7,20±0,3                   | 7,67±0,3                    | 4,70±0,3                   | 12,20±                               | 8,20±0,2                                         | 4,70±0,3                             |
| Содержание естественных<br>радионуклидов (удельная<br>эффективная активность), Бк/кг<br>Content of natural radionuclides<br>(specific effective activity), Bq/kg | 62,00±9                    | 71,00±9                     | 57,20±9                    | 65,00±9                              | 100,30±6,63                                      | 57,20±9                              |

Оценивая данные из таблицы, сделаны следующие предположения, что цементы:

- № 4, 6 имеют высокую удельную поверхность, которую можно объяснить высоким содержанием добавки известняка в клинкере;
- № 5 характеризуется большим содержанием  $MgO$  и щелочными оксидами, что может сказаться на конечной плотности и пониженной морозостойкости АГБ;
- № 4, 5 обладают повышенными значениями сроков схватывания, что может повлиять на пластическую прочность массивов-сырцов;
- № 2, 5 имеют минимальные значения содержания алита  $C_3S$ . Данные цементы могут иметь предпосылки к пониженной прочности АГБ;
- № 4 содержит наибольшее количество трехкальциевого алюмината  $C_3A$ , а цементы № 3, 6 — минимальное. Это может повлиять на разницу в наборе пластической прочности массивов-сырцов.

Были залиты пробные партии ячеистого бетона по ударной технологии производства с использованием различных типов цемента.

В процессе заливки измерили параметры: температура заливки, подвижность по Суттарду, температура во время кипения массива, время наступления кипения, пластическая прочность при перманентном времени созревания 115 мин, температура на резке.

После выхода готовой продукции отобрали блоки для измерения показателей: плотность, влажность, прочность на сжатие.

Также провели визуальный осмотр готовой продукции на наличие дефектов. Технологические характеристики газобетонной смеси и показатели качества АГБ представлены в табл. 2.

По данным из таблицы видно, что газобетонная смесь:

- № 4–6 имеет наибольшие расплывы;
- № 4, 5 обладает наибольшей температурой заливки, а также наибольшей температурой кипения;
- № 4 имеет минимальное время начала кипения.

Массив-сырец на цементах:

- № 2 имеет наибольшую пластическую прочность на резке;
- № 1 обладает максимальной температурой на резке, № 6 — минимальной.

Готовая продукция АГБ на цементах:

- № 1, 6 обладают наименьшими значениями плотности; № 4, 5 — наибольшими;
- № 3, 6 имеют наибольшие значения влажности, наименьшие у № 1, 4;
- № 3 обладает повышенными прочностными показателями, № 5 — пониженными, по сравнению с остальными.

Табл. 2. Технологические характеристики газобетонной смеси и показатели качества АГБ  
 Table 2. Engineering characteristics of aerated concrete mix and AAC quality indicators

| Параметры<br>Parameters                                                                                                               | Номер / Name                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                     |                                                                                             |                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                       | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 2                                                                                                                                                                           | 3                                                                                                                                                   | 4                                                                                                                                                   | 5                                                                                           | 6                                                                                                                                              |
|                                                                                                                                       | ЦЕМ I 52,5Н<br>CEM I 52,5N                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ПЦ 500-Д0-Н<br>PC 500-S0-N                                                                                                                                                  | ЦЕМ I 42,5Б<br>CEM I 42,5B                                                                                                                          | ЦЕМ II/A-И 42,5Н<br>CEM II/A-L 42,5N                                                                                                                | ЦЕМ II/A-К (Ш-Ю) 42,5Н<br>CEM II/A-M (S-L) 42,5N                                            | ЦЕМ II/A-И 42,5Б<br>CEM II/A-L 42,5B                                                                                                           |
| Температура заливки, °С<br>Filling temperature, °C                                                                                    | 40,4–40,1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 40,0                                                                                                                                                                        | 40,1–41,2                                                                                                                                           | 41,5–42,6                                                                                                                                           | 42,3                                                                                        | 40,5–41,0                                                                                                                                      |
| Подвижность по Сутгарду,<br>см<br>Consistency according to<br>Southard, cm                                                            | 20,5–21,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 20,0                                                                                                                                                                        | 21,0                                                                                                                                                | 21,5–22                                                                                                                                             | 21,5                                                                                        | 21,5                                                                                                                                           |
| Температура во время<br>кипения, °С<br>Boiling temperature, °C                                                                        | 58,6–59,1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 58,0–58,5                                                                                                                                                                   | 58,3–60,0                                                                                                                                           | 60,0–61,3                                                                                                                                           | 62,2–62,4                                                                                   | 59,7–60,5                                                                                                                                      |
| Время кипения, мин<br>Boiling time, min                                                                                               | 31–32                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 32                                                                                                                                                                          | 33                                                                                                                                                  | 25                                                                                                                                                  | 28–30                                                                                       | 34                                                                                                                                             |
| Пластическая прочность при<br>115 мин созревания, кг/см <sup>2</sup><br>Plastic strength at 115 min of<br>setting, kg/cm <sup>2</sup> | 4,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 4,2–4,5                                                                                                                                                                     | 4,0–4,3                                                                                                                                             | 4,1–4,3                                                                                                                                             | 4,2                                                                                         | 4,0–3,8                                                                                                                                        |
| Температура на резке, °С<br>Cutting temperature, °C                                                                                   | 88,1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 83,1–83,8                                                                                                                                                                   | 83,3–84,9                                                                                                                                           | 86,3–88,2                                                                                                                                           | 86,7                                                                                        | 81,6–82,3                                                                                                                                      |
| Плотность блока, кг/м <sup>3</sup><br>Block density, kg/m <sup>3</sup>                                                                | 562                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 577                                                                                                                                                                         | 576                                                                                                                                                 | 583                                                                                                                                                 | 584                                                                                         | 559                                                                                                                                            |
| Влажность, %<br>Water content, %                                                                                                      | 19,8–23,2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 24,8                                                                                                                                                                        | 27,6                                                                                                                                                | 19,3                                                                                                                                                | 23,8                                                                                        | 27,7                                                                                                                                           |
| Прочность на сжатие, МПа<br>Compressive strength, MPa                                                                                 | 4,50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 4,20                                                                                                                                                                        | 5,02                                                                                                                                                | 4,56                                                                                                                                                | 3,64                                                                                        | 4,17                                                                                                                                           |
| Дефекты<br>Defects                                                                                                                    | Поверхность блока не хрупкая, а пластичная и мягкая. При механическом воздействии кромки и углы блоков чаще не откалываются, а сминаются. Появление следов и зон повышенной влажности на блоке<br>The block surface is rather plastic and soft than fragile. In case of a mechanical impact, block edges and angles do not chip, but get creased. Traces and zones of excessive moisture appear on the block | Наблюдались сколы после деления массива, зазоры между рядами, расслоения<br>Chipping, sticking between rows, and lamination were observed after the solid mix disintegrates | Наблюдались небольшие количество подломов и сколов от делителя<br>A small number of chips and splits, caused by the dividing machine, were observed | Наблюдались небольшое количество подломов и сколов от делителя<br>A small number of chips and splits, caused by the dividing machine, were observed | Наблюдались хрупкость граней и углов блока<br>Fragile block facets and angles were observed | Предположенность к хрупкости блока, наличие серых пятен «непропара»<br>Probability of the block fragility, presence of “unsteamed” grey stains |

Добавки известняка и шлака в цементе повышают подвижность (распływ) газобетонной смеси, что способствует возможному снижению В/Т и расходу алюминиевой пудры (пасты) и повышению пластической прочности массива-сырца. Зависимость влияния добавок известняка и шлака на подвижность смеси показана на рис. 1. Известняк и шлак, имеющие различное строение кристаллических поверхностей в сравнении с поверхностью минералов клинкера, обеспечивают устойчивый «эффект подшипника», при котором трение между частицами снижается и подвижность смеси увеличивается [3].

Пластическая прочность массива-сырца зависит от нормальной густоты цементного теста и повышенного содержания трехкальциевого алюмината  $C_3A$ . Данный минерал уменьшает сроки схватывания цемента, так как является самым активно выделяющим тепловую энергию минералом [4]. Пластическая прочность увеличивается с повышением количества  $C_3A$  в цементе (рис. 2). При этом сроки схватывания можно увеличить, если добавить в смесь  $SO_3$ , так как оксид серы замедляет реакции твердения [5].

Повышенное содержание оксида магния в цементе способствует быстрому набору пластической прочности массива-сырца. Зависимость пластической прочности от содержания  $MgO$  представлена на рис. 3. Но также  $MgO$  понижает конечную прочность и плотность. Данный эффект можно объяснить тем, что зерна неактивного  $MgO$  препятствуют образованию пор и взаимодействию  $CaO$  со свободным  $SiO_2$  при тепловлажностной обработке [6, 7].

При гидратации периклаза образуются новые соединения с объемом, превышающим объем самих оксидов. Гидратация  $MgO$  опасна тем, что она происходит после завершения гидратации основных минералов клинкера [8]. Зависимость конечной прочности от содержания  $MgO$  приведена на рис. 4.

В результате этого возможно появление внутренних напряжений, которые могут привести к возникновению трещин. От этого эффекта можно уйти путем «спекания»  $MgO$  повышенным содержанием алюмоферрита кальция  $C_4AF$  [9, 10].

При высоком содержании трехкальциевого силиката  $C_3S$  газобетонные блоки обладают повышенными прочностными показателями, что объясняется взаимодействием  $Ca$  и  $SiO_2$  при автоклавной обработке. Зависимость прочности на сжатие от содержания  $C_3S$  представлена на рис. 5. При взаимодействии кварца с известью в реакцию в первую очередь вступают гидроксильные ионы. Они гидратируют молекулы  $SiO_2$  и делают их способными к последующим реакциям с ионом кальция [11]. При увеличении температуры в автоклаве растворимость  $Ca$  начинает снижаться, а растворимость  $SiO_2$  повышается. Протекает реакция между  $CaO$  и  $SiO_2$ , образующая при этом низкоосновные гидросиликаты кальция. Группы CSH (В) кристаллизуются в виде пластинок, обладающих повышенными значениями прочности [12, 13]. Однако АГБ с высоким количеством образований низкоосновных гидросиликатов кальция группы CSH (В) предрасположен к снижению морозостойкости.

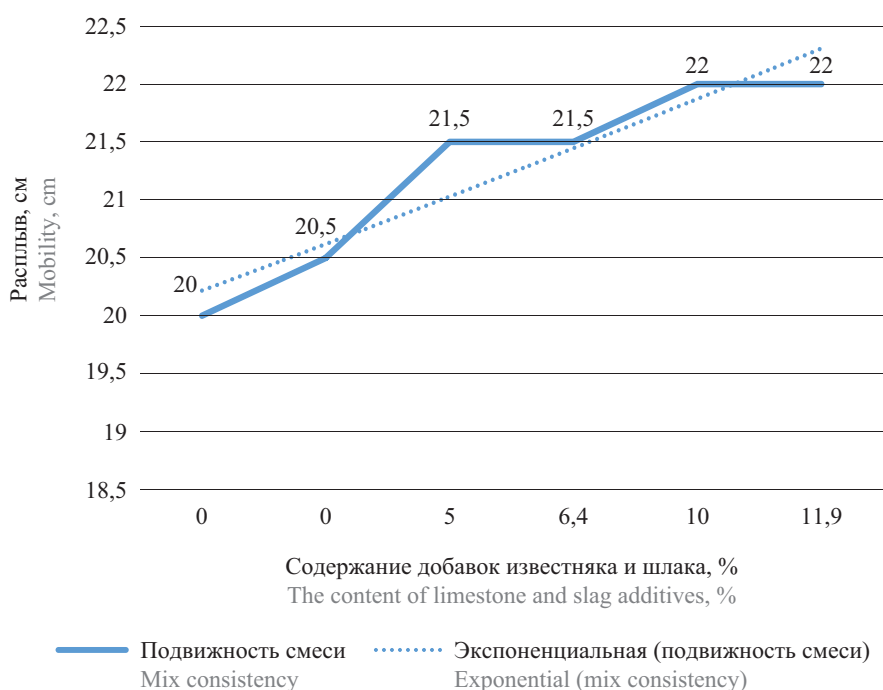


Рис. 1. Влияние добавок известняка и шлака на подвижность смеси

Fig. 1. The effect of limestone and slag additives on the mix consistency

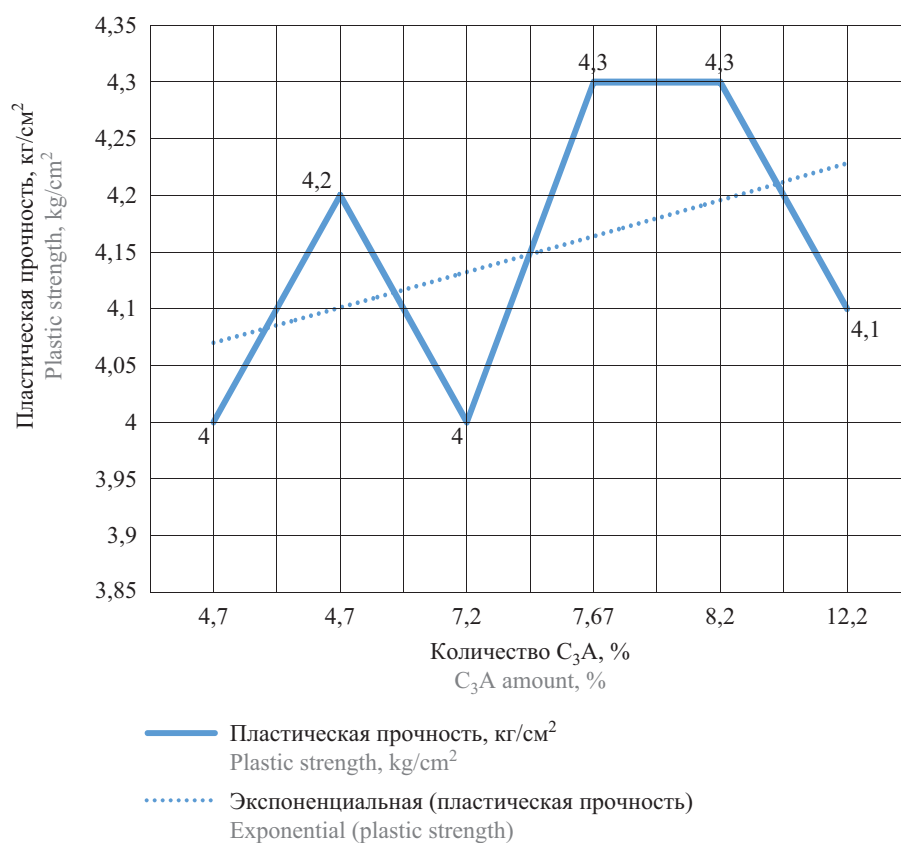


Рис. 2. Зависимость пластической прочности от содержания  $C_3A$

Fig. 2. Dependence of plastic strength on  $C_3A$  content

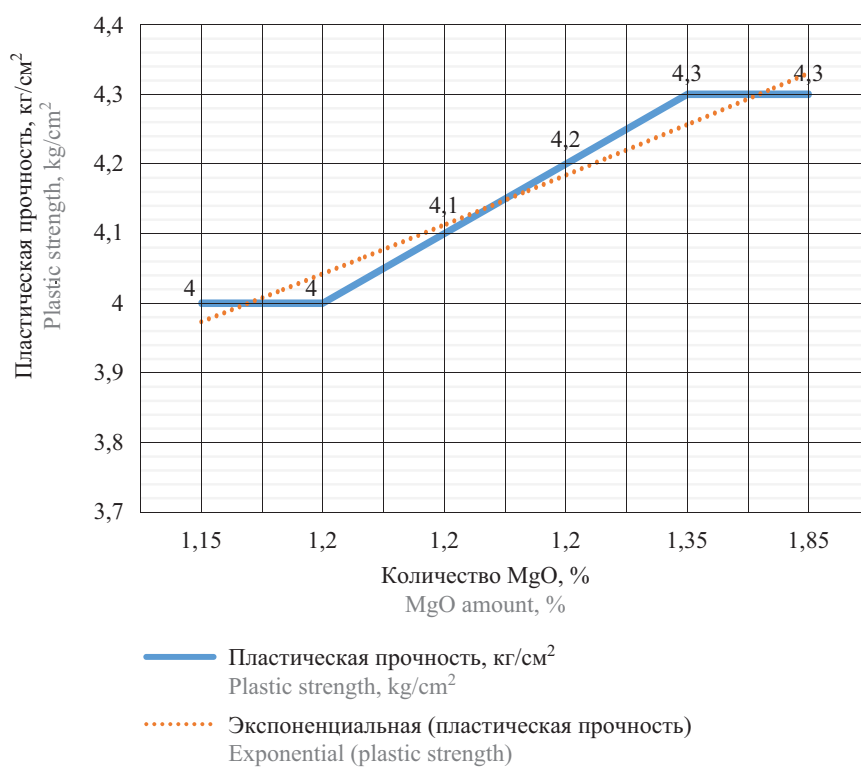


Рис. 3. Зависимость пластической прочности от содержания  $MgO$

Fig. 3. Dependence of plastic strength on  $MgO$  content

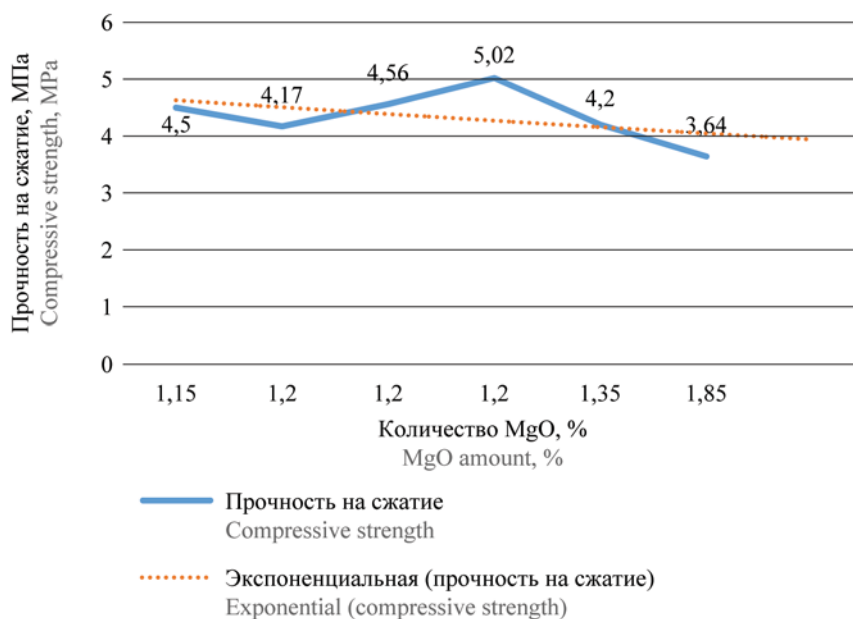


Рис. 4. Зависимость прочности на сжатие от содержания MgO

Fig. 4. Dependence of compressive strength on MgO content

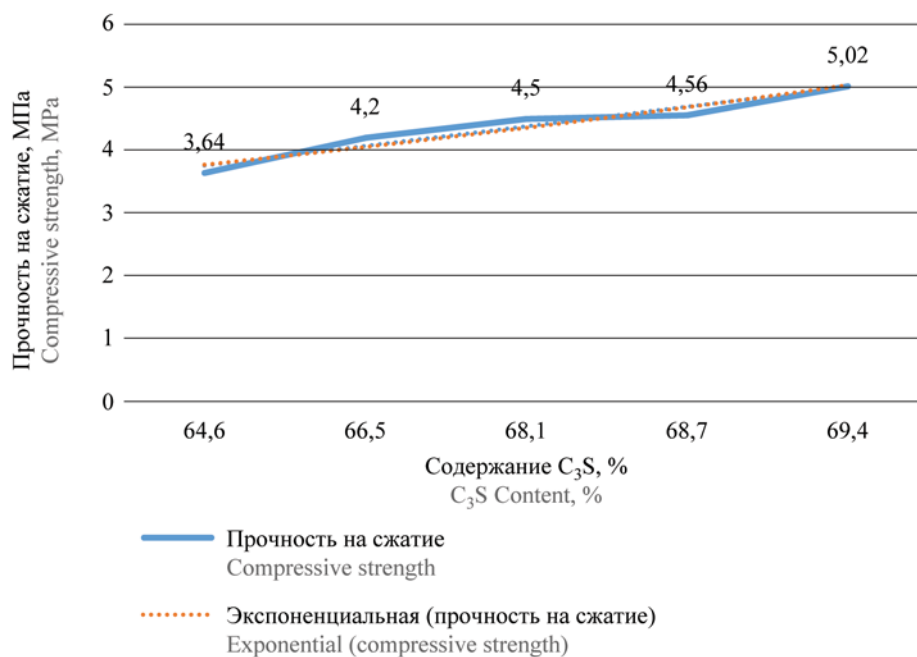


Рис. 5. Зависимость прочности на сжатие от содержания C<sub>3</sub>S

Fig. 5. Dependence of strength on C<sub>3</sub>S content

При одновременно высоком содержании в цементе минералов трехкальциевого силиката C<sub>3</sub>S и четырех-кальциевого алюмоферрита C<sub>4</sub>AF смесь предрасположена к снижению плотности АГБ. Гидроокись кальция, образуясь в процессе взаимодействия портландцемента с водой, при гидролизе трехкальциевого силиката с четырехкальциевым алюмоферритом способствует появлению крупных

пор и более равномерному распределению пор в материале [14]. В газобетонной смеси образовавшаяся ячеистая структура с большим количеством пор способствует снижению плотности и, как следствие, гигроскопичности АГБ. Для возникновения ячеистой структуры, при которой «пузырьки» водорода не будут всплывать и равномерно распределяться в массиве, подъемная сила должна быть уравновешена

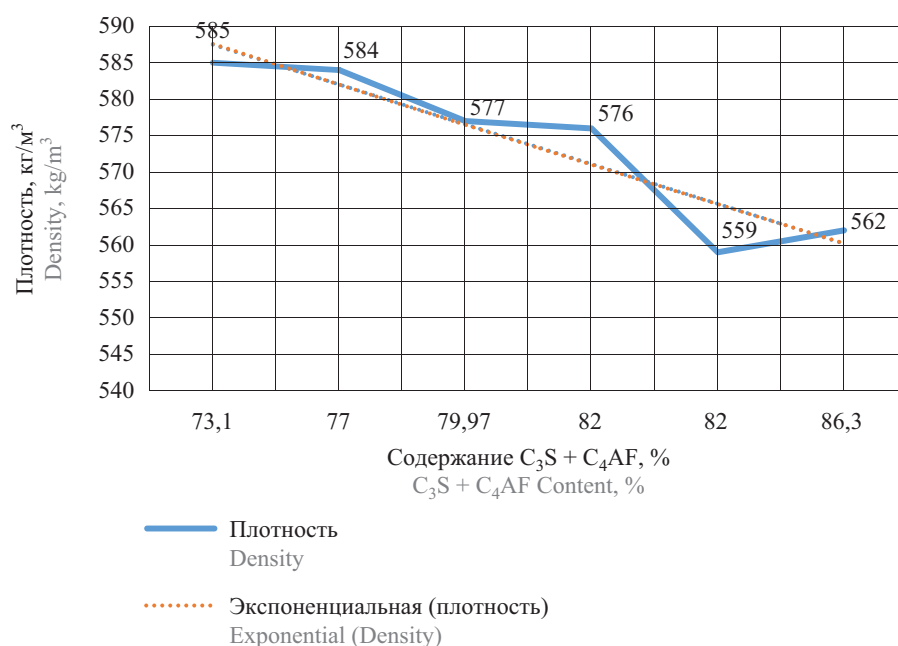


Рис. 6. Зависимость плотности от содержания  $C_3S + C_4AF$

Fig. 6. Dependence of density on the content of  $C_3A + C_4AF$

силой сопротивления среды. С целью предотвращения выхода «пузырьков» и хаотичного распределения поровой структуры следует повысить значение вязкости [15, 16]. Таким образом, взаимодействие  $C_3S + C_4AF$  удовлетворяет условию и способствует понижению конечной плотности АГБ за счет удержания большего количества пор и равномерного их распределения. Зависимость плотности от  $C_3S + C_4AF$  показана на рис. 6.

Высокое количество двухкальциевого силиката  $C_2S$  повышает хрупкость АГБ, что негативно сказывается на производстве, оснащенном делителем готовых массивов. В цикле спуска пара при автоклавной обработке кристаллы белита теряют стабильность своей b-формы, образуя кристаллы зазубренной формы, которые обладают повышенной хрупкостью [17–19]. В ходе тестовых заливок было замечено, что при снижении цемента и увеличении извести количество сколов и подломов от делителя сокращалось.

Большое количество щелочных оксидов в цементе понижает конечную прочность АГБ. Щелочи существенно влияют на образование трехкальциевого силиката. Обычно при заметном количестве калия наблюдается избыток свободного оксида кальция. Объясняется это тем, что  $K_2O \cdot 23CaO \cdot 12SiO_2$  не может вступать в реакцию с  $CaO$  и образовывать трехкальциевый силикат. Однако  $C_2S$  может оказаться недостаточно для связывания этого свободного оксида кальция [20]. При повышенном содержании соединений калия происходит даже разложение  $C_3S$  по схеме  $12(3CaO \cdot SiO_2) + K_2O = K_2O \cdot 23CaO \times 12SiO_2 + 13CaO$ . Расчет показывает, что каждая десятая доля процента  $K_2O$ , способная реагировать

с силикатами, уменьшает максимально возможное количество  $C_3S$  на 2,9 % и высвобождает 0,77 % не связанного оксида кальция [20]. При взаимодействии щелочных оксидов с диоксидом кремния данные оксиды образуют в водной среде силикаты калия и магния, чем препятствуют образованию основных минералов газобетона [21, 22].

В процессе исследования был определен тип цемента, на котором АГБ имеет наибольший коэффициент конструктивного качества:

$$K.K.K. = R_{сж}/d,$$

где  $R_{сж}$  — прочность, МПа;  $d$  — относительная плотность, равная  $\rho_0$ ,  $kg/m^3$ .

- 1) ЦЕМ I 52,5Н = 0,0081;
- 2) ЦЕМ I 42,5Б = 0,0087;
- 3) ПЦ 500-Д0-Н = 0,0073;
- 4) ЦЕМ II/А-К (Ш-И) 42,5Н = 0,0063;
- 5) ЦЕМ II/А-И 42,5Н = 0,0078;
- 6) ЦЕМ II/А-И 42,5Б = 0,0076.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенных исследований выявлено, что свойства газобетонной смеси можно регулировать путем использования цементов различных типов.

Доказано, что правильно подобранный цемент и состав смеси может улучшить прочностные характеристики и снизить среднюю плотность АГБ. В результате был пересмотрен рецепт и произведен АГБ без ухудшения физико-химических, прочностных и эксплуатационных характеристик. Применение

цементов типа ЦЕМ II позволило снизить себестоимость готовой продукции.

По требованиям европейских производителей АГБ (EN 771-4:2011), а также по актуальным ГОСТ 31359-2007 «Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия» и ГОСТ 31360-2007 «Изделия стеновые неармированные из ячеистого бетона автоклавного твердения. Технические условия» в производстве ячеистого бетона рекомендуется применять цементы с отсутствием или минимальным количеством добавок [23, 24]. Однако, исходя

из результатов исследований, видно, что добавки известняка и шлака, содержащиеся в клинкере, положительно влияют на реологические свойства смеси АГБ.

Стоит принять во внимание, что использование цементов типа ЦЕМ II в технологии производства АГБ даст возможность снизить «углеродный след». Вопрос влияния различных типов цемента на физико-химические свойства газобетонной смеси и качество готовой продукции АГБ остается открытым и требует дальнейшего изучения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вишневский А.А., Власова И.Б., Гринфельд Г.И. Современный автоклавный газобетон : сб. докл. V науч.-практ. конф. Пятигорск, 2019. 113 с.
2. Кафтаева М.В. Теоретическое обоснование основных переделов технологии производства ячеистых силикатных материалов автоклавного твердения : дис. ... д-ра техн. наук. Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. 302 с.
3. Кафтаева М.В., Рахимбаев Ш.М., Поспелова Е.А. Исследование фазового состава автоклавных ячеистых бетонов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 12.
4. Joseph S., Skibsted J., Cizer Ö. A quantitative study of the C3A hydration // Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 115. Pp. 145–159. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.10.017
5. Horkoss S., Escadeillas G., Rizk T., Lteif R. The effect of the source of cement  $SO_3$  on the expansion of mortars // Case Studies in Construction Materials. 2016. Vol. 4. Pp. 62–72. DOI: 10.1016/j.cscm.2015.12.004
6. Zhang J. Recent advance of MgO expansive agent in cement and concrete // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. P. 103633. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103633
7. Ruan S., Unluer C. Influence of mix design on the carbonation, mechanical properties and microstructure of reactive MgO cement-based concrete // Cement and Concrete Composites. 2017. Vol. 80. Pp. 104–114. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.03.004
8. Song Q., Su J., Nie J., Li H., Hu Y., Chen Y. et al. The occurrence of MgO and its influence on properties of clinker and cement : A review // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 293. P. 123494. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123494
9. Маракушев А.А. Термодинамика метаморфической гидратации минералов. М. : Наука, 1968. 200 с.
10. Chen Y.-L., Chang J.-E., Lai Y.-C., Chou M.-I.M. A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete: Effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 153. Pp. 622–629. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.116
11. Бедарев А.А., Шмидько Е.И., Резанов А.А. Мультипараметрическая оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 3 (38). С. 15–23. DOI: 10.5862/MCE.38.2
12. Neto J.S.A., Rodríguez E.D., Monteiro P.J.M., De la Torre A.G., Kirchheim A.P. Hydration of C3S and Al-doped C3S in the presence of gypsum // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 152. P. 106686. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106686
13. Сулейманова Л.А., Сулейманов К.А., Погорелова И.А. Топология пор в газобетоне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 5. С. 100–105.
14. Chen G., Li F., Geng J., Jing P., Si Z. Identification, generation of autoclaved aerated concrete pore structure and simulation of its influence on thermal conductivity // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 294. P. 123572. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123572
15. Cuesta A., Santacruz I., Sanfèlix S.G., Fauth F., Aranda M.A.G., De la Torre A.G. Hydration of C4AF in the presence of other phases: A synchrotron X-ray powder diffraction study // Constructing and Building Materials. 2015. Vol. 101. Pp. 818–827. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.114
16. Michaelis W. The hardening process of the colcoreous hydraulic binding materials. Kolloid // Zeitschrift. Dresden, 1999. Pp. 9–22.
17. Bernstein S., Fehr K.T. The formation of 1.13 nm tobermorite under hydrothermal conditions: 1. The influence of quartz grain size within the system  $CaO-SiO_2-D_2O$  // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2012. Vol. 58. Issue 2–3. Pp. 84–91. DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2012.02.006
18. Классен В.К., Долгова Е.П. Хлориды щелочных металлов в производстве цемента : монография. Белгород : Изд-во БГТУ, 2015. 182 с.
19. Marvila M.T., de Azevedo A.R.G., de Oliveira L.B., de Castro Xavier G., Vieira C.M.F. Mechanical, physical and durability properties of

activated alkali cement based on blast furnace slag as a function of % Na<sub>2</sub>O // *Case Studies in Construction Materials*. 2021. Vol. 15. P. e00723. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00723

20. Kipkemboi B., Zhao T., Miyazawa S., Sakai E., Nito N., Hirao H. Effect of C<sub>3</sub>S content of clinker on properties of fly ash cement concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 240. P. 117840. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117840

21. Рояк С.М., Рояк Г.С. Специальные цементы : учебное пособие. М. : Стройиздат, 1983. 279 с.

22. Thomas R.J., Gebregziabihier B.S., Giffin A., Peethamparan S. Micromechanical properties of alkali-activated slag cement binders // *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 90. Pp. 241–256. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.003

23. Боженов П.И. Технология автоклавных материалов : учебное пособие. Л. : Стройиздат, Ленингр. отделение, 1978. 367 с.

24. Левченко В.Н. НААГ: 5 лет поступательно-го развития // Современный автоклавный газобетон : сб. докл. науч.-практ. конф. 2013. С. 5–9.

Поступила в редакцию 23 февраля 2022 г.

Принята в доработанном виде 2 июня 2022 г.

Одобрена для публикации 2 июня 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Александр Олегович Шанин** — магистр кафедры архитектуры и строительных материалов; **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**; 153003, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; РИНЦ ID: 1033779; aleksandr1998yandex@mail.ru;

**Александр Алексеевич Баранов** — главный технолог; **ПК «КУБИ БЛОК Егорьевский»**; 140301, г. Егорьевск, ул. Меланжистов, д. 3Б; baranov.gazobeton@list.ru;

**Елена Валентиновна Жбанова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектуры и строительных материалов; **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**; 153003, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; zhev22@mail.ru;

**Наталья Сергеевна Емельчикова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектуры и строительных материалов; **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**; 153003, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; bobrof53@bk.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Vishnevsky A.A., Vlasova I.B., Grinfeld G.I. *Modern autoclaved aerated concrete : collection of reports of the V scientific and practical conference*. Pyatigorsk, 2019; 113. (rus.).

2. Kaftaeva M.V. *Theoretical substantiation of the main alterations of the production technology of cellular silicate materials of autoclave hardening : dissertation*. Belgorod, BSTU named after V.G. Shukhova, 2013; 302. (rus.).

3. Kaftaeva M.V., Rakhimbaev Sh.M., Pospelova E.A. Autoclaved aerated concrete phase composition research. *Modern Problems of Science and Education*. 2014; 5:12. (rus.).

4. Joseph S., Skibsted J., Cizer Ö. A quantitative study of the C<sub>3</sub>A hydration. *Cement and Concrete Research*. 2019; 115:145-159. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.10.017

5. Horkoss S., Escadeillas G., Rizk T., Lteif R. The effect of the source of cement SO<sub>3</sub> on the expansion of mortars. *Case Studies in Construction Materials*. 2016; 4:62-72. DOI: 10.1016/j.cscm.2015.12.004

6. Zhang J. Recent advance of MgO expansive agent in cement and concrete. *Journal of Building Engineering*. 2022; 45:103633. DOI: 10.1016/j.job.2021.103633

7. Ruan S., Unluer C. Influence of mix design on the carbonation, mechanical properties and microstructure of reactive MgO cement-based concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2017; 80:104-114. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.03.004

8. Song Q., Su J., Nie J., Li H., Hu Y., Chen Y. et al. The occurrence of MgO and its influence on properties of clinker and cement : A review. *Construction and Building Materials*. 2021; 293:123494. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123494

9. Marakushev A.A. *Thermodynamics of metamorphic hydration of minerals*. Moscow, Nauka Publ., 1968; 200. (rus.).

10. Chen Y.-L., Chang J.-E., Lai Y.-C., Chou M.-I.M. A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete: Effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions. *Construction and Building Materials*. 2017; 153:622-629. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.116

11. Bedarev A.A., Shmitko E.I., Rezanov A.A. Multiparametric optimization of cellular silicate con-

crete structure. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 3:15-23. (rus.).

12. Neto J.S.A., Rodríguez E.D., Monteiro P.J.M., De la Torre A.G., Kirchheim A.P. Hydration of  $C_3S$  and Al-doped  $C_3S$  in the presence of gypsum. *Cement and Concrete Research*. 2022; 152:106686. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106686

13. Suleimanova L.A., Suleimanova K.A., Pogorelova I.A. Topology of pores in aerated concrete. *Bulletin of BSTU Named After V.G. Shukhov*. 2016; (5):100-105. (rus.).

14. Chen G., Li F., Geng J., Jing P., Si Z. Identification, generation of autoclaved aerated concrete pore structure and simulation of its influence on thermal conductivity. *Construction and Building Materials*. 2021; 294:123572. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123572

15. Cuesta A., Santacruz I., Sanfeliu S.G., Fauth F., Aranda M.A.G., De la Torre A.G. Hydration of  $C_4AF$  in the presence of other phases: a synchrotron X-ray powder diffraction study. *Constructing and Building Materials*. 2015; 101:818-827. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.114

16. Michaelis W. The hardening process of the col-coreous hydraulic binding materials. *Kolloid. Zeitschrift*. Dresden, 1999; 9-22.

17. Bernstein S., Fehr K.T. The formation of 1.13 nm tobermorite under hydrothermal conditions: 1. The influence of quartz grain size within the system  $CaO-SiO_2-D_2O$ . *Progress in Crystal Growth and*

*Characterization of Materials*. 2012; 58(2-3):84-91. DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2012.02.006

18. Klassen V.K., Dolgova E.P. *Alkali metal chlorides in cement production: Monograph*. Belgorod, Publishing house of BSTU, 2015; 182. (rus.).

19. Marvila M.T., de Azevedo A.R.G., de Oliveira L.B., de Castro Xavier G., Vieira C.M.F. Mechanical, physical and durability properties of activated alkali cement based on blast furnace slag as a function of %  $Na_2O$ . *Case Studies in Construction Materials*. 2021; 15:e00723. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00723

20. Kipkemboi B., Zhao T., Miyazawa S., Sakai E., Nito N., Hirao H. Effect of  $C_3S$  content of clinker on properties of fly ash cement concrete. *Construction and Building Materials*. 2020; 240:117840. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117840

21. Royak S.M., Royak G.S. *Special cements*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983; 279. (rus.).

22. Thomas R.J., Gebregziabihier B.S., Giffin A., Peethamparan S. Micromechanical properties of alkali-activated slag cement binders. *Cement and Concrete Composites*. 2018; 90:241-256. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.003

23. Bozhenov P.I. *Technology of autoclave materials*. Leningrad, Stroyizdat, Leningr. department, 1978; 368. (rus.).

24. Levchenko V.N. NAAG: 5 years of progressive development. *Modern autoclaved aerated concrete: Sat. reports of scientific-practical conference*. 2013; 5-9. (rus.).

Received February 23, 2022.

Adopted in revised form on June 2, 2022.

Approved for publication on June 2, 2022.

**B I O N O T E S:** **Aleksander O. Shanin** — master of the Department of Architecture and Building Materials; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetyevo ave., Ivanovo, 153003, Russian Federation; ID RSCI: 1033779; aleksandr1998yandex@mail.ru;

**Aleksandr A. Baranov** — Chief technologist; **PC “KUBI BLOCK EGORIEVSKY”**; 3B Melangistov st., Egorievsk, 140301, Russian Federation; baranov.gazobeton@list.ru;

**Elena V. Zhbanova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architecture and Building Materials; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetyevo ave., Ivanovo, 153003, Russian Federation; zhev22@mail.ru;

**Natalia S. Emel'chikova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architecture and Building Materials; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetyevo ave., Ivanovo, 153003, Russian Federation; bobrof53@bk.ru.

*Contribution of authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare no conflict of interest.*

## A multifunctional additive for heavy concretes

Mikhail V. Barannikov<sup>1</sup>, Igor' V. Polyakov<sup>2</sup>, Lyubov' A. Vinogradova<sup>1</sup>,  
Vyacheslav S. Polyakov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ivanovo State University of Chemistry and Technology; Ivanovo, Russian Federation;

<sup>2</sup> Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN);  
Moscow, Russian Federation;

<sup>3</sup> Polycom; Ivanovo, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Faster construction and commissioning of industrial and civil facilities is a main factor affecting their operational characteristics at the stage of construction due to high-quality multifunctional additives, having plasticizing properties, coupled with the accelerated curing of composite materials in cement binders. The article addresses a study on the influence of a new multifunctional additive on the physical and mechanical properties of heavy concretes, that determines its plasticizing properties and affects concrete strength.

**Materials and methods.** The study focuses on concrete B30. The Vicat apparatus was used to test the cement paste to identify its normal density and setting time according to GOST 310.3. The strength of cubic specimens was tested using hydraulic press P-120 according to GOST 1080-90.

**Results.** The multifunctional additive was obtained by synthesizing caprolactam mixed with polyalkylene glycol and amino alcohols. The test on the setting time of the cement paste has proven that the multifunctional additive plasticizes, if added to heavy concrete mixes. The impact of the concentration of the multifunctional additive on the setting time, compressive strength and slumping of the concrete mix has been identified. These new data were applied to find the optimal interval of concentrations of the multifunctional additive, added to the concrete mix to make densely reinforced concrete products. The optimal concentration interval is 0.2–0.3 % of the cement mass.

**Conclusions.** The multifunctional additive made of domestic chemical products as a result of the study, improves physical and mechanical characteristics of concrete mixes to be used in the construction of civil and industrial construction facilities.

**KEYWORDS:** heavy concrete, multifunctional additive, caprolactam, setting time, density of cement paste

**FOR CITATION:** Barannikov M.V., Polyakov I.V., Vinogradova L.A., Polyakov V.S. A multifunctional additive for heavy concretes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):720-726. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.720-726

Corresponding author: Mikhail V. Barannikov, newmichael2014@gmail.com.

## Многофункциональная добавка для тяжелого бетона

Михаил Владимирович Баранников<sup>1</sup>, Игорь Вячеславович Поляков<sup>2</sup>,  
Любовь Алексеевна Виноградова<sup>1</sup>, Вячеслав Сергеевич Поляков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ); г. Иваново, Россия;

<sup>2</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН);  
г. Москва, Россия;

<sup>3</sup> Поликом; г. Иваново, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** При строительстве объектов промышленного и гражданского назначения одними из основных факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики, являются сокращение времени строительства и ввода в эксплуатацию. Такие условия возможно обеспечить применением высококачественных многофункциональных добавок, обладающих пластифицирующими свойствами, а также ускоряющих твердение композиционных материалов цементных вяжущих. Рассматриваются влияние новой многофункциональной добавки на физико-механические свойства тяжелой бетонной смеси, определение пластифицирующих свойств и воздействие на прочность бетона.

**Материалы и методы.** Объект исследования — бетон марки В30. Испытания по установлению нормальной густоты цементного теста, сроков схватывания проводили с использованием прибора Вика согласно ГОСТ 310.3. Исследование прочности образцов-кубов выполняли в соответствии с ГОСТ 10180-90 на гидравлическом прессе П-120.

**Результаты.** Получена многофункциональная добавка путем синтеза капролактама в смеси с полиалкиленгликолями и аминокспиртами. На основе результатов определения сроков схватывания цементного теста доказано, что многофункциональная добавка обладает пластифицирующими свойствами при добавлении в тяжелую бетонную смесь.

Выявлено влияние концентрации введенной многофункциональной добавки на сроки схватывания, прочность при сжатии и осадку конуса бетонной смеси, что позволило установить оптимальный интервал концентраций многофункциональной добавки для введения в бетонную смесь для использования ее при изготовлении густоармированных железобетонных изделий, который составил 0,2–0,3 % от массы цемента.

**Выводы.** Полученная многофункциональная добавка на основе продуктов отечественного химического производства увеличивает физико-механические характеристики бетонных смесей. Данные смеси могут применяться в строительстве при возведении гражданских и промышленных сооружений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** тяжелый бетон, многофункциональная добавка, капролактан, сроки схватывания, густота цементного теста

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Баранников М.В., Поляков И.В., Виноградова Л.А., Поляков В.С. A multifunctional additive for heavy concretes // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 720–726. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.720-726

Автор, ответственный за переписку: Михаил Владимирович Баранников, newmichael2014@gmail.com.

## INTRODUCTION

The main tasks of the modern construction sector are to reduce the time, needed to make concrete and reinforced concrete products and to accelerate the standard strength development of concrete [1]. This allows for an increase in the capacity of enterprises engaged in the production of reinforced concrete structures (RCS) [2].

In several articles [3–6], these issues are addressed in details, and current solutions are analyzed. Nevertheless, the task of accelerating the standard strength development of concrete and retention of its high strength properties is relevant.

Concrete hardening can be intensified by using a number of the techniques, including effective complex chemical additives [7, 8]. This work addresses experimental additives that are classified as surfactants on the basis of their physicochemical properties. These additives intensify topochemical processes and contribute to the acceleration of capillary diffusion of mixing water molecules into inner layers of cement particles.

Of practical interest are multifunctional additives, which act as effective plasticizers of concrete mixes and boost concrete strength in early curing stages [9–11]. As a result of metabolic reactions with calcium hydroxide or cement minerals, such additives strongly affect the hydrolysis of three — calcium silicate, increase the amount of calcium and hydroxide ions in the liquid phase of cement, which leads to the supersaturation of the system with these ions and accelerates coagulative and crystalline structurization of new hydrated substances. Due to the accelerated curing of concrete, cement consumption is adjustable, reusability of molds goes up, the amount of energy, consumed by steam curing, is down [12, 13]. In case of cement ageing at positive temperatures, such additives accelerate concrete strength development 1.5–2.0-fold; hence, the strength of concrete thus produced is equal to 60–65 %, and if steam curing is applied, the strength of concrete goes up to 80 % [14, 15]. The time of isothermal heating of concrete, subject to steam curing, may be reduced by 25–30 % and cement consumption is down by 10–15 % [16, 17].

Raw materials, used to obtain this multifunctional additive (MFA), include products of oligomerization of

caprolactam in a mixture of polyalkylene glycol and amino alcohols (TEA, TETA) and in the presence of reaction initiators.

The aim of synthesis of the multifunctional additive was to obtain a product featuring an optimal combination of properties that allow optimizing two processes that are opposite in terms of time and volume, starting from the launch of mixing. At the same time, the most important thing is the wetting ability of the mixing water in the surface layer of cement grains and the velocity of capillary penetration of water molecules into the lower layers of grains [18]. It is known from the literary data that this effect is enhanced by the use of plasticizers, including super- and hyper-plasticizers [19–21], or by increasing the water-cement ratio (W/C) [22]. The final method is used relatively rarely in these conditions, as it reduces concrete strength.

## MATERIALS AND METHODS

To obtain a multifunctional nitrogen-bearing additive, caprolactam, amino alcohols (TEA, TETA), polyalkylene glycols, and reaction initiators were used as reaction initiators. Laboratory specimens of the multifunctional additive were synthesized in a 500 ml three-necked glass flask with a backflow condenser and a thermometer. A portion of the initial caprolactam was loaded into the flask and melted to a temperature of 70–75 °C, then the required amount of distilled water was added as an initiator of the lactam cycle. The caprolactam melt was conditioned for 18–20 min at the above temperature. Further, the pre-set amount of other hand stirred components was added to the flask. Their mixture was prepared separately in a metal glass heated to a temperature of 82–85 °C. After these components were added, the temperature of the reaction mixture was raised to 140–160 °C for the synthesis to last 90 minutes. The resulting additive is a homogeneous light yellow liquid that has non-irritant oil-like smell and unlimited solubility in water.

Concrete B30 (GOST 26633-2015) was employed to conduct the research. The following materials were used to prepare one cubic meter of the concrete mix:

- cement CEM I 42.5 N: 405 kg, GOST 31108-2020;

- quartz sand: 675 kg; fineness modulus: 2.0–2.5 GOST 8736-2014;
- crushed granite gravel: 1,085 kg, grain size 5.0–20.0 mm, GOST 10268-80;
- process water: 162 kg, GOST 23732.

Specimens of concrete mixes were prepared according to GOST 7473-2010.

The influence of the multifunctional additive on physical and mechanical properties of concrete B30 was identified depending on its concentration in the concrete mix, respectively 0.1, 0.3, 0.5 % of the mass of cement. The additive was dissolved in a pre-set amount of water in the process of preparing specimens of concrete mixes. At the same time, it was found that the additive quickly dissolves in water, if the indoor temperature on production premises is above 0–1 °C.

The Vicat apparatus was used to identify the density and curing time of the cement paste according to GOST 310.3.

The strength of cubic specimens was tested using hydraulic press P-120 according to GOST 1080-90. Three cubic specimens were tested on the 1, 3, 7, 14, 28 days of curing in normal conditions at 20–22 °C to calculate the average compressive strength. To calculate the actual strength of the specimens, the  $K = 0.95$  coefficient was used, that took into account the dimensions of molds ( $100 \times 100 \times 100$  mm) used to make the cubic specimens.

## RESULTS

To identify the plasticizing properties of the multifunctional additive, the normal density of the cement paste was identified without the additive, equal to 28 %, and with additives in an amounts of 0.1, 0.3, 0.5 %. The graph (Fig. 1) shows that an increase in the concentration of the additive proportionally reduces the required amount of mixing water while maintaining the normal density of the cement paste in the range of

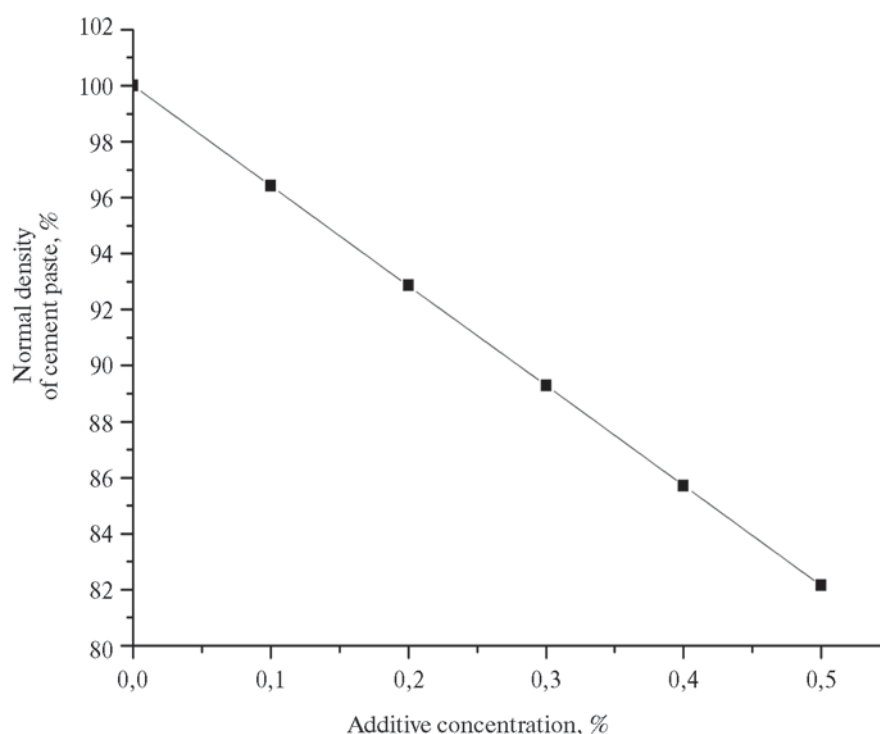
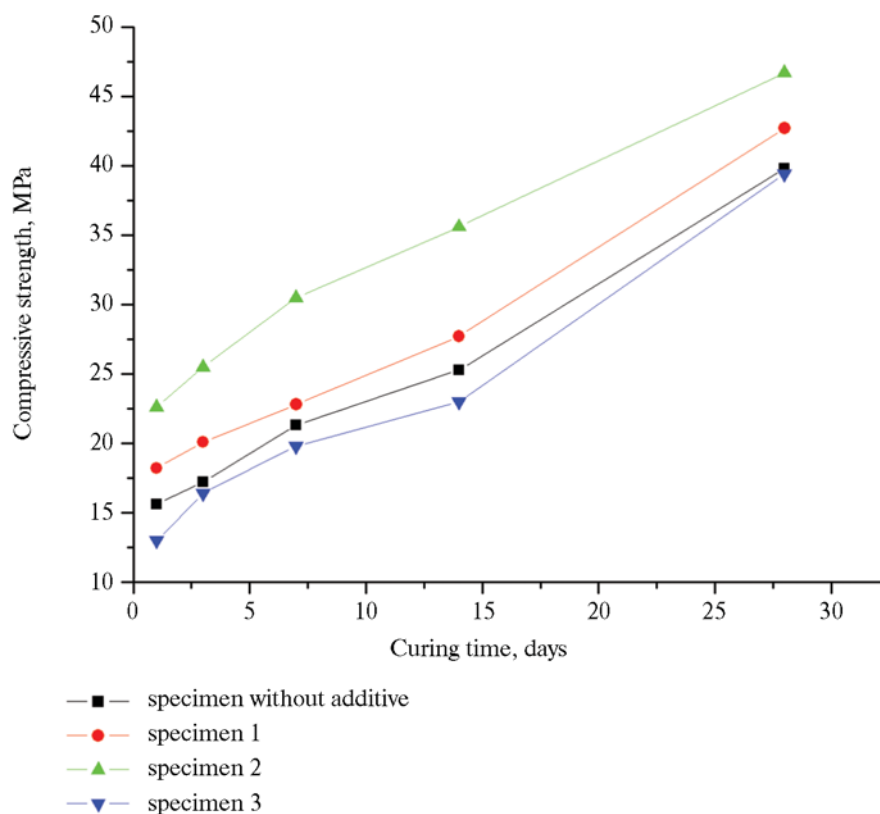


Fig. 1. The influence of the concentration of the additive on a change in the normal density of the cement paste

Physical and mechanical properties of the concrete mix; compressive strength of concrete B30

| Number | Specimens   | Multifunctional additive: concentration, % | Curing time, min |     | Compressive strength, MPa<br>28th day | Cone slump, cm |
|--------|-------------|--------------------------------------------|------------------|-----|---------------------------------------|----------------|
|        |             |                                            | Beginning        | End |                                       |                |
| 1      | No additive | –                                          | 142              | 210 | 39.8                                  | 5.3            |
| 2      | Specimen 1  | 0.1                                        | 178              | 245 | 42.3                                  | 8.5            |
| 3      | Specimen 2  | 0.3                                        | 198              | 294 | 46.7                                  | 16.2           |
| 4      | Specimen 3  | 0.5                                        | 270              | 396 | 39.4                                  | 21.4           |



**Fig. 2.** Compressive strength of the B30 concrete specimens, depending on the concentration of the multifunctional additive that features normal curing

27–29 %. The multifunctional additive in the amount of 0.1 to 0.5 % reduces the amount of mixing water by 7.4–18 % of the original amount without an additive.

The influence of the concentration of the multifunctional additive on the physical and mechanical properties of the concrete mix, the compressive strength of concrete B30 on the 28th day are shown in Table.

The curing time of the cement paste at  $W/C = 0.4$  and the strength of concrete are shown in Table. The data show that the multifunctional additive is an effective plasticizer for a heavy concrete mix, and its concentration of 0.1 and 0.3 % increases the strength of cubic specimens by more than 6 and 17 %, respectively.

The use of the 0.5 % concentration of the multifunctional additive substantially extends the beginning and end of the cement paste curing, that is, the process of transition of the coagulation-crystalline structure of the cement paste into crystalline is slowed down. The factor of a rise in the concentration of the plasticizer determines the slowdown in the growth of strength of Specimen 3 compared to Specimens 1, 2 and the specimen that has no additive (Fig. 2).

The concrete mix that has a multifunctional additive (whose concentration is 0.3 to 0.5 %) can be efficiently used to make densely reinforced concrete products both in the stationary conditions of production of reinforced concrete products and at open construction sites.

Analysis of the data, presented in Table and Fig. 1 and 2, shows that to achieve the consistency of the concrete mix corresponding to the P-4, P-5, the concentration of the multifunctional additive shall reach 0.2–0.3 % of the mass of cement. If the strength of concrete is 80 % of the grade strength on the 28th day, its value for Specimen 1 increases by 10.3 %, Specimen 2 by 22 %, Specimen 3 by 3 %.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

The research has confirmed that the method of synthesis, coupled with the use of domestic components of local raw materials can be employed to make an effective plasticizing additive that rises the consistency of heavy concrete mixes from P-1 to P-5.

The experimental additive rises strength properties of concrete B30 specimens if the concentration of the additive equals 0.2–0.3 % of the mass of cement, which allows qualifying it as a multifunctional additive that has prospects for practical use.

The use of the 0.1, 0.3, 0.5 % concentrations of the multifunctional additive allows rising the standard strength of concrete B30 by 10.3 %; 22 %; 3 %, respectively.

0.4–0.5 % concentrations of the multifunctional additive can be used to prepare heavy concrete mixes to make densely reinforced concrete products and structures.

# REFERENCES

1. Ngugi H.N., Mutuku R.N., Gariy Z.A. Effects of sand quality on compressive strength of concrete: A case of Nairobi County and Its Environs, Kenya. *Open Journal of Civil Engineering*. 2014; 04(03):255-273. DOI: 10.4236/ojce.2014.43022
2. Mikerego E., Niyonzima N., Ntirampeba J.C. Impact of impurities of local construction materials on the bearing capacity of the concrete used in structures in Burundi. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(10):1357-1362. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1357-1362
3. Gora J., Piasta W. Impact of mechanical resistance of aggregate on properties of concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2020; 13:e00438. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00438
4. Hong L., Gu X., Lin F. Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete. *Construction and Building Materials*. 2014; 65:338-349. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.131
5. Kharchenko A.I., Alekseev V.A., Kharchenko I. Ya., Bazhenov D.A. Structure and properties of fine concretes based on composite binders. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(3):322-331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331 (rus.).
6. Rakhimbaev Sh.M., Tolypina N.M., Tolypin D.A. Comparative stability of concrete with aggregates and fillers of different composition. *University news. Construction*. 2018; 10:13-21. DOI: 10.32683/0536-1052-2018-718-10-13-21 (rus.).
7. Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Yurova V.S. Complex organomineral additives with hardening accelerator. *Solid State Phenomena*. 2018; 284:929-935. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.929
8. Smirnov I.R. Complex additives for concrete based on substances of organic and mineral nature. *Science and Technique*. 2022; 21(1):57-62. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-1-57-62 (rus.).
9. Bessaies-Bey H., Khayat K.H., Palacios M., Schmidt W., Roussel N. Viscosity modifying agents: Key components of advanced cement-based materials with adapted rheology. *Cement and Concrete Research*. 2022; 152:106646. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106646
10. Al-Khazraji A.A. Use of plasticizers in cement concrete. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2020; 12(3):599-607. DOI: 10.5373/JARDCS/V12I3/20201229
11. Garzón-Agudelo P.A., Palacios-Alvarado W., Medina-Delgado B. Impact of plasticizers on the physical and structural properties of concrete used in constructions. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 2046(1):012069. DOI: 10.1088/1742-6596/2046/1/012069
12. Leshkanov A., Dobshits L., Anisimov S. Influence of presteaming period and curing temperature on the plasticized concrete strength. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 896(1):012094. DOI: 10.1088/1757-899x/896/1/012094
13. Rasheed A., Usman M., Farooq S., Hanif A. Effect of super-plasticizer dosages on fresh state properties and early-age strength of concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 431:062010. DOI: 10.1088/1757-899x/431/6/062010
14. Langner E.A., Shikhovtsov A.A., Tsarev A.A., Petrosyan V.V. Modern technologies for accelerating concrete strength development. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020; 12(5). (rus.).
15. Loboda K., Zagoruyko T., Zaichenko M. Highperformance concrete with restrained shrinkage. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2018; 131(3):64-67.
16. Usov B.A., Okolnikova G.E. The chemical additives in the prefabricated reinforced concrete technology. *Ecology and Construction*. 2015; 4:7-14. (rus.).
17. Temesheva D.K., Plotnikova L.G. Improving the quality of highly mobile concrete mixes for monolithic construction. *Polzunovskiy Almanac*. 2021; 1:173-175. (rus.).
18. Polyakov I.V., Barannikov M.V., Stepanova E.A. Additives for heavy concrete based on industrial waste from chemical industries. *ChemChemTech*. 2021; 64(4):104-109. DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6330
19. Govin A., Bartholin M.-C., Schmidt W., Grosseau Ph. Combination of superplasticizers with hydroxypropyl guar, effect on cement-paste properties. *Construction and Building Materials*. 2019; 215:595-604. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.137
20. Fares G., Al-Negheimish A., Khan M.I. Polycarboxylate superplasticizer and viscosity modifying agent: Mode of addition and its effect on cement paste rheology using image analysis. *Journal of Building Engineering*. 2022; 48:103946. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103946
21. Vinogradova L.A. Effect of Introducing Poliplast SP-3 Superplasticizer on the Properties of Concrete. *Glass and Ceramics*. 2018; 75(3-4):160-162. DOI: 10.1007/s10717-018-0047-0
22. Alawode O., Idowu O.I. Effects of water-cement ratios on the compressive strength and workability of concrete and lateritic concrete mixes. *The Pacific Journal of Science and Technology*. 2011; 12(2):99-105.

Received May 19, 2022.

Adopted in revised form on May 22, 2022.

Approved for publication on May 30, 2022.

**BIONOTES:** **Mikhail V. Barannikov** — Candidate of Technical Sciences, Researcher, Department of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds; **Ivanovo State University of Chemistry and Technology**; 7 Sheremetevsky av., Ivanovo, 15300, Russian Federation; ID RISC: 891517, Scopus: 57194554340, ResearcherID: X-8173-2018, ORCID: 0000-0003-3908-139X; newmichael2014@gmail.com;

**Igor' V. Polyakov** — postgraduate student, Scientific Center for Nonlinear Wave Mechanics and Technology; **Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN)**; 4 Maly Kharitonevsky lane, Moscow, 101000, Russian Federation; Scopus: 57190391056; polyakovigor009@gmail.com;

**Lyubov' A. Vinogradova** — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associated Professor of the Department Technology of Ceramics and nanomaterials; **Ivanovo State University of Chemistry and Technology**; 7 Sheremetevsky av., Ivanovo, 15300, Russian Federation; ID RISC: 602542, Scopus: 57203041827, ResearcherID: E-9041-2019; lavi@isuct.ru;

**Vyacheslav S. Polyakov** — Candidate of Technical Sciences, Researcher; **Polycom**; 40a 2nd Chapaeva st., Ivanovo, 153048, Russian Federation; vs\_polyakov@mail.ru.

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.  
The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ngugi H.N., Mutuku R.N., Gariy Z.A. Effects of sand quality on compressive strength of concrete: A case of Nairobi County and Its Environs, Kenya // *Open Journal of Civil Engineering*. 2014. Vol. 04. Issue 03. Pp. 255–273. DOI: 10.4236/ojce.2014.43022
2. Микерего Э., Нийонзима Н., Нтирампнеба Ж.К. Impact of impurities of local construction materials on the bearing capacity of the concrete used in structures in Burundi // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 10. С. 1357–1362. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1357-1362
3. Gora J., Piasta W. Impact of mechanical resistance of aggregate on properties of concrete // *Case Studies in Construction Materials*. 2020. Vol. 13. P. e00438. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00438
4. Hong L., Gu X., Lin F. Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 65. Pp. 338–349. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.131
5. Харченко А.И., Алексеев В.А., Харченко И.Я., Баженов Д.А. Структура и свойства мелкозернистых бетонов на основе композиционных вяжущих // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 3. С. 322–331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331
6. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Толыпин Д.А. Сравнительная стойкость бетона с заполнителями и наполнителями разного состава // *Известия вузов. Строительство*. 2018. № 10 (718). С. 13–21. DOI: 10.32683/0536-1052-2018-718-10-13-21
7. Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Yurova V.S. Complex organomineral additives with hardening accelerator // *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284. Pp. 929–935. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.929
8. Смирнов И.Р. Комплексные добавки к бетону на основе веществ органической и минеральной природы // *Наука и техника*. 2022. Т. 21. № 1. С. 57–62. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-1-57-62
9. Bessaies-Bey H., Khayat K.H., Palacios M., Schmidt W., Roussel N. Viscosity modifying agents: Key components of advanced cement-based materials with adapted rheology // *Cement and Concrete Research*. 2022. Vol. 152. P. 106646. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106646
10. Al-Khazraji A.A. Use of plasticizers in cement concrete // *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2020. Vol. 12. Issue 3. Pp. 599–607. DOI: 10.5373/JARDCS/V12I3/20201229
11. Garzón-Agudelo P.A., Palacios-Alvarado W., Medina-Delgado B. Impact of plasticizers on the physical and structural properties of concrete used in constructions // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2046. Issue 1. P. 012069. DOI: 10.1088/1742-6596/2046/1/012069
12. Leshkanov A., Dobshits L., Anisimov S. Influence of presteaming period and curing temperature on the plasticized concrete strength // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 896. Issue 1. P. 012094. DOI: 10.1088/1757-899x/896/1/012094
13. Rasheed A., Usman M., Farooq S., Hanif A. Effect of Super-plasticizer Dosages on Fresh State Properties and Early-Age Strength of Concrete // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 431. P. 062010. DOI: 10.1088/1757-899X/431/6/062010
14. Лангнер Е.А., Шиховцов А.А., Царев А.А., Петросян В.В. Современные технологии ускорения набора прочности бетона // *Вестник Евразийской науки*. 2020. Т. 12. № 5.
15. Loboda K., Zagoruyko T., Zaichenko M. Highperformance concrete with restrained shrinkage // *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil*

Engineering and Architecture. 2018. Vol. 131. Issue 3. Pp. 64–67.

16. Усов Б.А., Окольников Г.Э. Химические добавки в технологии сборного железобетона // Экология и строительство. 2015. № 4. С. 7–14.

17. Темешева Д.К., Плотникова Л.Г. Повышение качества высокоподвижных бетонных смесей для монолитного строительства // Ползуновский альманах. 2021. № 1. С. 173–175.

18. Polyakov I.V., Barannikov M.V., Stepanova E.A. Additives for heavy concrete based on industrial waste from chemical industries // ChemChemTech. 2021. Vol. 64. Issue 4. Pp. 104–109. DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6330

19. Govin A., Bartholin M.-C., Schmidt W., Grosseau Ph. Combination of superplasticizers with hydroxypropyl guar, effect on cement-paste properties //

Construction and Building Materials. 2019. Vol. 215. Pp. 595–604. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.137

20. Fares G., Al-Negheimish A., Khan M.I. Polycarboxylate superplasticizer and viscosity modifying agent: Mode of addition and its effect on cement paste rheology using image analysis // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 48. P. 103946. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103946

21. Vinogradova L.A. Effect of Introducing Poliplast SP-3 Superplasticizer on the Properties of Concrete // Glass and Ceramics. 2018. Vol. 75. Issue 3–4. Pp. 160–162. DOI: 10.1007/s10717-018-0047-0

22. Alawode O., Idowu O.I. Effects of water-cement ratios on the compressive strength and workability of concrete and lateritic concrete mixes // The Pacific Journal of Science and Technology. 2011. Vol. 12. Issue 2. Pp. 99–105.

Поступила в редакцию 19 мая 2022 г.

Принята в доработанном виде 22 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 30 мая 2022 г.

**О Б АВТОРАХ:** Михаил Владимирович Баранников — кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры химии и технологии высокомолекулярных соединений; Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ); 153000, г. Иваново, пр-т Шереметевский, д. 7; РИНЦ ID: 891517, Scopus: 57194554340, ResearcherID: X-8173-2018, ORCID: 0000-0003-3908-139X; newmichael2014@gmail.com;

Игорь Вячеславович Поляков — аспирант, Научный центр нелинейной волновой механики и технологии; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН); 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4; Scopus: 57190391056; polyakovigor009@gmail.com;

Любовь Алексеевна Виноградова — кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры технологии керамики и наноматериалов; Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ); 153000, г. Иваново, пр-т Шереметевский, д. 7; РИНЦ ID: 602542, Scopus: 57203041827, ResearcherID: E-9041-2019; lavi@isuct.ru;

Вячеслав Сергеевич Поляков — кандидат технических наук, научный сотрудник; Поликом; 153048, г. Иваново, ул. 2-я Чапаева, д. 40а; vs\_polyakov@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

# ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 627.8

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.727-737

## Натурный эксперимент по тепловыделению бетона и использование его результатов для верификации программного комплекса ANSYS

Николай Алексеевич Анискин, Алексей Михайлович Шайтанов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В расчетном обосновании массивных бетонных сооружений (гравитационных плотин, массивных фундаментов, опор мостов и т.д.) можно выделить задачи, связанные с их поэтапным возведением. Сложность таких задач определяется большим количеством действующих на температурный процесс факторов, изменяющихся во времени и зависящих в том числе и от температуры. Основным фактором, определяющим температурный режим возводимого бетонного массива, является экзотермический разогрев бетона, зависящий от типа и количества используемого цемента, ряда технологических условий. Сегодня наиболее полно подобные задачи можно решать численным методом конечных элементов, на основе которого создано множество программных продуктов. Один из них — программный комплекс ANSYS, широко используется в расчетах конструкций и сооружений на практически полный комплекс действующих нагрузок и воздействий. Представлены результаты натурных исследований, выполненных с целью получения исходных параметров и проверки достоверности результатов, полученных с использованием математического моделирования на основе программного комплекса ANSYS.

**Материалы и методы.** Приводится описание натурального эксперимента с бетонированием опытного бетонного блока. В процессе укладки и твердения бетона температурными датчиками производился замер температур внутри блока и наружного воздуха во времени. Также для данного блока бетонирования выполнены исследования с использованием численного метода конечных элементов по программному комплексу ANSYS.

**Результаты.** Выполнено сравнение результатов натурального эксперимента с расчетами температурного режима, проведенными по программному комплексу ANSYS. Сравнение показало очень хорошее совпадение результатов. Максимальное расхождение температур в выбранных точках натурной и численной моделей не превосходит 0,6 %.

**Выводы.** Программный комплекс ANSYS позволяет с большой точностью решать сложные задачи по определению температурного режима массивных бетонных конструкций с учетом тепловыделения при гидратации цемента.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** натурный эксперимент, бетонный блок, тепловыделение цемента, температурный режим, численное решение, верификация

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Анискин Н.А., Шайтанов А.М. Натурный эксперимент по тепловыделению бетона и использование его результатов для верификации программного комплекса ANSYS // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 727–737. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.727-737

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Анискин, aniskin@mgsu.ru.

## A full-scale study on the thermal emissivity of concrete and application of its findings to verify ANSYS software package

Nikolai A. Aniskin, Alexey M. Shaytanov

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

### ABSTRACT

**Introduction.** One of the most popular and complex areas in the design of massive concrete structures is the analysis of their thermal behaviour and thermal stress state. Hence, we can identify tasks related to the phased construction of massive concrete structures, such as gravity dams, massive foundations, bridge supports, etc. A large number of factors, influencing the thermal process, varying over time and depending, among other things, on temperature, determine the complexity of such tasks. The main factor, determining the thermal behaviour of mass concrete in the process of construction, is the exothermic heating of concrete, depending on the type and amount of cement used, as well as several process specifications. Today, such problems can be best solved using the numerical finite element method, implemented in numerous software products. One of them is ANSYS software package, which is widely used to analyze constructions and structures in respect of a full range of actual loadings and impacts. This paper presents the results of the field studies conducted to obtain the initial parameters and verify the precision of results obtained using mathematical modeling techniques of the ANSYS software package.

**Materials and methods.** The authors describe a full-scale experiment that entails the concreting of a concrete testing block. During concrete placing and curing, temperature sensors time tested a temperature change inside the block and in the outside air. Also, studies were conducted using the numerical finite element method employed by the ANSYS software package.

**Results.** The findings of a full-scale experiment were compared with the thermal behaviour analysis made by the ANSYS software package. The comparison has proven highly precise results. The maximum temperature difference at the selected points of the full-scale and numerical models does not exceed 0.6 %.

**Conclusions.** The ANSYS software package solves complex tasks with high accuracy; it determines the thermal behaviour of massive concrete structures, taking into account the thermal emissivity during cement hydration.

**KEYWORDS:** full-scale study, concrete block, thermal emissivity of cement, thermal behaviour, numerical solution, verification

**FOR CITATION:** Aniskin N.A., Shaytanov A.M. A full-scale study on the thermal emissivity of concrete and application of its findings to verify ANSYS software package. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):727-737. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.727-737 (rus.).

Corresponding author: Nikolai A. Aniskin, aniskin@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Прогноз температурного режима массивных бетонных конструкций, таких как, например, гравитационные плотины, необходим на стадии проектирования сооружения. При этом рассматриваются строительный и эксплуатационный периоды. Решение этой задачи является весьма сложным ввиду множества действующих и изменяющихся во времени факторов. Вопросы прогнозного моделирования температурного режима и термонапряженного состояния бетонных гравитационных плотин рассматривались в ряде работ как в России, так и за рубежом<sup>1</sup> [1–9]. В последние годы произошли значительные изменения в решении данной проблемы, связанные с развитием технологии возведения массивных бетонных плотин и расчетных методов, позволяющих учитывать множество действующих факторов. Несмотря на это вопросы регулирования температурного режима и термонапряженного состояния сооружения остаются актуальными и сегодня.

Достаточно сложными остаются задачи по определению температурных режимов и термонапряженного состояния возводимых массивных бетонных сооружений, когда одним из основных действующих факторов служит экзотермия цемента<sup>2</sup> [10, 11]. Широкое применение при решении таких проблем нашли численные методы и, прежде всего, метод конечных элементов (МКЭ) [12, 13]. На его основе составлено и успешно используется большое количество программных комплексов, решающих в том числе и температурные задачи [14, 15].

Программный комплекс ANSYS [16] применяется для численного моделирования различных инженерных задач, в том числе для температурных расчетов конструкций и сооружений [17]. С целью проверки достоверности результатов подобных задач,

полученных с помощью ANSYS, проведен натурный эксперимент по наблюдению за тепловыделением бетона. Рассматривался возводимый бетонный блок с теплоизоляцией поверхностей, что позволило создать условия, близкие к адиабатическому процессу. Измерение температур в характерных точках конструкции во времени производилось температурными датчиками.

Для данной температурной задачи осуществлено численное моделирование на основе МКЭ с применением программного комплекса ANSYS. Сравнили результаты натурного эксперимента с расчетами температурного режима, выполненными по программному комплексу ANSYS. Сравнение показало очень хорошее совпадение результатов. Максимальное расхождение температур в выбранных точках натурной и численной моделей не превышает 0,6 %.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Постановка натурного эксперимента

Опытный блок, его размеры и схема установки температурных датчиков показаны на рис. 1. Заливка бетона в блок производилась в течение четырех часов слоями.

Форма блока из фанеры толщиной 20 мм изнутри утеплена слоем экструдированного пенополистирола толщиной 100 мм, снаружи конструкция укрыта тентом.

Для изготовления бетона использовался цемент быстротвердеющий, класса 52,5 с расходом 490 кг/м<sup>3</sup>. Расход воды — 170 л/м<sup>3</sup> (В/Ц = 0,34). В качестве заполнителей применялись песок, керамзит, щебень. Плотность бетона составила 2050 кг/м<sup>3</sup>.

Снятия показаний температурных датчиков, температуры под тентом и температуры воздуха производились в течение 256 часов с момента окончания бетонирования с шагом по времени 4 ч.

Для создания адекватной математической модели были определены расчетные характеристики исследуемой конструкции и материала.

<sup>1</sup> Thermal analysis of a RCC dam during construction // 7th Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams. 2003.

<sup>2</sup> ICOLD Bulletin 75. Roller-compacted concrete for gravity dams.

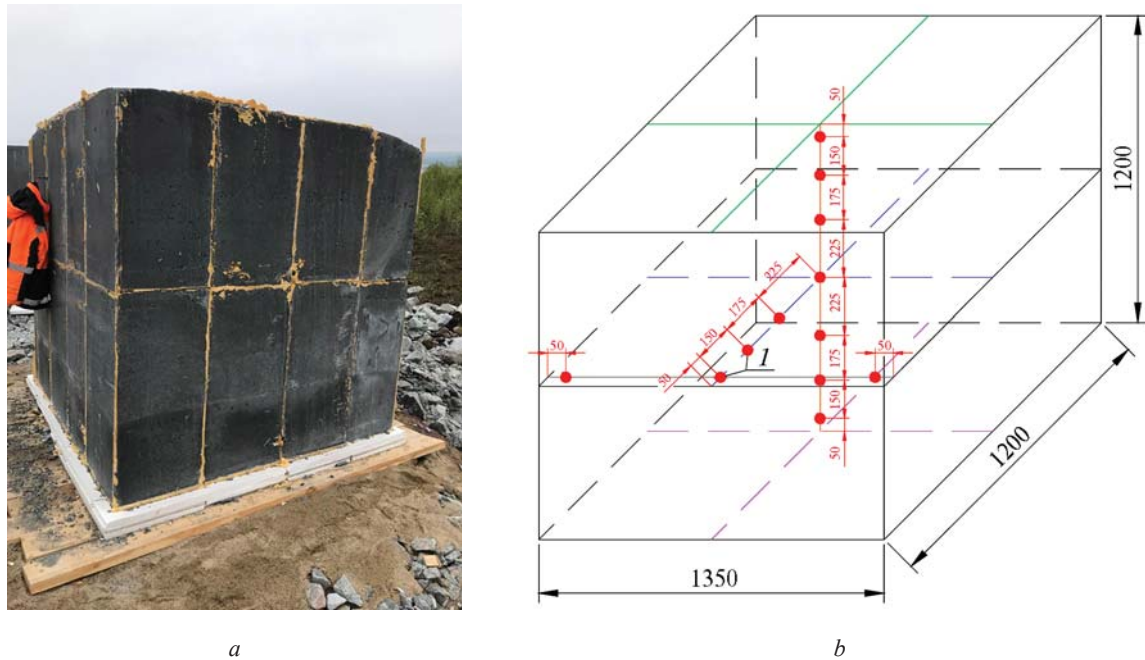


Рис. 1. Опытный блок бетонирования: *a* — вид на выполненный опытный блок; *b* — схема блока и установки температурных датчиков; *I* — температурные датчики

Fig. 1. A tested concrete block: *a* — the appearance of a completed block to be tested; *b* — the block design and the layout of temperature sensors; *I* — temperature sensors

**Коэффициент теплопроводности** бетона принят  $\lambda = 0,75 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  (в соответствии с ГОСТ 25820 для керамзитобетона D2000).

**Объемная теплоемкость** бетонной смеси определялась в зависимости от расходов и удельных теплоемкостей компонент бетонной смеси:

$$C_{\text{вб.с}} = C_{\text{уд.т.ф}}(m_{\text{ц}} + m_{\text{зап}}) + C_{\text{уд.в}}m_{\text{в}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{уд.т.ф}}$  — удельная теплоемкость твердой фракции (если удельные теплоемкости составляющих неизвестны, принимается равной  $840 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ );  $C_{\text{уд.в}}$  — удельная теплоемкость воды, принимается равной  $3760 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $m_{\text{ц}}$ ,  $m_{\text{зап}}$ ,  $m_{\text{в}}$  — расход компонентов,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

**Удельная теплоемкость** бетонной смеси вычислялась путем деления объемной теплоемкости на плотность бетона.

На основании исходных данных были установлены объемная теплоемкость бетона  $C_{\text{вб.с}} = 2218 \text{ КДж}/\text{м}^3 \cdot \text{К}$  (по формуле (1)) и удельная теплоемкость  $C_{\text{уд}} = 1,082 \text{ КДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ .

Для корректировки параметров тепловыделения проведена оценка потерь тепла за счет конвективного теплообмена с окружающей средой на границах блока.

Термическое сопротивление  $R(\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт})$  теплоизоляции поверхности может быть определено следующим образом [18, 19]:

$$R = \delta/\lambda, \quad (2)$$

где  $\delta$  — толщина теплоизолирующего материала, м;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности изолирующего материала,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

В рассматриваемом случае теплоизоляция блока состоит из двух слоев:

- слоя пенополистирола толщиной 100 мм с коэффициентом теплопроводности по данным производителей «ТЕХНОНИКОЛЬ», «ПЕНОПЛЕКС» и др. — от 0,028 до 0,031  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , тогда термическое сопротивление слоя составляет  $R = 3,226 - 3,570 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;
- слоя фанеры толщиной 20 мм с коэффициентом теплопроводности 0,12  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , тогда термическое сопротивление —  $R = 0,167 - 0,2 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

Суммарное термическое сопротивление теплоизоляции блока составляет  $R_{\text{сум}} = 3,393 - 3,771 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , а коэффициент теплопередачи соответственно  $a_k = 0,265 - 0,295$ .

Величина удельного теплового потока может быть определена по формуле [18, 19]:

$$q_k = a_k(t - t_c). \quad (3)$$

Суммарные потери тепла через поверхность площадью  $A$  за время  $\tau$  определяются вычислением интеграла:

$$Q_{\text{п}} = \int_0^{\tau} A q_k(\tau) d\tau. \quad (4)$$

По зависимости (4) с использованием экспериментальных данных были рассчитаны теплотери

для 1/8 блока бетонирования, учитывая его практически полную симметрию. В расчетах принято наиболее неблагоприятное максимальное значение коэффициента теплопередачи  $a_k = 0,295$ . В качестве значений температур на внутренней поверхности теплоизоляции принималась температура в датчике, расположенном на расстоянии 50 мм от поверхности блока, на внешней поверхности теплоизоляции принималась измеряемая температура в пространстве под тентом. Полученная величина суммарных теплопотерь на момент окончания эксперимента (256 ч) составила 17,1 МДж, а интенсивность потерь при выполнении эксперимента практически не меняется.

Величина тепловыделения цемента  $q$ , Дж/кг, может быть определена по результатам эксперимента:

$$q = C_v / m_{\text{ц}} (t - t_0), \quad (5)$$

где  $C_v$  — объемная теплоемкость бетонной смеси, Дж/м<sup>3</sup> · К;  $m_{\text{ц}}$  — расход цемента, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  — температура бетона, °С;  $t_0$  — начальная температура бетонной смеси, °С.

Полное тепловыделение гидратации цемента  $Q_{\text{ц}}$ , Дж, в блоке объемом  $V$  при расходе цемента  $m_{\text{ц}}$  за рассматриваемый интервал времени  $\tau$  определяется интегрированием:

$$Q_{\text{ц}} = \int_0^{\tau} V m_{\text{ц}} q(\tau) d\tau. \quad (6)$$

Для рассматриваемой конструкции уравнение теплового баланса может быть записано в виде:

$$Q = Q_{\text{ц}} - Q_{\text{п}}. \quad (7)$$

При обеспечении условий адиабатического процесса потери  $Q_{\text{п}}$  были бы равны нулю. Величина удельного тепловыделения откорректирована применительно к адиабатическому процессу путем введения в уравнение теплового баланса поправки на теплопотери за счет теплообмена с окружающей средой. На рис. 2 представлены графики кривых удельного тепловыделения исходной, полученной из эксперимента и рассчитанной с учетом поправки. Удельное тепловыделение цемента на момент времени окончания эксперимента (256 ч) с учетом корректировки составило 358 кДж/кг, что хорошо согласуется с нормативными данными для высокомарочных быстротвердеющих цементов<sup>3, 4</sup>. График изменения температуры воздуха, построенный на основе натуральных измерений, представлен на рис. 3.

<sup>3</sup> ГОСТ 31108-2016. Цементы общестроительные. Технические условия. М. : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2016.

<sup>4</sup> ASTM C150/C150M-21. Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

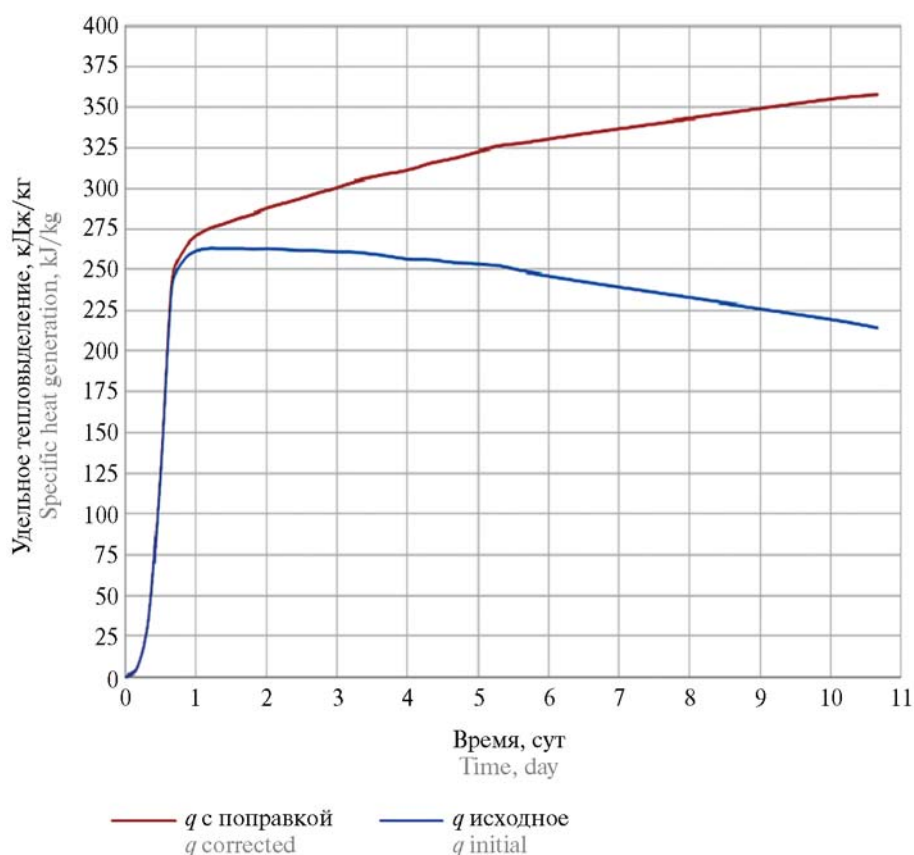


Рис. 2. Графики удельного тепловыделения цемента (Дж/кг) исходный и с учетом поправки

Fig. 2. Initial and adjusted graphs of specific thermal emissivity of cement (J/kg)

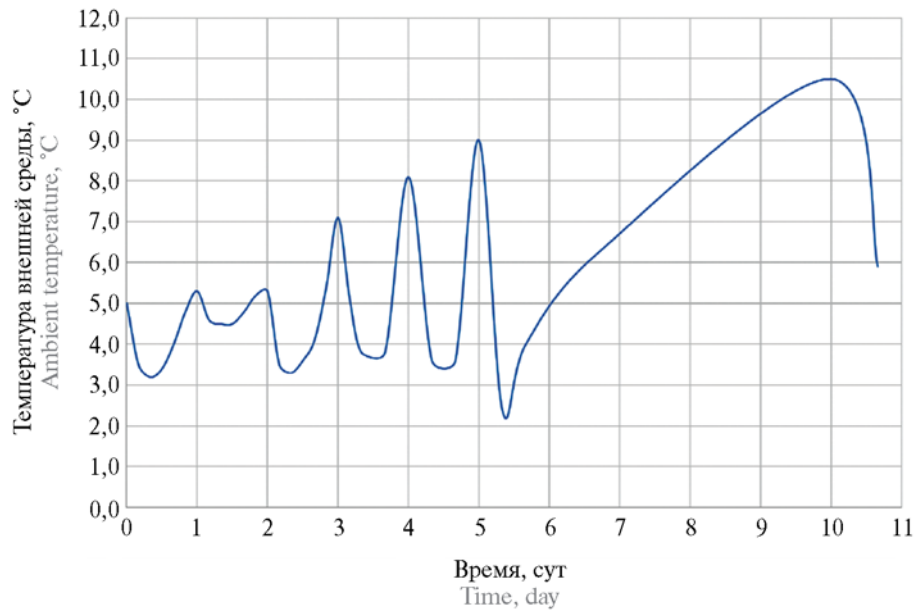


Рис. 3. График изменения температуры внешней среды

Fig. 3. Graph of changes in the outdoor temperature

### Теоретические основы решения температурной задачи

Численное моделирование температурной нестационарной задачи с учетом тепловыделения при гидратации цемента основывается на решении основного дифференциального уравнения теории теплопроводности с внутренними источниками тепла [18, 19]:

$$k\nabla^2 T + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (8)$$

где  $k$  — теплопроводность материала,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $T$  — температурная функция,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $Q$  — теплота, выделяемая в процессе гидратации,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ;  $\rho$  — плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  — удельная теплоемкость материала,  $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau$  — время, сут.

Величина теплоты, выделяемой в процессе гидратации, определяется как:

$$Q = \text{Ц}\text{Э}, \quad (9)$$

где  $\text{Ц}$  — расход цемента на кубометр бетона,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\text{Э}$  — максимальное тепловыделение цемента,  $\text{кДж}/\text{кг}$ .

В качестве граничного условия на внешней границе блока рассматривалось граничное условие 3-го рода (конвективный теплообмен) в виде [18, 19]:

$$-\lambda \delta t / \delta n = a_k (t - t_c), \quad (10)$$

где  $a_k$  — коэффициент теплоотдачи.

### Математическое моделирование

Математическое моделирование температурного режима опытного бетонного блока было реализовано с использованием программного комплекса ANSYS [16]. Рассматривалась 1/8 блока (с учетом симметрии конструкции). Размеры моделируемой части блока в плане —  $600 \times 675$  мм, высота — 600 мм. Моделируемая область аппроксимировалась конечными элементами типа SOLID70 [16]. Общее количество элементов — 2016, узлов — 2535. Основные параметры модели, принятые в расчетах, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Основные параметры численной модели

Table 1. Basic parameters of the numerical model

| Номер<br>Number | Параметр<br>Parameter                                               | Размерность<br>Measurement unit                                                               | Величина<br>Value             |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1               | Размеры по осям X-Y-Z<br>X-Y-Z dimensions                           | м<br>m                                                                                        | $0,675 \times 0,6 \times 0,6$ |
| 2               | Плотность бетона<br>Concrete density                                | $\text{кг}/\text{м}^3$<br>$\text{kg}/\text{m}^3$                                              | 2050,0                        |
| 3               | Коэффициент теплопроводности<br>Coefficient of thermal conductivity | $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$<br>$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ | 0,75                          |

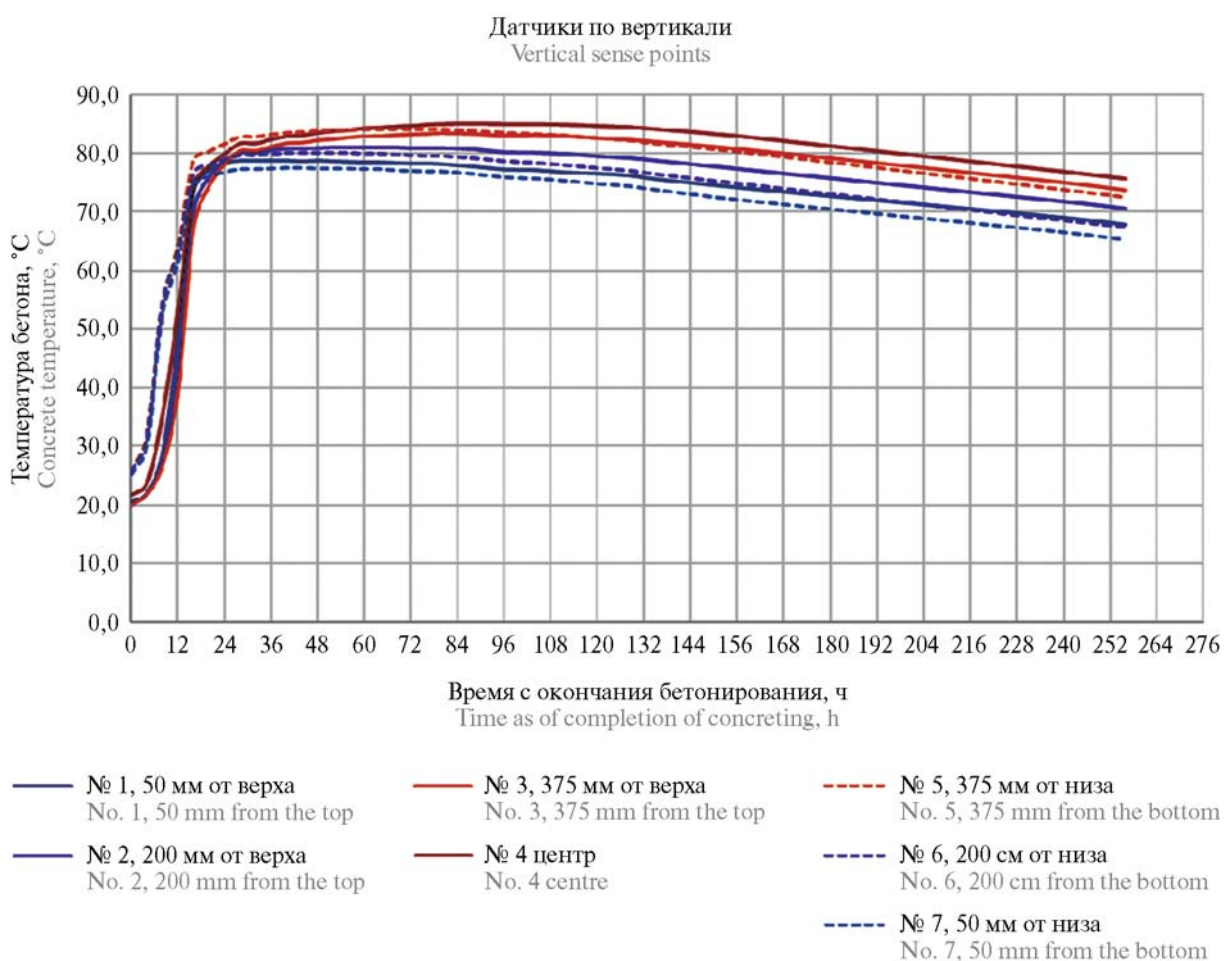
| Номер<br>Number | Параметр<br>Parameter                                                           | Размерность<br>Measurement unit                     | Величина<br>Value |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------|
| 4               | Удельная теплоемкость<br>Specific heat capacity                                 | Дж/(кг · °С)<br>J/(kg · °C)                         | 1082,0            |
| 5               | Коэффициент конвективной теплоотдачи<br>Convective heat transfer coefficient    | Вт/(м <sup>2</sup> · °С)<br>W/(m <sup>2</sup> · °C) | 0,27              |
| 6               | Расход цемента<br>Cement consumption rate                                       | кг/м <sup>3</sup><br>kg/m <sup>3</sup>              | 490,0             |
| 7               | Начальная температура бетонной смеси<br>Initial temperature of the concrete mix | °С                                                  | 21,0              |
| 8               | Общее время натурного эксперимента<br>Total time of a full-scale experiment     | ч<br>hour                                           | 256,0             |
| 9               | Шаг расчета по времени<br>Calculation time step                                 | ч<br>hour                                           | 1,0               |

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Результаты натурного эксперимента

Результаты эксперимента в виде графиков изменения температуры в точках установки датчиков представлены на рис. 4. Максимальная температура

в центре блока составила 85,2 °С. Максимальная разница между температурой в центре блока и точкой, удаленной от внешней поверхности блока на 50 мм, составляет 10,5 °С на вертикальной оси и 9,0 °С — на горизонтальной.



a

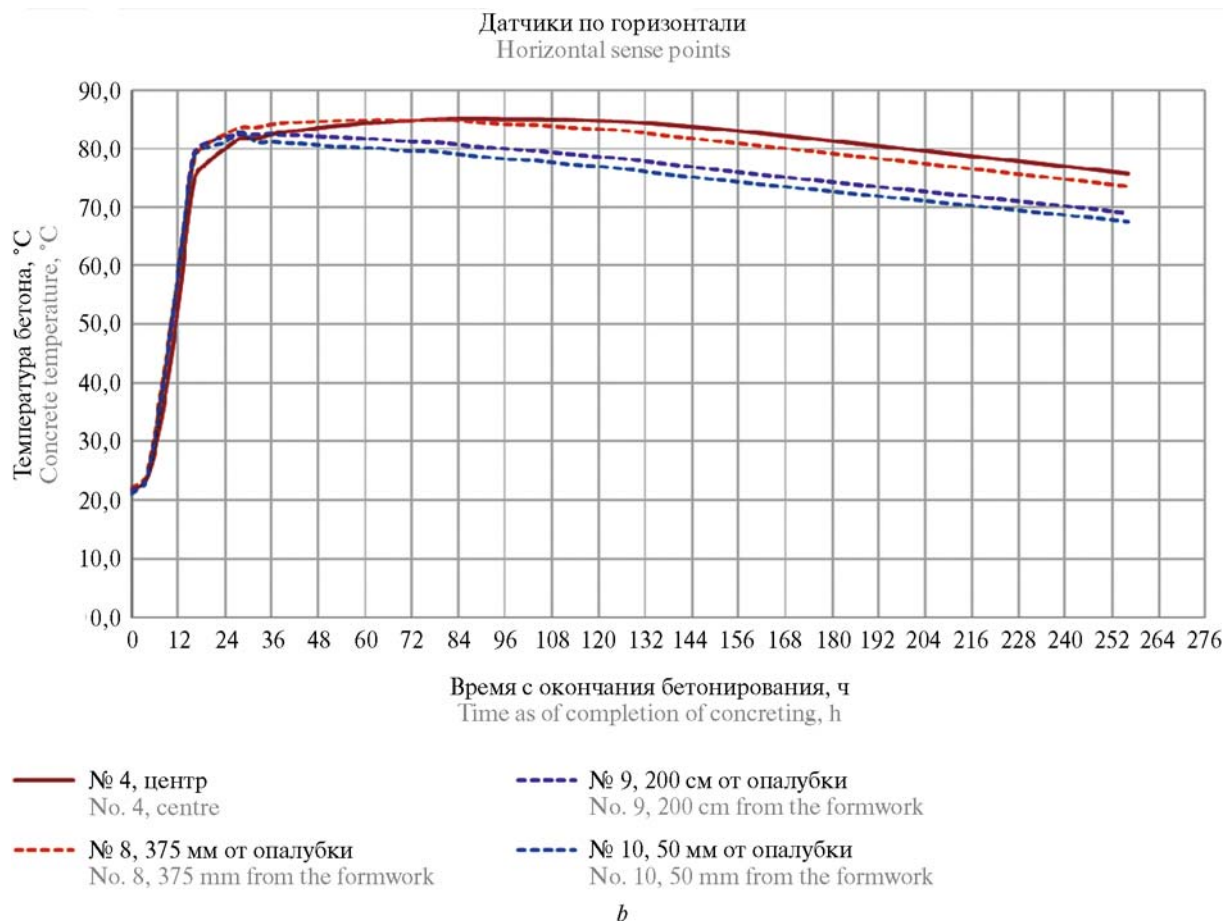


Рис. 4. Графики изменения температуры в точках установки датчиков: *a* — в датчиках по вертикали; *b* — в датчиках по горизонтали

Fig. 4. Graphs of temperature change at sense points: *a* — vertical sense points; *b* — horizontal sense points

### Результаты численного моделирования

Результаты математического моделирования представлены в виде изополей температуры в модели на различные моменты времени (рис. 5) и графиков изменения температуры в контрольных точках 1, 4 (рис. 6), а также в виде таблиц отклонений полученных расчетных температур от измеренных в эксперименте (табл. 2).

Результаты расчетных исследований с использованием математического моделирования в программном комплексе ANSYS показывают высокую достоверность. Отклонения по максимальным температурам в контрольных точках не превышают 1 %.

По контрольным точкам № 1 и 2 получена почти 100%-ная сходимость. В контрольной точке № 4 на завершающем временном отрезке наблюдаются незначительные отклонения, не превышающие 3,5 %.

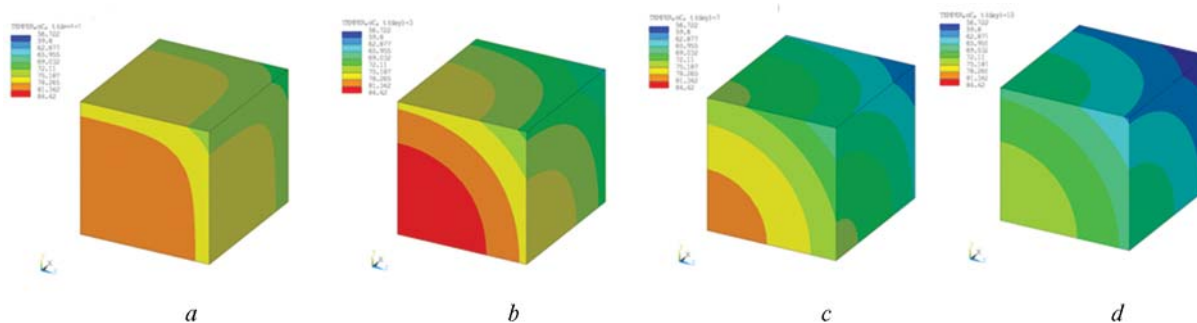


Рис. 5. Изополя температуры в момент времени: *a* — 1 сут; *b* — 3 сут; *c* — 7 сут; *d* — 10 сут

Fig. 5. Temperature isofields at a point in time: *a* — 1 day; *b* — 3 days; *c* — 7 days; *d* — 10 days

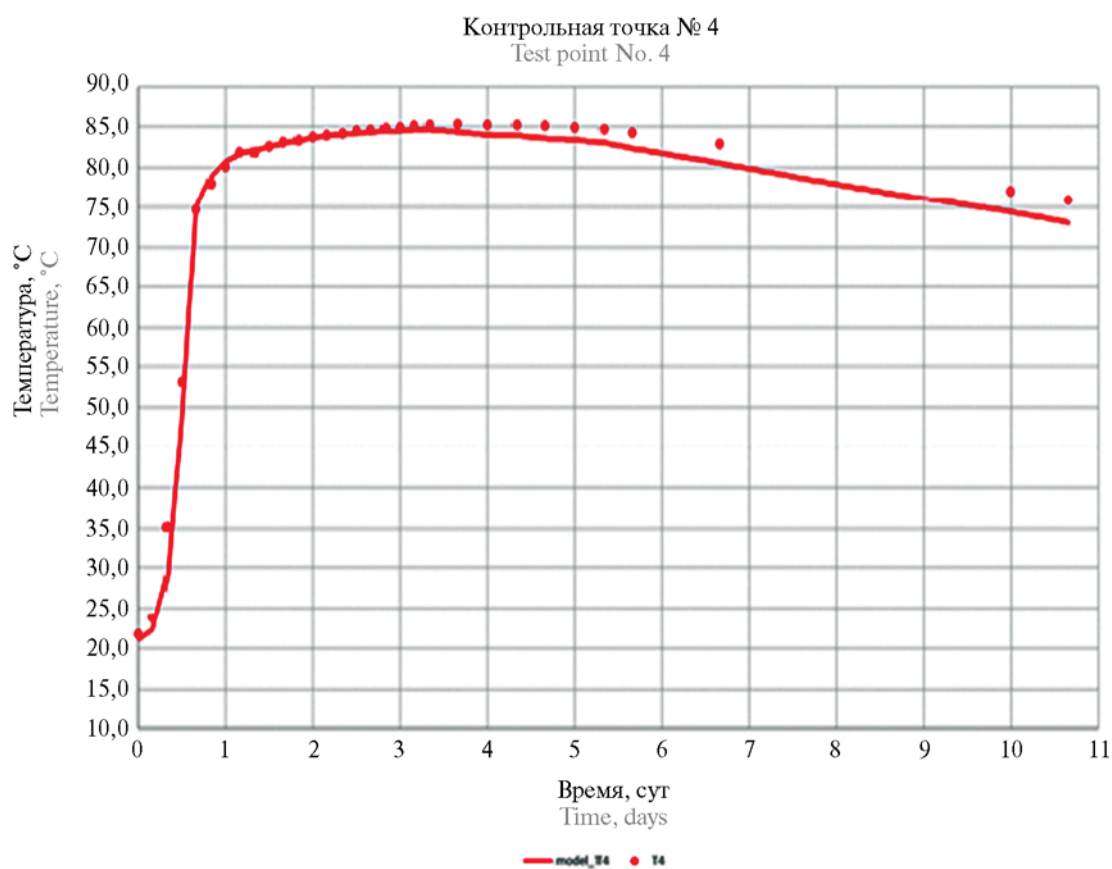
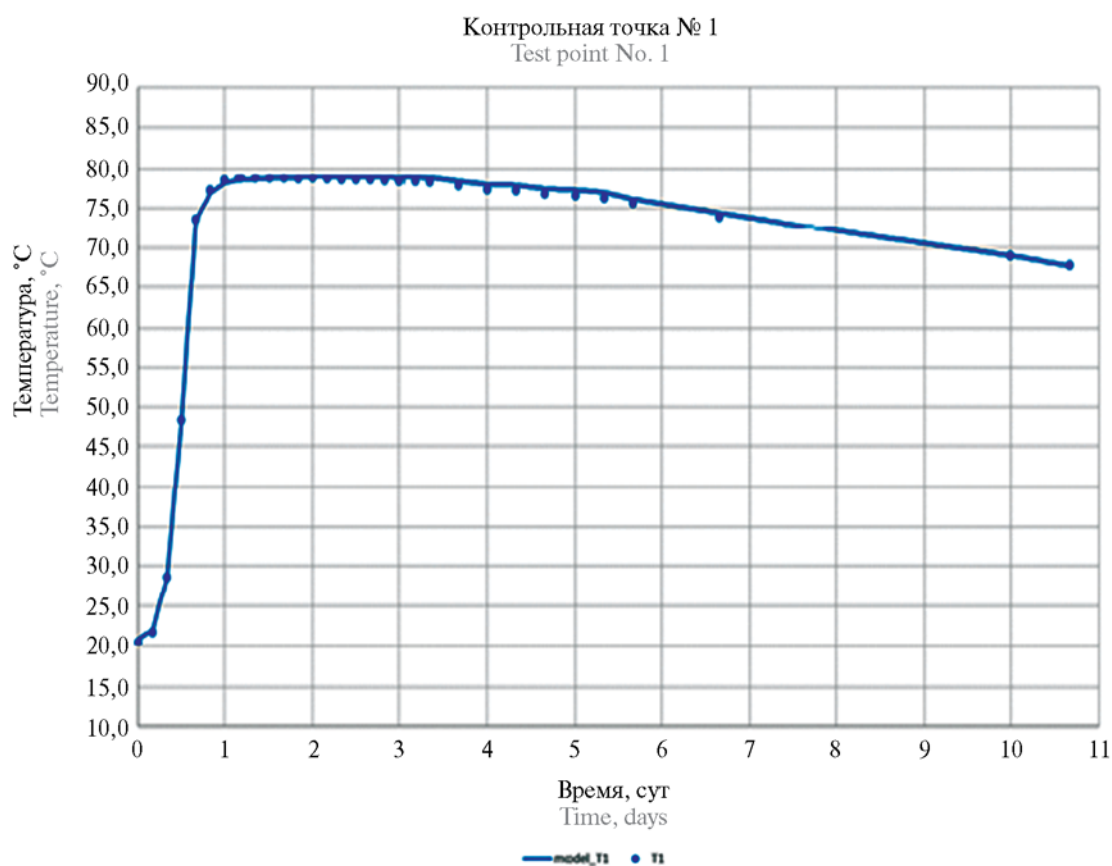


Рис. 6. Графики изменения температуры в контрольных точках 1, 4

Fig. 6. Graphs of temperature changes at test points 1, 4

Это обусловлено тем, что корректировка кривой тепловыделения осуществлялась по показаниям температурных датчиков в контрольной точке № 1. Точки наблюдения находятся в разных условиях и влияние теплопотерь на внешних границах блока бетонирования выше, что подтверждается и максимальными значениями температуры (разница максимальной температуры в точках № 1 и 4 составляет 6,5 °С). При адиабатических условиях разница температур будет сведена к нулю.

**Табл. 2.** Максимальные значения и отклонения температур в контрольных точках

**Table 2.** Maximum temperature values and deviations at test points

| Контрольная точка<br>Test point                             | № 1   | № 2   | № 3   | № 4   |
|-------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Эксперимент, $t_{\max}$ , °С<br>Experiment, $t_{\max}$ , °С | 78,7  | 81,0  | 83,5  | 85,2  |
| Модель, $t_{\max}$ , °С<br>Model, $t_{\max}$ , °С           | 78,85 | 81,64 | 83,66 | 84,55 |
| Отклонение, %<br>Deviation, %                               | 0,20  | 0,80  | 0,20  | –0,76 |

Результаты расчетных исследований с использованием математического моделирования в программном комплексе ANSYS показывают высокую достоверность. Отклонения по максимальным температурам в контрольных точках не превышают 1 %.

По контрольным точкам № 1 и 2 получена почти 100%-ная сходимость. В контрольной точке № 4

на завершающем временном отрезке наблюдаются незначительные отклонения, не превышающие 3,5 %. Это обусловлено тем, что корректировка кривой тепловыделения осуществлялась по показаниям температурных датчиков в контрольной точке № 1. Точки наблюдения находятся в разных условиях и влияние теплопотерь на внешних границах блока бетонирования выше, что подтверждается и максимальными значениями температуры (разница максимальной температуры в точках № 1 и 4 составляет 6,5 °С). При адиабатических условиях разница температур будет сведена к нулю.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный натурный эксперимент позволил получить подробную и достоверную картину формирования температурного режима уложенного бетонного блока и получить исходные параметры для математического моделирования.

Выполнено сравнение результатов натурного и математического моделирования. Результаты расчетных исследований с использованием математического моделирования в программном комплексе ANSYS показали высокую достоверность. Отклонения по максимальным температурам в контрольных точках не превысили 1 %. Полученный результат продемонстрировал, что программный комплекс ANSYS является высокоточным математическим инструментом моделирования теплофизических процессов и может быть использован для достоверного прогнозирования температурного режима бетонного сооружения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гинзбург С.М., Рукавишников Т.Н., Шейнкер Н.Я. Имитационные модели для оценки температурного режима бетонной плотины на примере Бурейской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2002. Т. 241. С. 173–178.
2. Гинзбург С.М., Рукавишников Т.Н., Шейнкер Н.Я. Применение имитационных моделей при идентификации параметров температурного режима бетонных массивов со стадии возведения // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2002. Т. 241. С. 178–187.
3. Дзюба К.И. Применение численных методов для исследования термонапряженного состояния гидросооружений // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Л. : Энергия, 1975. № 103. С. 9–13.
4. Aniskin N., Nguyen T. A Numerical model for the temperature regime of a concrete gravity dam in the climatic conditions of Northern Vietnam // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 883. Issue 1. P. 012040. DOI: 10.1088/1757-899X/883/1/012040
5. Aniskin N., Shaytanov A., Shaytanov M., Khokhotva S. Low-cement content gravity dam as an alternative for Pskem HPP // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 02028. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302028
6. Nagayama I., Jikan S. 30 Years' History of roller-compacted concrete dams in Japan // Roller Compacted Concrete Dams. 2003. Pp. 27–38.
7. Aniskin N., Nguyen T.C. Prediction of thermal stress in a concrete gravity dam // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Issue 1. P. 012144. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012144
8. Bofang Z. Thermal stresses and temperature control of mass concrete. Published by Elsevier Inc., 2014. 487 p. DOI: 10.1016/C2012-0-06038-3
9. Zhao Y., Li G., Fan C., Pang W., Wang Y. Effect of thermal parameters on hydration heat temperature and thermal stress of mass concrete // Advances in Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 2021. Pp. 1–16. DOI: 10.1155/2021/5541181

10. Wanga L., Yang H.Q., Zhou S.H., Chen E., Tang S.W. Mechanical properties, long-term hydration heat, shrinkage behavior and crack resistance of dam concrete designed with low heat Portland (LHP) cement and fly ash // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 187. Pp. 1073–1091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.056

11. Lee M.H., Khil B.S., Yun H.D. Influence of cement type on heat of hydration and temperature rise of the mass concrete // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2014. Vol. 21. Issue 5. Pp. 536–542.

12. Adrian M.L. A finite element model for the prediction of thermal stresses in mass concrete : Doctor of philosophy. University of Florida. 2009. 177 p.

13. Jaafar M.S., Bayagoob K.H., Noorzaei J., Thanoon W.A.M. Development of finite element computer code for thermal analysis of roller compacted concrete dams // *Advances in Engineering Software*. 2007. Vol. 38. Issue 11–12. Pp. 886–895. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2006.08.040

14. Yu H., Li S., Liu Y., Chen C. Study on temperature distribution due to freezing and thawing at the Fengman concrete gravity dam // *Thermal Science*. 2011. Vol. 15. Issue suppl. 1. Pp. 27–32. DOI: 10.2298/tsci11s1027y

15. Kuzmanovic V., Savic L., Mladenovic N. Thermal-stress behaviour of RCC gravity dams // *FME Transaction*. 2015. Vol. 43. Issue 1. Pp. 30–34. DOI: 10.5937/fmet1501030k

16. Crichton A.J., Benzenati I., Qiu T.J., Williams J. Kinta RCC Dam — are over-Simplified Thermal Structural Analysis // *ANCOLD*. 1999. Issue 115.

17. Денисов М.А. Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование : учебное пособие. Екатеринбург : УрФУ, 2011. 149 с.

18. Hahn D.W., Özişik M.N. Heat conduction. John Wiley & Sons, Inc., 2012. DOI: 10.1002/9781118411285

19. Holman J.P. Heat Transfer. McGraw Hill, 1997. P. 2.

Поступила в редакцию 17 мая 2022 г.

Принята в доработанном виде 22 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 25 мая 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Николай Алексеевич Анискин** — доктор технических наук, профессор, директор Института гидротехнического и энергетического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; aniskin@mgsu.ru;

**Алексей Михайлович Шайтанов** — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; aniskin@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Анискин Н.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание текста, доработка текста, итоговые выводы.

Шайтанов А.М. — проведение эксперимента и расчетных исследований, написание текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Ginzburg S.M., Rukavishnikova T.N., Shejner N.Y. Simulation models for assessing the temperature regime of a concrete dam on the example of the Bureyskaya HP. *Proceedings of the VNIIG*. 2002; 241:173-178. (rus.).

2. Ginzburg S.M., Rukavishnikova T.N., Shejner N.Y. The use of simulation models in identifying the parameters of the temperature regime of concrete massifs at the construction stage. *Proceedings of the VNIIG*. 2002; 241:178-187. (rus.).

3. Dzjuba K.I. Application of numerical methods to study the thermally stressed state of hydraulic structures. *Proceedings of coordination meetings on hydraulic engineering*. Leningrad, Energiya Publ., 1975; 103:9-13. (rus.).

4. Aniskin N., Nguyen T. A numerical model for the temperature regime of a concrete gravity dam in

the climatic conditions of Northern Vietnam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 883(1):012040. DOI: 10.1088/1757-899X/883/1/012040

5. Aniskin N., Shaytanov A., Shaytanov M., Khokhotva S. Low-cement content gravity dam as an alternative for Pskem HPP. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:02028. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302028

6. Nagayama I., Jikan S. 30 Years' history of roller-compacted concrete dams in Japan. *Roller Compacted Concrete Dams*. 2003; 27-38.

7. Aniskin N., Nguyen T.C. Prediction of thermal stress in a concrete gravity dam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012144. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012144

8. Bofang Z. *Thermal stresses and temperature control of mass concrete*. Published by Elsevier Inc., 2014; 487. DOI: 10.1016/C2012-0-06038-3
9. Zhao Y., Li G., Fan C., Pang W., Wang Y. Effect of thermal parameters on hydration heat temperature and thermal stress of mass concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021; 2021:1-16. DOI: 10.1155/2021/5541181
10. Wanga L., Yang H.Q., Zhou S.H., Chen E., Tang S.W. Mechanical properties, long-term hydration heat, shrinkage behavior and crack resistance of dam concrete designed with low heat Portland (LHP) cement and fly ash. *Construction and Building Materials*. 2018; 187:1073-1091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.056
11. Lee M.H., Khil B.S., Yun H.D. Influence of cement type on heat of hydration and temperature rise of the mass concrete. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2014; 21(5):536-542.
12. Adrian M.L. *A finite element model for the prediction of thermal stresses in mass concrete : Doctor of philosophy*. University of Florida. 2009; 177.
13. Jaafar M.S., Bayagoob K.H., Noorzaei J., Thanoon W.A.M. Development of finite element computer code for thermal analysis of roller compacted concrete dams. *Advances in Engineering Software*. 2007; 38(11-12):886-895. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2006.08.040
14. Yu H., Li S., Liu Y., Chen C. Study on temperature distribution due to freezing and thawing at the Fengman concrete gravity dam. *Thermal Science*. 2011; 15(suppl. 1):27-32. DOI: 10.2298/tsci11s1027y
15. Kuzmanovic V., Savic L., Mladenovic N. Thermal-stress behaviour of RCC gravity dams. *FME Transaction*. 2015; 43(1):30-34. DOI: 10.5937/fmet1501030k
16. Crichton A.J., Benzenati I., Qiu T.J., Williams J. Kinta RCC Dam — are over-simplified thermal structural analysis. *ANCOLD*. 1999; 115.
17. Denisov M.A. *Mathematical modeling of thermophysical processes. ANSYS and CAE design : a tutorial*. Ekaterinburg, UrFU, 2011; 149. (rus.).
18. Hahn D.W., Özişik M.N. *Heat conduction*. John Wiley & Sons, Inc., 2012. DOI: 10.1002/9781118411285
19. Holman J.P. *Heat Transfer*. McGraw Hill, 1997; 2.

Received May 17, 2022.

Adopted in revised form on May 22, 2022.

Approved for publication on May 25, 2022.

**B I O N O T E S :** **Nikolai A. Aniskin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Hydrotechnical and Energy Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; aniskin@mgsu.ru;

**Aleksey M. Shaytanov** — graduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; shaytanov.alexey@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Nikolai A. Aniskin — conceptualization, methodology, writing of the article, scientific editing of the text, supervision.*

*Aleksey M. Shaytanov — gathering and processing, writing of the article.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

## Влияние толщины слоя внутренних отложений в трубопроводах систем водоснабжения и водоотведения на продолжительность периода их остаточной эксплуатации

Олег Александрович Продоус<sup>1</sup>, Дмитрий Иванович Шлычков<sup>2</sup>,  
Петр Петрович Якубчик<sup>3</sup>, Сергей Викторович Пархоменко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ИНКО-эксперт; г. Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИИ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>3</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС);  
г. Санкт-Петербург, Россия;

<sup>4</sup> Управление капитального строительства АО «Мосводоканал»; г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Практикой эксплуатации сетей водоснабжения из стали и серого чугуна установлено, что внутренняя поверхность труб при определенных условиях покрывается внутренними отложениями, образование которых зависит от качества транспортируемой воды и режима ее перемещения. Аналогично происходит и в самотечных сетях водоотведения. В лотковой части труб появляется слой осадка, если фактическая скорость потока меньше нормативной минимальной. Слой отложений в металлических водопроводных трубах изменяет значение фактического внутреннего диаметра труб и увеличивает потери напора на сопротивление по длине, что способствует возрастанию энергозатрат насосного оборудования и влияет на величину давления в конечной точке сети. Слой осадка в лотковой части самотечных сетей водоотведения также повышает потери по длине, тормозит поток и вызывает возможность образования закупорки сети. Целью исследования является выявление зависимости продолжительности остаточного периода эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения с внутренними отложениями от толщины слоя отложений на стенках труб.

**Материалы и методы.** Использованы расчетные зависимости, выведенные авторами для гидравлического расчета металлических сетей водоснабжения и самотечных сетей водоотведения с внутренними отложениями.

**Результаты.** Подтверждено существование зависимости продолжительности периода остаточной эксплуатации трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения от толщины слоя отложений на внутренних стенках труб. Приведены примеры, свидетельствующие о наличии такой зависимости, обоснованные графиками зависимости продолжительности периода остаточной эксплуатации от толщины слоя отложений в трубопроводах. Предложен гидравлический критерий для оценки продолжительности эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения с внутренними отложениями.

**Выводы.** Показано, что для гидравлического расчета сетей водоснабжения и водоотведения с внутренними отложениями целесообразно использовать специальные таблицы, обеспечивающие расчет характеристик таких труб.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** водоснабжение, внутренние отложения в трубах, трубопровод, эксплуатация, срок эксплуатации, толщина слоя отложений, водоснабжение и водоотведение

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Продоус О.А., Шлычков Д.И., Якубчик П.П., Пархоменко С.В. Влияние толщины слоя внутренних отложений в трубопроводах систем водоснабжения и водоотведения на продолжительность периода их остаточной эксплуатации // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 738–746. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.738-746

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Иванович Шлычков, SHlyichkovDI@mgsu.ru.

## Influence of the thickness of the layer of internal deposits in pipelines of water supply and discharge systems on their remaining service life

Oleg A. Prodous<sup>1</sup>, Dmitriy I. Shlychkov<sup>2</sup>, Petr P. Jakubchik<sup>3</sup>, Sergey V. Parkhomenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> INCO-expert; St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation;

<sup>3</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University (PGUPS); Saint Petersburg, Russian Federation;

<sup>4</sup> Capital Construction Department of Mosvodokanal JSC, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** The practical operation of water supply networks, made of steel and gray cast iron, has proven that deposits accumulate on the inner surface of pipes under certain conditions. Deposition depends on the quality of transported water and the water flow regime, same as in gravity sewerage networks. A sediment layer accumulates in the flume of pipes if the actual flow rate is smaller than the minimum standard one. A layer of deposits in metal water pipes changes the value of the actual inner diameter of pipes and rises the pressure loss due to resistance along the pipeline length, which contributes to an increase in the energy consumption by the pumping equipment and affects the pressure value at the end point of a network. A layer of sediment in the flume of a gravity drainage network also rises losses along its length, slows down the flow rate and may block the water flow in the network. The purpose of the study is to find dependence between the remaining service life of water supply and sewerage networks, having internal deposits, and the thickness of the layer of deposits on pipe walls.

**Materials and methods.** The authors use the dependences, that they have already derived for the hydraulic analysis of metal water supply networks and gravity sewerage networks, having internal deposits.

**Results.** The authors have identified dependence between the remaining service life of water supply pipelines and sewerage systems and the thickness of deposits on the inner walls of pipes. Examples, confirming such a relationship, are provided. They are substantiated by graphs showing dependence between the remaining service life and the thickness of the layer of deposits in pipelines. A hydraulic criterion is proposed for projecting the term of operation of water supply and sewerage networks with internal deposits.

**Conclusions.** The authors have proven the need to use special tables to analyze the characteristics of pipes within the framework of a hydraulic analysis of water supply and sewerage networks, having internal deposits.

**KEYWORDS:** water supply, internal deposits in pipes, pipeline, operation, service life, thickness of the deposit layer, water supply and sewerage

**FOR CITATION:** Prodous O.A., Shlychkov D.I., Jakubchik P.P., Parkhomenko S.V. Influence of the thickness of the layer of internal deposits in pipelines of water supply and discharge systems on their remaining service life. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):738-746. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.738-746 (rus.).

Corresponding author: Dmitriy I. Shlychkov, SHlychkovDI@mgssu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации напорных сетей водоснабжения из стальных и чугунных труб из серого чугуна, а также самотечных сетей водоотведения из разного вида материалов на внутренней поверхности труб образуется слой отложений, влияющий на значения характеристик их гидравлического потенциала, определяемые совокупностью значений величин фактического внутреннего диаметра труб  $d_{\text{вн}}^{\text{ф}}$ , фактической скорости потока  $V_{\text{ф}}$  и фактического гидравлического уклона  $i_{\text{ф}}$  [1–5].

Механизм образования слоя внутренних отложений в самотечных сетях водоотведения из разных видов материалов описан в работах [6, 7], а для напорных труб из стали и серого чугуна такой механизм до настоящего времени никем не предложен.

В соответствии с Правилами технической эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения трубопроводы периодически подвергают гидродинамической или механической очистке рабочей поверхности труб для удаления слоя образовавшихся отложений на их внутренней поверхности [8].

На рис. 1 приведен фрагмент внутренних отложений на стенках металлических труб с обозначениями характеристик труб.

Однако нормативно не установлен период остаточной продолжительности эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения, который осуществляется от промывки (очистки) до следующей промывки. Сегодня необходимость проведения гидродинамической очистки труб устанавливается эксплуатирующей сеть организацией без обоснования и учета  $\sigma$ , тол-

щины слоя отложений  $h$  в сетях водоотведения<sup>1</sup> [9, 10].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Введем следующие понятия:

- **продолжительность остаточного периода эксплуатации водопроводных сетей** из стали и серого чугуна — это период эксплуатации трубопровода, характеризуемый значением толщины слоя внутренних отложений  $\sigma$ , при которой значение коэффициента гидравлической эффективности его работы не превышает диапазона значений<sup>1, 2</sup> [11, 12]:

$$0,90 \leq K_{\text{эф}} \leq 0,95; \quad (1)$$

- **продолжительность периода эксплуатации самотечных сетей водоотведения** из любого вида материалов (от промывки до промывки) характеризуется значением коэффициента гидравлической эффективности их работы, находящимся в диапазоне значений [13–15]:

$$0,5 \leq K_{\text{эф}} \leq 0,6. \quad (2)$$

<sup>1</sup> Патент РФ на полезную модель № 207822. Устройство для измерения толщины отложений в трубе / О.А. Продоус, Д.И. Шлычков. Опул. 18.11.2021. (rus.).

<sup>2</sup> Рекомендации по гидродинамической очистке и телевизионной диагностике сетей водоотведения : утв. Научно-техническим советом Федерального центра энергоресурсосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве Госстроя России. Протокол № 1 от 28.02.2000. СПб. : Издание НИИ АКХ им. К.Д. Памфилова, 2001. 36 с.

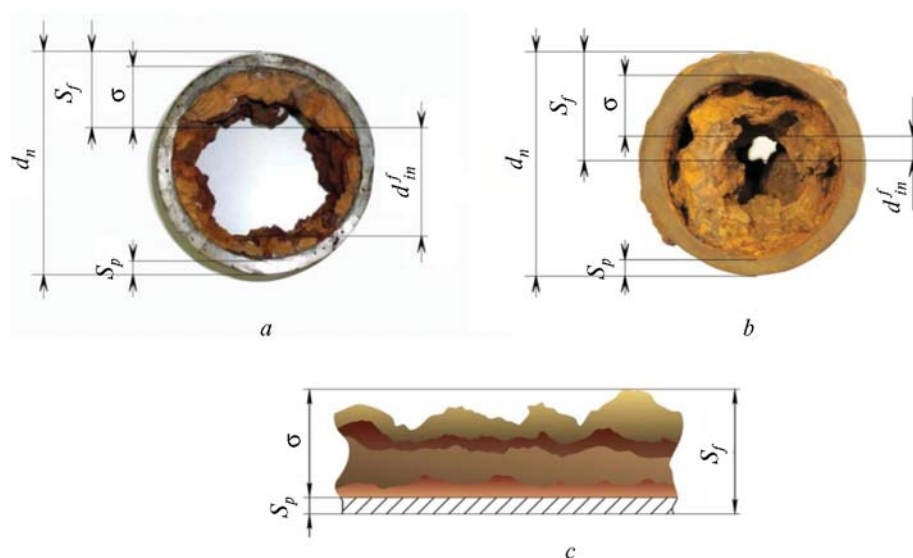


Рис. 1. Фрагмент отложений на стенках стальных труб (а) и на стенках труб из серого чугуна (б)

Fig. 1. A fragment of deposits on the walls of steel pipes (a) and on the walls of pipes made of gray cast iron (b)

Значение  $K_{эф}$  для сетей водоснабжения и водоотведения зависит от толщины слоя отложений осадка  $\sigma$  ( $h$ ) на внутренней поверхности труб, характеризует гидравлическую эффективность их работы, обосновывает необходимость проведения гидродинамической очистки, а также влияет на продолжительность остаточного периода их дальнейшей эксплуатации [16, 17].

## ОБСУЖДЕНИЕ

Режим движения потока в сетях водоснабжения из любого вида материалов — напорный, а фактические скорости жидкости в них зависят от толщины слоя отложений  $\sigma$  на внутренних стенках труб (рис. 1). Поэтому фактические потери напора на сопротивление по длине  $i_\phi$  являются функцией [5, 18, 19]:

$$i_\phi = f(\sigma, d_\phi, V_\phi), \text{ мм/м (м/м)}. \quad (3)$$

Режим движения самотечного потока в сетях водоотведения — неравномерный, это обусловлено следующими причинами:

- изменением диаметров труб сети, местными сопротивлениями движению потока (повороты, тройники и др.);
- боковыми присоединениями и перепадами высотных отметок сети;
- просадками трассы и наличием крупных механических частиц (гравий, щебень, ветки деревьев и проч.);
- отложениями на внутренних стенках труб.

Местные сопротивления и отложения на внутренних стенках труб оказывают главное влияние на неравномерность самотечного потока сточных вод. Поэтому при гидравлическом расчете самотечных сетей водоотведения эти причины следует учитывать в первую очередь [18, 20, 21].

Внутренние отложения в лотковой части трубопроводов водоотведения также изменяют их степень наполнения, регламентированную нормативными требованиями СП 32.13330.2018<sup>3</sup>, т.е. увеличивают уровень фактического наполнения труб  $H_\phi$  на величину, равную толщине слоя осадка  $h$  в их лотковой части:

$$H_\phi = H + h, \quad (4)$$

где  $H_\phi$  — фактический уровень наполнения труб с осадком в их лотковой части, м;  $H$  — нормативный уровень наполнения по СП 32.13330.2018;  $h$  — толщина слоя осадка в лотковой части труб, м (рис. 2).

С целью прогнозирования остаточного периода эксплуатации металлических трубопроводов из стали и серого чугуна с внутренними отложениями разработаны специальные таблицы для гидравлического расчета труб, с помощью которых производится гидравлический расчет трубопроводов для обоснования необходимости разработки проектов их реконструкции [22–24].

Для самотечных сетей водоотведения с разной толщиной слоя отложений в их лотковой части таких таблиц пока не разработано. Поэтому гидравлический расчет выполняется субъективно с большими погрешностями [6, 25–27].

Влияние толщины слоя внутренних отложений в стальных водопроводных трубах из электросварных труб легко проследить по изменению значений характеристик в примере для расхода  $q = 150$  л/с ( $0,15$  м<sup>3</sup>/с), приведенном в табл. 1.

Значения характеристик гидравлического потенциала водопроводных стальных электросварных труб диаметром 400 мм рассмотрены в работах [11, 20].

<sup>3</sup> СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения.

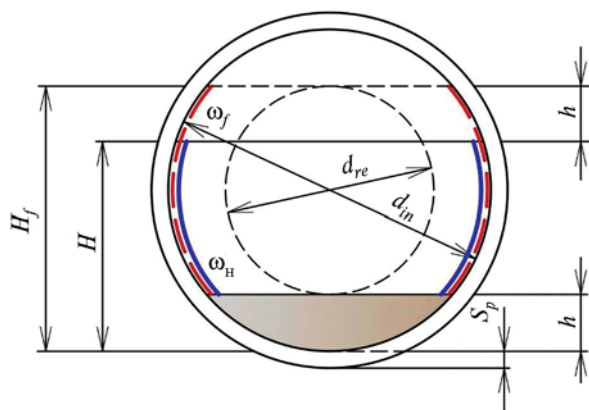


Рис. 2. Фрагмент отложений осадка в лотковой части труб самотечной сети водоотведения

Fig. 2. A fragment of sediment deposits in the flume of pipes of a gravity sewerage network

Табл. 1. Влияние толщины слоя внутренних отложений в стальных водопроводных трубах из электросварных труб  
Table 1. Influence of the thickness of the layer of internal deposits in steel water pipes made of electric-welded pipes

| Характеристики стальных водопроводных труб<br>Characteristics of steel pipes of a water supply network |                        |                        |                                                                                 |                                                            |                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Новых<br>New pipes                                                                                     |                        |                        | С отложениями, $\sigma = 20$ мм<br>Pipes having deposits,<br>$\sigma = 20$ mm   |                                                            |                                                            |
| $d_{\text{вн}}, \text{м}$<br>$d_{\text{ин}}, \text{м}$                                                 | $V, \text{м/с}$<br>m/s | $i, \text{м/м}$<br>m/m | $d_{\text{вн}}^{\text{ф}}, \text{м}$<br>$d_{\text{ин}}^{\text{акт}}, \text{мм}$ | $V_{\text{ф}}, \text{м/с}$<br>$V_{\text{акт}}, \text{м/с}$ | $i_{\text{ф}}, \text{м/м}$<br>$i_{\text{акт}}, \text{м/м}$ |
| 0,3884                                                                                                 | 1,27                   | 0,00550                | 0,3864                                                                          | 1,50                                                       | 0,01011                                                    |

Табл. 2. Значения гидравлических характеристик новых бетонных труб и труб диаметром 400 мм с отложениями  $h = 20$  мм в их лотковой части

Table 2. The values of hydraulic characteristics of new concrete pipes and pipes with a diameter of 400 mm, having  $h = 20$  mm deposits in the flume

| Характеристики бетонных труб водоотведения<br>Characteristics of concrete sewerage pipes |                        |       |                        |                                                                                                  |                                                            |       |                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------|
| Новых<br>New pipes                                                                       |                        |       |                        | С осадком в лотковой части,<br>$h = 20$ мм<br>Pipes having deposits in<br>the flume, $h = 20$ mm |                                                            |       |                                                            |
| $d_{\text{вн}}, \text{м}$<br>$d_{\text{ин}}, \text{м}$                                   | $V, \text{м/с}$<br>m/s | $C$   | $i, \text{м/м}$<br>m/m | $d_{\text{вн}}^{\text{ф}}, \text{м}$<br>$d_{\text{ин}}^{\text{акт}}, \text{мм}$                  | $V_{\text{ф}}, \text{м/с}$<br>$V_{\text{акт}}, \text{м/с}$ | $C$   | $i_{\text{ф}}, \text{м/м}$<br>$i_{\text{акт}}, \text{м/м}$ |
| 0,400                                                                                    | 1,19                   | 52,37 | 0,00516                | 0,275                                                                                            | 2,53                                                       | 49,12 | 0,03848                                                    |

Анализ значений характеристик гидравлического потенциала труб, приведенных в табл. 1, показывает, что расхождение значений между фактическим гидравлическим уклоном  $i_{\text{ф}}$  в трубах со слоем отложений  $\sigma = 20$  мм и гидравлическим уклоном  $i$  в но-

вых трубах составляет 45,6 % или отличается в 1,84 раза. То есть очевидно влияние толщины слоя отложений на внутренней поверхности труб.

Аналогично в сетях водоотведения со слоем осадка  $h = 20$  мм в лотковой части бетонной трубы того же диаметра — 400 мм для тех же условий задачи. Значения гидравлических характеристик новых бетонных труб и труб диаметром 400 мм с отложениями  $h = 20$  мм в их лотковой части приведены в табл. 2 [28, 29].

Анализ значений характеристик гидравлического потенциала бетонных труб диаметром 400 мм со слоем осадка  $h = 20$  мм в их лотковой части (табл. 2) показывает расхождение в значениях  $i$  и  $i_{\text{ф}}$  на 86,6 % или в 7,46 раза. Причиной этого является наличие слоя осадка толщиной  $h = 20$  мм в лотковой части бетонных труб.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таким образом, проведенное сравнение значений гидравлических характеристик труб по разработанной методике оценки остаточной продолжительности эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения с внутренними отложениями [14–16] позволяет сделать следующие выводы:

- наличие слоя внутренних отложений на стенках напорных сетей водоснабжения и самотечных сетей водоотведения оказывает влияние на продолжительность остаточного периода эксплуатации трубопроводов. Чем больше толщина слоя отложений (осадка) в трубах, тем меньше продолжительность периода остаточной эксплуатации трубопровода;
- наличие слоя отложений в напорных сетях водоснабжения и самотечных сетях водоотведения влияет также на точность их гидравлического расчета.

Гидравлический расчет напорных металлических трубопроводов следует производить с помощью специально разработанных таблиц [11]. Для самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб такие таблицы необходимо незамедлительно разработать.

Период остаточной продолжительности эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения с внутренними отложениями, как было отмечено ранее, зависит от толщины слоя осадка на внутренних стенках труб. Поэтому контроль толщины слоя отложений в трубах с помощью разработанных методик и устройств — обязательное условие для прогнозирования периода остаточной продолжительности эксплуатации трубопроводов с внутренними отложениями [17].

Для приведенных в табл. 3, 4 условий задачи построим график зависимости  $T = f(\sigma)$  периода остаточной продолжительности эксплуатации стальных водопроводных труб диаметром 400 мм с толщиной слоя внутренних отложений  $\sigma = 20$  мм и график за-

висимости  $T = f(h)$  для бетонных труб сети водоотведения того же диаметра с толщиной слоя осадка в их лотковой части  $h = 100$  мм.

Табл. 3. Диапазон эффективных значений  $K_{эф}$

Table 3. Range of effective  $K_{ef}$  values

|                                                                                                                           |                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Водопроводные стальные электросварные трубы диаметром 400 мм<br>Electric-welded steel water supply pipes, diameter 400 mm | Бетонные трубы водоотведения диаметром 400 мм<br>Concrete sewerage pipes, diameter 400 mm |
| $0,90 \leq K_{эф} \leq 0,95$<br>$0.90 \leq K_{ef} \leq 0.95$                                                              | $0,5 \leq K_{эф} \leq 0,6$<br>$0.5 \leq K_{ef} \leq 0.6$                                  |
| Допустимое значение толщины слоя внутренних отложений<br>The acceptable thickness value of inner deposits                 |                                                                                           |
| $\sigma \leq 10$                                                                                                          | $h \leq 70$                                                                               |

Табл. 4. Данные для построения графика зависимости  $T = f(\sigma)$

Table 4. Data for a  $T = f(\sigma)$  dependence graph

|                                                                                                                                                                       |     |     |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|
| Толщина слоя внутренних отложений $\sigma$ в стальных трубах диаметром 400 мм<br>Thickness of the $\sigma$ layer of internal deposits in steel pipes, diameter 400 mm |     |     |      |      |
| 2,0                                                                                                                                                                   | 5,0 | 7,0 | 10,0 | 12,0 |
| Продолжительность периода остаточной эксплуатации, г.<br>Remaining service life, years                                                                                |     |     |      |      |
| 11                                                                                                                                                                    | 5   | 2,5 | 1    | 0,5  |

Продолжительность остаточного периода эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения зависит от значения величины коэффициента эффективности эксплуатации трубопровода, определяемого по формуле<sup>1</sup> [1, 8, 9, 14, 16]:

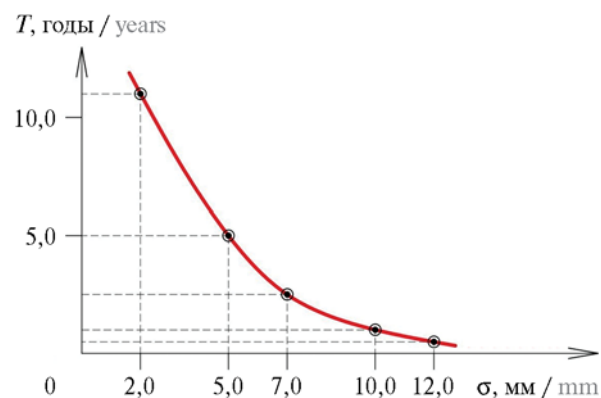


Рис. 3. График зависимости  $T = f(\sigma)$

Fig. 3.  $T = f(\sigma)$  dependence graph

$$K_{эф} = \frac{i_p V_p (d_{вн}^p)^2}{i_{\phi} V_{\phi} (d_{вн}^{\phi})^2}, \quad (5)$$

где  $i_p$ ,  $V_p$ ,  $d_{вн}^p$  — значения расчетных (паспортных характеристик) гидравлического потенциала новых труб (из конкретного вида материала) на момент запуска трубопровода в эксплуатацию;  $i_{\phi}$ ,  $V_{\phi}$ ,  $d_{вн}^{\phi}$  — значения фактических характеристик гидравлического потенциала труб на момент проведения оценки.

Табл. 5. Данные для построения графика зависимости  $T = f(h)$

Table 5. Data for a  $T = f(h)$  dependence graph

|                                                                                                                                                                                                                                                                             |      |      |      |                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|-------------------------------------------------------------|
| Толщина слоя осадка $h$ в лотковой части бетонных труб диаметром 400 мм<br>$h$ sediment layer thickness in the flume of concrete pipes, diameter 400 mm                                                                                                                     |      |      |      |                                                             |
| 2,0                                                                                                                                                                                                                                                                         | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 12,0                                                        |
| Продолжительность периода эксплуатации трубопровода до проведения гидродинамической (механической) очистки внутренней поверхности труб<br>$T$ , лет (мес.)<br>Service life before the hydrodynamic (mechanical) cleaning of the inner surface of pipes $T$ , years (months) |      |      |      |                                                             |
| 1,60                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0,75 | 0,20 | 0,1  | Эксплуатация — недопустима<br>The operation is unacceptable |

На основании экспертной оценки значений величины  $K_{эф}$  для сетей водоснабжения или водоотведения устанавливается продолжительность периода их остаточной эксплуатации до проведения гидродинамической или механической очистки внутренней поверхности труб или вывода трубопроводов из эксплуатации.

Ранее было отмечено, что эффективная гидравлическая эффективность трубопроводов имеет место для сетей водоснабжения в диапазоне значений

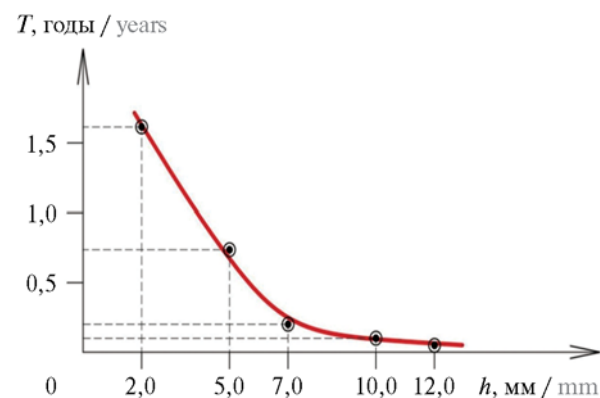


Рис. 4. График зависимости  $T = f(h)$

Fig. 4.  $T = f(h)$  dependence graph

$K_{эф} = 0,95 \leq 0,90$ , а для сетей водоотведения соответственно  $0,60 \leq K_{эф} \leq 0,50$  [14, 19].

Рассчитаем, каким значениям соответствует в указанном диапазоне величин  $K_{эф}$  толщина стенки слоя  $\sigma$  для водопроводных труб и толщина слоя осадка в лотковой части труб  $h$  для сетей водоотведения.

По данным табл. 4 на рис. 3 представлен график зависимости  $T = f(\sigma)$  для стальных водопроводных труб диаметром 400 мм.

По данным табл. 5 на рис. 4 приведен график зависимости  $T = f(h)$  для сети водоотведения из бетонных труб диаметром 400 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ графиков, представленных на рис. 3, 4, подтверждает вывод о том, что чем меньше толщина слоя внутренних отложений  $\sigma$  или  $h$ , тем больше про-

должительность периода остаточной эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения с внутренними отложениями. Таким образом:

- установлена зависимость периода  $T$  остаточной продолжительности эксплуатации трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения от толщины слоя отложений на внутренних стенках труб ( $\sigma, h$ );
- предложен гидравлический критерий оценки продолжительности периода остаточной эксплуатации трубопроводов  $K_{эф}$  (формула (5)), по величине которого производится экспертная оценка периода продолжительности остаточного периода  $T$ ;
- разработаны таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб из стали и серого чугуна с внутренними отложениями и рекомендована разработка таких таблиц для сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Продоус О.А.* Гидравлическое прогнозирование продолжительности использования металлических трубопроводов водоснабжения и водоотведения // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение.* 2020. № 11 (155). С. 28–32.
2. *Продоус О.А., Шлычков Д.И., Абросимова И.А.* Обоснование необходимости проведения гидродинамической очистки самотечных сетей водоотведения // *Вестник МГСУ.* 2022. Т. 17. № 1. С. 106–114. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.106-114
3. *Шлычков Д.И.* Уточненная формула А. Шези для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб // *Интеллектуальный марафон в области водоснабжения и водоотведения : сб. докл. участников интеллектуального марафона в области водоснабжения и водоотведения среди молодых ученых, аспирантов и студентов.* 2021. С. 56–60.
4. *Продоус О.А., Шлычков Д.И.* Механизм образования слоя отложений в лотковой части труб самотечных сетей водоотведения // *Известия высших учебных заведений. Строительство.* 2021. № 6 (750). С. 95–100. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-750-6-95-100
5. *Продоус О.А., Шипилов А.А., Якубчик П.П.* Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб из стали и серого чугуна с внутренними отложениями : справочное пособие. СПб. ; М. : Перо, 2021. 238 с.
6. *Продоус О.А., Новиков М.Г., Самбурский Г.А., Шипилов А.А., Терехов Л.Д., Якубчик П.П. и др.* Рекомендации по реконструкции неновых металлических трубопроводов водоснабжения из стали и серого чугуна : метод. указания. СПб. : ООО «Свое издательство», 2021. 36 с.
7. *Продоус О.А., Шипилов А.А.* Гидравлический критерий обоснования необходимости разработки проектов реконструкции водопроводных сетей из металлических труб // *Водные системы и технологии.* 2020. № 1. С. 26–31.
8. *Продоус О.А., Шипилов А.А., Якубчик П.П.* О необходимости разработки таблиц для гидравлического расчета изношенных металлических трубопроводов водоснабжения с разной толщиной слоя внутренних отложений // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение.* 2021. № 3 (159). С. 48–51.
9. *Мохов А.И., Абросимова И.А.* Ресурсы наилучших доступных технологий зеленого строительства // *Технологии очистки воды «ТЕХНОВОД-2021» : мат. XIII Междунар. науч.-практ. конф.* 2021. С. 59–65.
10. *Klyuev S.V., Shlychkov D.I., Muravyov K.A., Ksenofontova T.K.* Optimal design of building structures // *International Journal of Advanced Science and Technology.* 2020. Vol. 29. Issue 5. Pp. 2577–2583.
11. *Орлов В.А., Зоткин С.П.* Моделирование параметров водно-воздушного режима работы самотечных канализационных сетей в условиях их реконструкции // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия.* 2020. № 3 (33). С. 5–9. DOI: 10.35108/isvp20203(33)5-9
12. *Mokhov A.I., Komarov N.M., Abrosimova I.A.* Information model of intelligent support for effective decisions // *Building Life-cycle Management. Information Systems and Technologies.* 2022. Pp. 191–198. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7\_20
13. *Саутов В.Е., Котюков А.Б.* Исследования распределения расхода жидкости по высоте загрузки в фильтре для очистки воды с центральной перфорированной трубой // *Вестник Ульяновской государ-*

ственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 2 (38). С. 192–196. DOI: 10.18286/1816-4501-2017-2-192-196

14. Продоус О.А. Гидравлическая оценка остаточного срока службы изношенных металлических трубопроводов водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и водоотведение населенных мест и промышленных предприятий: эффективные решения и технологии : сб. докл. 4-й Междунар. конф. 2020. С. 1–9.

15. Lavirko J., Akhmetov E., Akhmetova R., Bikeeva N. Development of water saving technology for water supply system of industrial enterprises // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. P. 08004. DOI: 10.1051/e3sconf/202127408004

16. Braga A.S., Fillion Y. A novel monitoring scheme to detect iron oxide particle deposits on the internal surface of PVC drinking water pipes // Environmental Science: Water Research & Technology. 2021. Vol. 7. Issue 11. Pp. 2116–2128. DOI: 10.1039/d1ew00614b

17. Soboksa N.E., Gari S.R., Hailu A.B., Alemu B.M. Childhood malnutrition and the association with diarrhea, water supply, sanitation, and hygiene practices in Kersa and Omo Nada Districts of Jimma Zone, Ethiopia // Environmental Health Insights. 2021. Vol. 15. P. 117863022199963. DOI: 10.1177/1178630221999635

18. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Прогнозирование возможности продолжения эксплуатации самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 4 (39). С. 646–653. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-4-646-653

19. Чупин Р.В. Оптимизация развивающихся систем водоотведения : монография. Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2015. 417 с.

20. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Об изменении значений гидравлических характеристик напорных канализационных коллекторов из стальных и чугунных труб с внутренними отложениями // Известия

высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 12 (744). С. 70–77. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-744-12-70-77

21. Sacks L.E., Tornabene L.L., Osinski G.R., Sopoco R. Hargraves Crater, Mars: Insights into the internal structure of layered ejecta deposits // Icarus. 2022. Vol. 375. P. 114854. DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114854

22. Kurzweil P., Schottenbauer J., Schell C. Past, present and future of electrochemical capacitors: Pseudocapacitance, aging mechanisms and service life estimation // Journal of Energy Storage. 2021. Vol. 35. P. 102311. DOI: 10.1016/j.est.2021.102311

23. Фоминых А.В., Тельминов А.В., Ковшова Н.А. Зависимость коэффициента потерь на трение по длине трубы в гидравлических системах АПК // Вестник Курганской ГСХА. 2018. № 3 (27). С. 79–82.

24. Абросимова И.А. Экономический эффект технологии Big Data в строительной сфере // Экономика и предпринимательство. 2020. № 5 (118). С. 1155–1158. DOI: 10.34925/EIP.2020.118.5.241

25. Малышева А.А., Абросимова И.А., Пархоменко С.В. Сравнение результатов расчета гидравлического уклона самотечных сетей водоотведения по классической и уточненной формуле А. Шеши // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 4 (39). С. 638–645. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-4-638-645

26. Medina D., Kullmann C., Felter G. Revisiting resilience in the Caribbean — Water supply and sanitation. 2021. DOI: 10.1596/36409

27. Федоров Н.Ф., Волков Л.Е. Гидравлический расчет канализационных сетей (расчетные таблицы). Л. : Стройиздат, 1968. 252 с.

28. Kumar M.D., Kabir Y., Hemani R., Bassi N. Management of irrigation and water supply under climatic extremes // Global Issues in Water Policy. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-59459-6

29. Muhoza D. Sectoral water and sanitation policies: analysis of regulatory determinants for universal service Case Study: Burkina Faso. 2021.

Поступила в редакцию 31 мая 2022 г.

Принята в доработанном виде 13 июня 2022 г.

Одобрена для публикации 13 июня 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: Олег Александрович Продоус — доктор технических наук, профессор, генеральный директор; ИНКО-эксперт; 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 37/1, лит. А, пом. 1-Н; РИНЦ ID: 837891, ORCID: 0000-0003-0389-3695; pro@enco.su;

Дмитрий Иванович Шлычков — кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 536457, Scopus: 57208301494, ResearcherID: AAC-2275-2022, ORCID: 0000-0003-0210-2695; SHlyichkovDI@mgsu.ru;

Петр Петрович Якубчик — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и гидравлики; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС); 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9; SPIN-код: 3626-4854, ORCID: 0000-0001-7604-7380; P.jakub@mail.ru;

**Сергей Викторович Пархоменко** — главный инженер; Управление капитального строительства АО «Мосводоканал»; 105005, г. Москва, Плетешковский пер., д. 2; parhomenko\_sv@mosvodokanal.ru.

Вклад авторов:

Продоус О.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии.

Шлычков Д.И. — участие в разработке учебных программ и их реализации, развитие методологии, итоговые выводы, научное редактирование.

Якубчик П.П. — участие в разработке учебных программ и их реализации, развитие методологии, итоговые выводы, научное редактирование.

Пархоменко С.В. — обработка материала, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Prodous O.A. Hydraulic forecasting of the duration of use of metal water supply and sanitation pipelines. *Water purification. Water treatment. Water supply*. 2020; 11(155):28-32. (rus.).
2. Prodous O.A., Shlychkov D.I., Abrosimova I.A. Justification of the need for the hydrodynamic cleaning of gravity water discharge networks. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(1):106-114. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.106-114 (rus.).
3. Shlychkov D.I. Refined formula A. Chezi for hydraulic calculation of gravity sewerage networks with deposits in the tray part of pipes. *Intellectual marathon in the field of water supply and sanitation : a collection of reports of the participants of the intellectual marathon in the field of water supply and sanitation among young scientists, graduate students and students*. 2021; 56-60. (rus.).
4. Prodous O.A., Shlychkov D.I. The mechanism of a sediment layer formation in the tray part of self-drainage networks pipes. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; 6(750):95-100. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-750-6-95-100 (rus.).
5. Prodous O.A., Shipilov A.A., Yakubchik P.P. *Tables for the hydraulic calculation of water pipes made of steel and gray cast iron with internal deposits : a reference guide*. St. Petersburg ; Moscow, Pero, 2021; 238. (rus.).
6. Prodous O.A., Novikov M.G., Sambursky G.A., Shipilov A.A., Terekhov L.D., Yakubchik P.P. et al. *Recommendations for the reconstruction of non-new metal pipelines for water supply from steel and gray cast iron: guidelines*. St. Petersburg, Svoe publishing house LLC, 2021; 36. (rus.).
7. Prodous O.A., Shipilov A.A. Hydraulic criterion for substantiating the need to develop projects for the reconstruction of water supply networks from metal pipes. *Water Systems and Technologies*. 2020; 1:26-31. (rus.).
8. Prodous O.A., Shipilov A.A., Yakubchik P.P. On the need to develop tables for the hydraulic calculation of worn-out metal pipelines of water supply with different thicknesses of the layer of internal deposits. *Water purification. Water treatment. Water supply*. 2021; 3(159):48-51. (rus.).
9. Mokhov A.I., Abrosimova I.A. Resources of the best available green building technologies. *Water purification technologies "TECHNOVOD-2021": materials of the XIII International Scientific and Practical Conference*. 2021; 59-65. (rus.).
10. Klyuev S.V., Shlychkov D.I., Muravyov K.A., Ksenofontova T.K. Optimal design of building structures. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020; 29(5):2577-2583.
11. Orlov V.A., Zotkin S.P. Modeling parameters of water-air mode of gravity sewer networks operation under reconstruction. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea*. 2020; 3(33):5-9. DOI: 10.35108/isvp20203(33)5-9 (rus.).
12. Mokhov A.I., Komarov N.M., Abrosimova I.A. Information Model of Intelligent Support for Effective Decisions. *Building Life-cycle Management. Information Systems and Technologies*. 2022; 191-198. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7\_20
13. Saitov V.E., Kotyukov A.B. Research of liquid consumption distribution along the height of the water filter with central slotted pipe. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2017; 2(38):192-196. DOI: 10.18286/1816-4501-2017-2-192-196 (rus.).
14. Prodous O.A. Hydraulic assessment of the residual service life of worn metal pipelines for water supply and sanitation. *Water supply and sanitation of populated areas and industrial enterprises: effective solutions and technologies: collection of reports of the 4th international conference*. 2020; 1-9. (rus.).
15. Lavirko J., Akhmetov E., Akhmetova R., Bikeeva N. Development of water saving technology for water supply system of industrial enterprises. *E3S Web of Conferences*. 2021; 274:08004. DOI: 10.1051/e3sconf/202127408004
16. Braga A.S., Filion Y. A novel monitoring scheme to detect iron oxide particle deposits on the internal surface of PVC drinking water pipes. *Environmental Science: Water Research & Technology*. 2021; 7(11):2116-2128. DOI: 10.1039/d1ew00614b

17. Soboksa N.E., Gari S.R., Hailu A.B., Alemu B.M. Childhood Malnutrition and the Association with Diarrhea, water supply, sanitation, and hygiene practices in Kersa and Omo Nada Districts of Jimma Zone, Ethiopia. *Environmental Health Insights*. 2021; 15:117863022199963. DOI: 10.1177/1178630221999635
18. Prodous O.A., Shlychkov D.I. Forecasting continued operation of gravity drainage networks with deposits in pipe water troughs. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021; 11(4):(39):646-653. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-4-646-653 (rus.).
19. Chupin R.V. *Optimization of developing water disposal systems: monograph*. Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University, 2015; 417. (rus.).
20. Prodous O.A., Shlychkov D.I. On the change in the values of the hydraulic characteristics of pressure sewer headers made of steel and cast iron pipes with internal deposits. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 12(744):70-77. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-744-12-70-77 (rus.).
21. Sacks L.E., Tornabene L.L., Osinski G.R., Sopoco R. Hargraves Crater, Mars: Insights into the internal structure of layered ejecta deposits. *Icarus*. 2022; 375:114854. DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114854
22. Kurzweil P., Schottenbauer J., Schell C. Past, present and future of electrochemical capacitors: Pseudocapacitance, aging mechanisms and service life estimation. *Journal of Energy Storage*. 2021; 35:102311. DOI: 10.1016/j.est.2021.102311
23. Fominykh A.V., Telminov A.V., Kovshova N.A. The dependence of the coefficient of friction losses along the length of the pipe in hydraulic systems of the agro-industrial complex. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2018; 3(27):79-82. (rus.).
24. Abrosimova I.A. The economic effect of big data technology in the construction industry. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2020; 5(118):1155-1158. DOI: 10.34925/EIP.2020.118.5.241 (rus.).
25. Malysheva A.A., Abrosimova I.A., Parhomenko S.V. Comparison of calculation results on a hydraulic slope in gravity drainage networks using classical and refined A. Chézy formula. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021; 11(4):(39):638-645. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-4-638-645 (rus.).
26. Medina D., Kullmann C., Felter G. *Revisiting Resilience in the Caribbean — Water Supply and Sanitation*. 2021. DOI: 10.1596/36409
27. Fedorov N.F., Volkov L.E. *Hydraulic calculation of sewer networks (calculation tables)*. Leningrad, Stroyizdat, 1968; 252. (rus.).
28. Kumar M.D., Kabir Y., Hemani R., Bassi N. Management of Irrigation and Water Supply Under Climatic Extremes. *Global Issues in Water Policy*. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-59459-6
29. Muhoza D. *Sectoral water and sanitation policies: analysis of regulatory determinants for universal service Case Study: Burkina Faso*. 2021.

Received May 31, 2022.

Adopted in revised form on June 13, 2022.

Approved for publication on June 13, 2022.

**BIONOTES:** **Oleg A. Prodous** — Doctor of Technical Sciences, Professor, General Director; **INCO-expert**; pom. 1-H lit. A, 37/1 Moskovsky pr., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RISC: 837891, ORCID: 0000-0003-0389-3695; pro@enco.su;

**Dmitriy I. Shlychkov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 536457, Scopus: 57208301494, ResearcherID: AAC-2275-2022, ORCID: 0000-0003-0210-2695; SHlyichkovDI@mgsu.ru;

**Petr P. Jakubchik** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Water Supply, Sanitation and Hydraulics; **Emperor Alexander I Petersburg State Transport University (PGUPS)**; 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation; SPIN-код: 3626-4854, ORCID: 0000-0001-7604-7380; P.jakub@mail.ru;

**Sergey V. Parkhomenko** — Chief Engineer; **Capital Construction Department of Mosvodokanal JSC**; 2 Pleteshkovsky per., Moscow, 105005, Russian Federation; parhomenko\_sv@mosvodokanal.ru.

*Contribution of the authors:*

*Oleg A. Prodous — scientific leadership, research concept, methodology development.*

*Dmitriy I. Shlychkov — participation in the development of training programs and their implementation, development of methodology, final conclusions, scientific editing.*

*Petr P. Jakubchik — participation in the development of training programs and their implementation, development of methodology, final conclusions, scientific editing.*

*Sergey V. Parkhomenko — processing the material, writing the original text.*

*The authors declare no conflict of interest.*

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / OVERVIEW PAPER

УДК 697.148

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.747-755

## Перспективы использования тепловых насосов для тепловой обработки бетона в полевых условиях

Сергей Викторович Федосов<sup>1</sup>, Азарий Абрамович Лапидус<sup>1</sup>,  
Вадим Николаевич Федосеев<sup>2</sup>, Александр Михайлович Соколов<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ); г. Иваново, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В российском прохладном климате тепловая обработка бетона в целях ускорения его твердения является практически обязательной технологической операцией при изготовлении железобетонных изделий (ЖБИ) и конструкций. Нередко на практике, особенно при бетонировании в полевых условиях и пониженной температуре, имеет место дефицит и высокая стоимость энергетических ресурсов для выполнения такой тепловой обработки.

**Материалы и методы.** Перспективный и экономичный вариант решения проблемы энерготепловой обработки бетона и ЖБИ в полевых условиях — применение средств обогрева на основе воздушных теплонасосных систем. В таком мобильном устройстве происходит движение хладагента по замкнутому контуру, содержащему компрессор, конденсатор-теплообменник, дроссельный клапан, воздушный испаритель. Центральным элементом установки служит компрессор, который приводится в действие не электродвигателем, как это обычно делается, а двигателем внутреннего сгорания. Передача тепла, которое вырабатывает тепловой насос, обрабатываемому ЖБИ осуществляется за счет циркуляции рабочего тела — теплоносителя по дополнительному контуру, состоящему из конденсатора-теплообменника, гибких соединительных шлангов и термоактивной опалубки, в которую укладывается свежий бетон, подвергающийся тепловой обработке.

**Результаты.** Тепловой насос, являющийся источником переноса низкопотенциальной тепловой энергии, выполнен в виде отдельного, единого и универсально комбинированного блока, удобного для транспортировки и монтажа на месте. Термоактивная опалубка представляет целый спектр устройств для изготовления разнообразных ЖБИ. Монтаж установки не будет занимать более 5–10 мин. Конкурирующий вариант по отношению к применению теплонасосных систем — применение электротепловой обработки с питанием от бензоэлектрического генератора.

**Выводы.** Технологический процесс изготовления бетонных и ЖБИ с использованием тепловой обработки с помощью воздушных тепловых насосов технически реализуем и по своей энергетической эффективности может превосходить альтернативный процесс — обработку с применением бензиновых (дизельных) электрогенераторов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** зимнее бетонирование, тепловая обработка, бетон, железобетон, тепловой насос, хладагент, воздушная теплонасосная система, теплообмен, бензиновый электрогенератор, двигатель внутреннего сгорания

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Федосов С.В., Лапидус А.А., Федосеев В.Н., Соколов А.М. Перспективы использования тепловых насосов для тепловой обработки бетона в полевых условиях // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 747–755. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.747-755

Автор, ответственный за переписку: Александр Михайлович Соколов, amsokolov37@yandex.ru.

## Prospects of using heat pumps for the thermal treatment of concrete in the field

Sergey V. Fedosov<sup>1</sup>, Azariy A. Lapidus<sup>1</sup>, Vadim N. Fedoseev<sup>2</sup>, Alexander M. Sokolov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU); Ivanovo, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** In the cold Russian climate, thermal treatment of concrete is kind of a mandatory operation conducted to accelerate concrete curing as part of the manufacturing of reinforced concrete products and structures. In practical work, concreting at low temperatures in the field may be accompanied by a shortage and high cost of energy resources needed to perform such thermal treatment.

**Materials and methods.** A promising economical solution to the problem of thermal treatment of concrete and reinforced concrete products in the field is the use of air heat pump systems. The refrigerant circuits through a compressor, a condenser — heat exchanger, a throttle valve, and an air evaporator. The core element of such a unit is the compressor, which is driven not by an electric motor, as usual, but an internal combustion engine. The heat, generated by the heat pump, is delivered to the reinforced concrete product, subjected to thermal treatment, due to the circulation of the coolant through a supplementary circuit that has a condenser-heat exchanger, flexible connecting hoses and thermoactive formwork, in which fresh concrete is placed.

**Results.** The heat pump, which is the source of low-potential heat energy transfer, represents a separate integrated and universal unit, convenient for transportation and installation on the site. The second element of the unit is the thermoactive formwork, that represents the whole range of devices used to manufacture various reinforced concrete products. The installation of this unit will not take more than 5–10 minutes. An alternative to heat pump systems is an electric thermal treatment unit powered by a gasoline electrical generator.

**Conclusions.** The procedure of manufacturing concrete and reinforced concrete products using thermal treatment by air heat pumps is technically feasible, and its energy efficiency may exceed that of an alternative process, namely, the use of gasoline (diesel) electrical generators.

**KEYWORDS:** cold weather concreting, thermal treatment, concrete, reinforced concrete, heat pump, refrigerant, air heat pump system, heat exchange, gasoline electrical generator, internal combustion engine

**FOR CITATION:** Fedosov S.V., Lapidus A.A., Fedoseev V.N., Sokolov A.M. Prospects of using heat pumps for the thermal treatment of concrete in the field. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):747-755. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.747-755 (rus.).

Corresponding author: Alexander M. Sokolov, amsokolov37@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Тепловая обработка бетона и железобетонных изделий (ЖБИ) — распространенная технологическая операция в сфере строительства, так как она позволяет ускорить твердение бетона и сократить время достижения им нормативной механической прочности [1–4]. Если на предприятиях сборного железобетона или при строительстве в населенных пунктах существуют отлаженные организационно-технологические подходы по реализации тепловой обработки, то в полевых условиях, особенно в арктических широтах, когда период времени отрицательных температур воздуха может превышать период положительных значений, технология данного производства превращается в серьезную проблему [1–5].

Как правило, при осуществлении бетонирования или изготовления ЖБИ в полевых условиях применяются обработка продуктами сгорания газа [4] и различные способы электротепловой обработки<sup>1</sup> [6–9]. Однако в случае удаленности от сетей электроснабжения для этого требуются локальные источники электрической или тепловой энергии, например дизельные, бензиновые электрогенераторы и теплогенераторы. Как известно, электро- и теплоэнергия отличается высокой себестоимостью, что приводит к увеличению стоимости строительных работ. Кроме этого, необходимы снабжение горюче-смазочными материалами; наличие персонала, имеющего право работы на электроэнергетических установках; средства энергобезопасности.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Можно предположить, что перспективным и экономичным вариантом решения проблемы

энерготепловой обработки бетона и ЖБИ в полевых условиях является применение средств обогрева на основе воздушных теплонасосных систем<sup>2</sup> [10–15]. На рис. 1 схематично обозначена технологическая схема выполнения энерготепловой обработки предполагаемым способом. Полагая, что такая установка должна быть транспортабельной типа автофургона в ней целесообразно использовать воздушный тепловой насос (ТН).

В таком комбинированном устройстве (в тепловом насосе, Блок I) (рис. 1) происходит движение хладагента по замкнутому контуру, содержащему компрессор, конденсатор-теплообменник, дроссельный клапан, воздушный испаритель. Центральным элементом такой установки служит компрессор, который приводится в действие не электродвигателем, как это обычно делается в теплохолодильных устройствах [12–15], а двигателем внутреннего сгорания (ДВС), сопряженным с приводом компрессора (рис. 1) [16, 17]. При сжатии компрессором давление хладагента растет и одновременно, согласно закону Шарля, увеличивается его температура, начальное значение которой — это температура хладагента на выходе испарителя. Нагретый хладагент подается в конденсатор-теплообменник, где он, перемещаясь по извилистому трубопроводу, постепенно отдает тепло теплоносителю. Конденсатор-теплообменник представляет собой герметичную емкость, внутри которой расположен трубопровод с движущимся по нему хладагентом. Весь внутренний объем этой емкости заполнен теплоносителем (это может быть антифриз или трансформаторное масло, газ), который движется снизу вверх по схеме (рис. 1), т.е. навстречу движению хладагента. В результате в верхней части теплообменника температура теплоносителя достигает заданного значения.

<sup>1</sup> Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / под ред. Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумяна, А.И. Звездова. М.: НИИЖБ, 2005. 276 с.

<sup>2</sup> EN 15450:2007. Heating systems in buildings — Design of heat pump heating systems. 2007. 50 p.

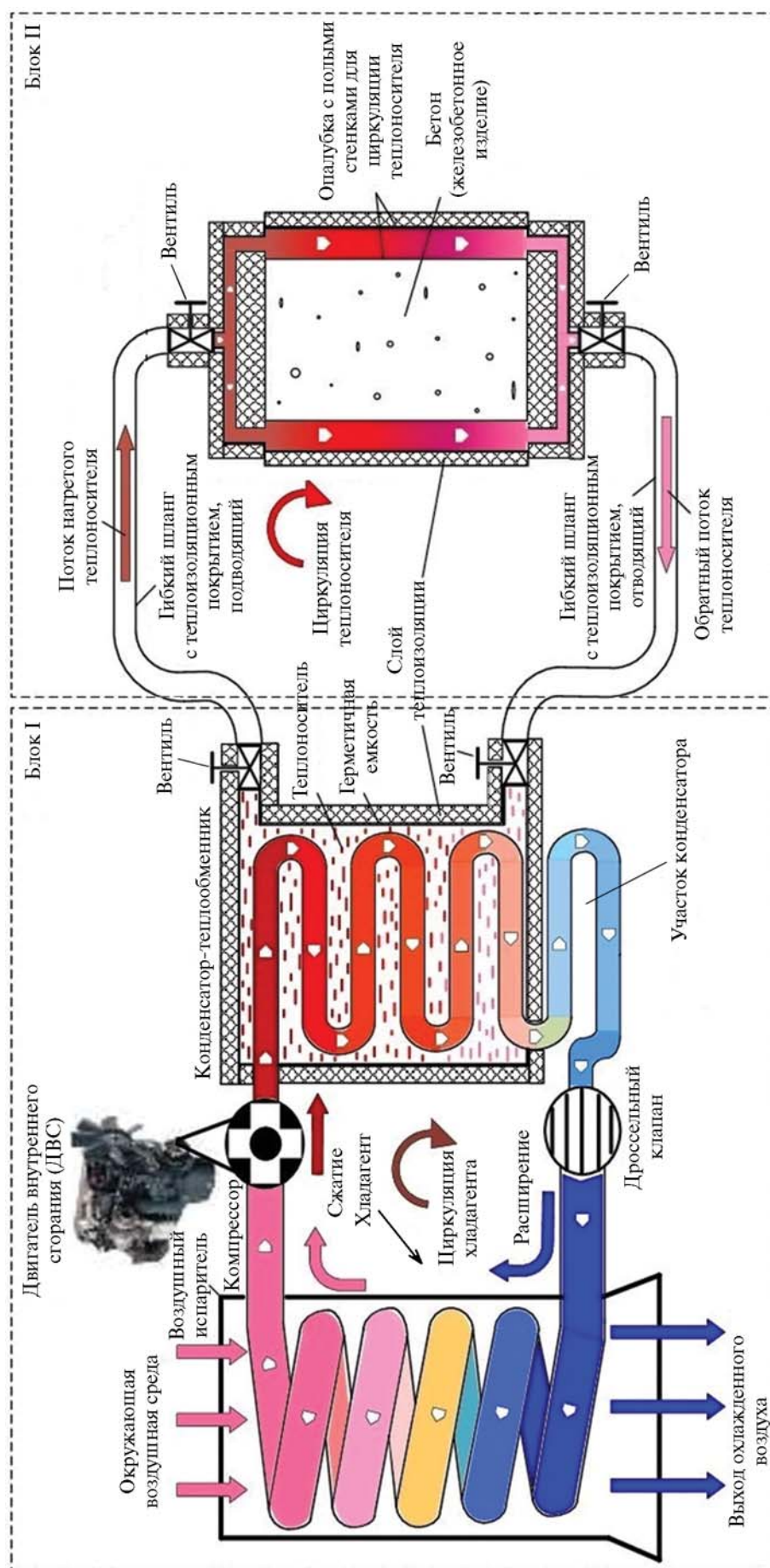


Рис. 1. Технологическая схема выполнения энерготепловой обработки бетона (ЖБИ) с помощью воздушной тепловососной системы

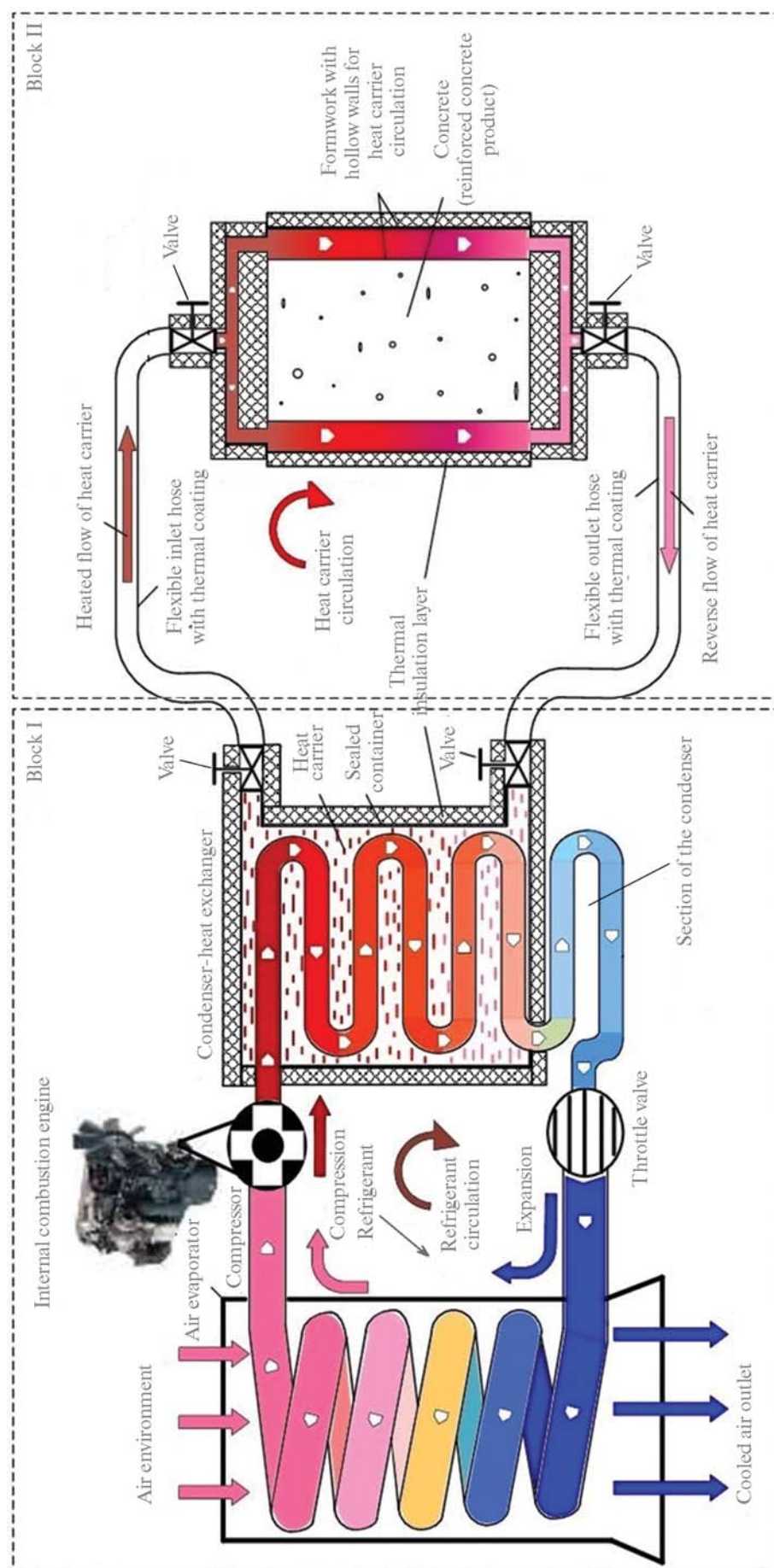


Fig. 1. The process flow diagram of the concrete (reinforced concrete product) treatment using an air heat pump system

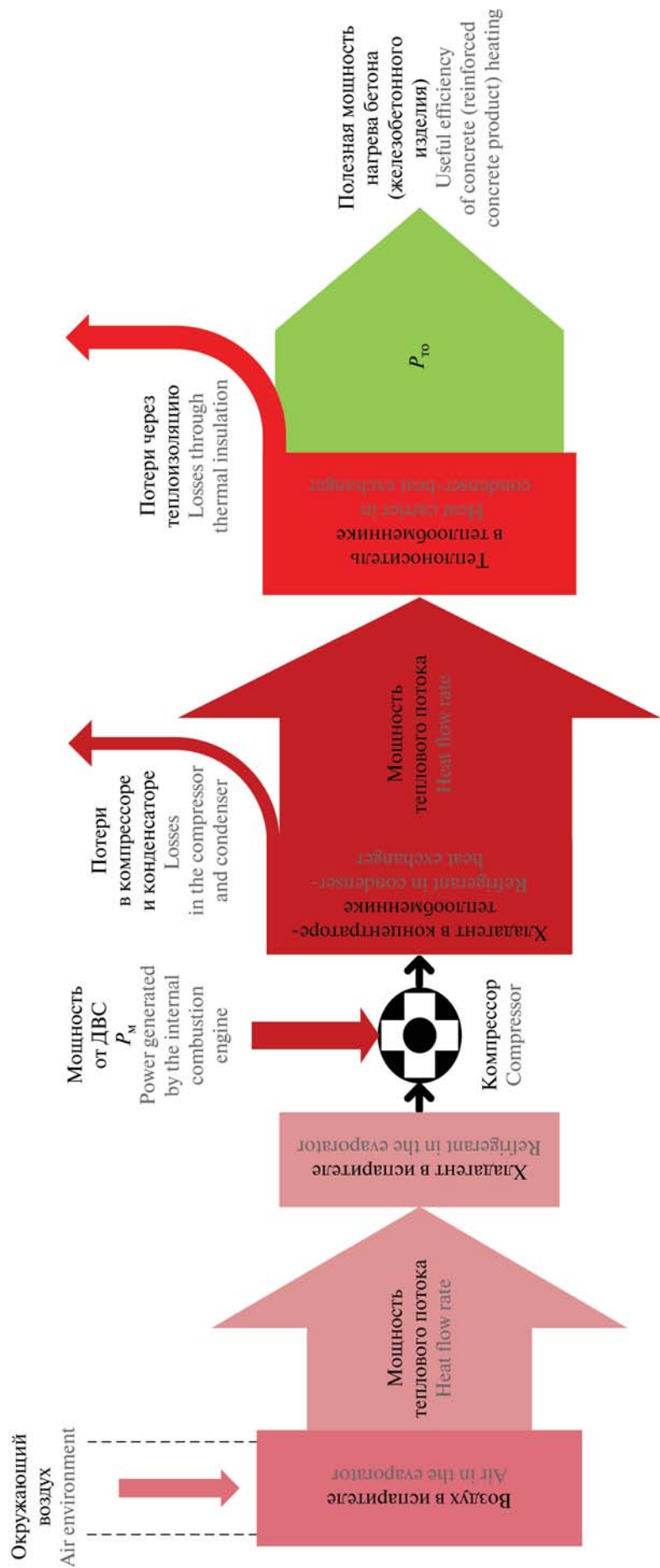


Рис. 2. Иллюстрация к определению полезной энергомощности теплового потока, идущей на нагрев бетона (ЖБИ), при работе теплонасосной установки

Fig. 2. The flow diagram describing the process of identifying the efficient generating capacity of a thermal flow used to heat concrete (a reinforced concrete product) in the process of operation of a heat pump

Хладагент, продвигаясь через дроссельный клапан, поступает в трубопровод испарителя, где давление газа значительно меньше, чем в конденсаторе. После испарения хладагент перемещается по трубопроводу испарителя снизу вверх по схеме (рис. 1), и постепенно отбирая тепло от окружающего воздуха, омывающего трубопровод испарителя, движется к компрессору. В итоге температура хладагента в верхней части испарителя (т.е. на входе в компрессор) поднимается. В целях интенсификации передачи тепла от воздуха хладагенту в испаритель его часто выполняют с ребрами на поверхности.

В Блоке II передача тепла, которое вырабатывает ТН, обрабатываемому ЖБИ осуществляется за счет циркуляции рабочего тела — теплоносителя по контуру, содержащему конденсатор-теплообменник (рис. 1), гибкие соединительные шланги и термоактивную опалубку, в которую укладывается свежий бетон. В контур циркуляции встроен циркуляционный насос для ускорения движения теплоносителя и интенсификации процесса теплопереноса (на рис. 1 не показан). Опалубка может быть изготовлена как из неметаллических, так и металлических (стали) материалов. Ее отличительная черта состоит в том, что поверхности опалубки, контактирующие с бетоном и имеющие наибольшую площадь, выполняются из металла и имеют внутренние полости, через которые циркулирует теплоноситель. Этот поток нагретого теплоносителя, выйдя из конденсатора-теплообменника (рис. 1) и имея наибольшее значение температуры, по гибкому шлангу попадает в опалубку и через ее стенки передает тепло бетону, контактирующему с этой стенкой за счет теплопроводности.

После этого поток нагретого теплоносителя, отдав бетону часть своей тепловой энергии и уже имея более низкую температуру, вновь возвращается в конденсатор-теплообменник, где процесс циклически повторяется. Очевидно, что для минимизации тепловых потерь поверхность конденсатора-теплообменника, гибких шлангов и опалубки должна быть снабжена качественной теплоизоляцией.

Технологический порядок, представленный на рис. 2, является примерным и потребуются, по-видимому, дополнительные исследования для его уточнения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Конструктивное исполнение установки (рис. 1, 2) для тепловой обработки бетона и ЖБИ с использованием ТН следует рассматривать как достаточно удобное для практического применения и обладающее рациональной энергетической эффективностью. Тепловой насос, являющийся источником переноса низкопотенциальной тепловой энергии, выполнен в виде отдельного, единого и универсально комбинированного блока (Блок I, рис. 1), удобного для транспортировки и монтажа на месте. Причем, этот прибор может быть выполнен в виде мобильного устройства. Второй элемент прибора (Блок II, рис. 1) установки — термоактивная опалубка, которая представляет целый спектр устройств для изготовления разнообразных ЖБИ. Монтаж всей установки на месте применения фактически сводится к соединению этих двух основных элементов с помощью двух гибких шлангов, а сама эта несложная про-

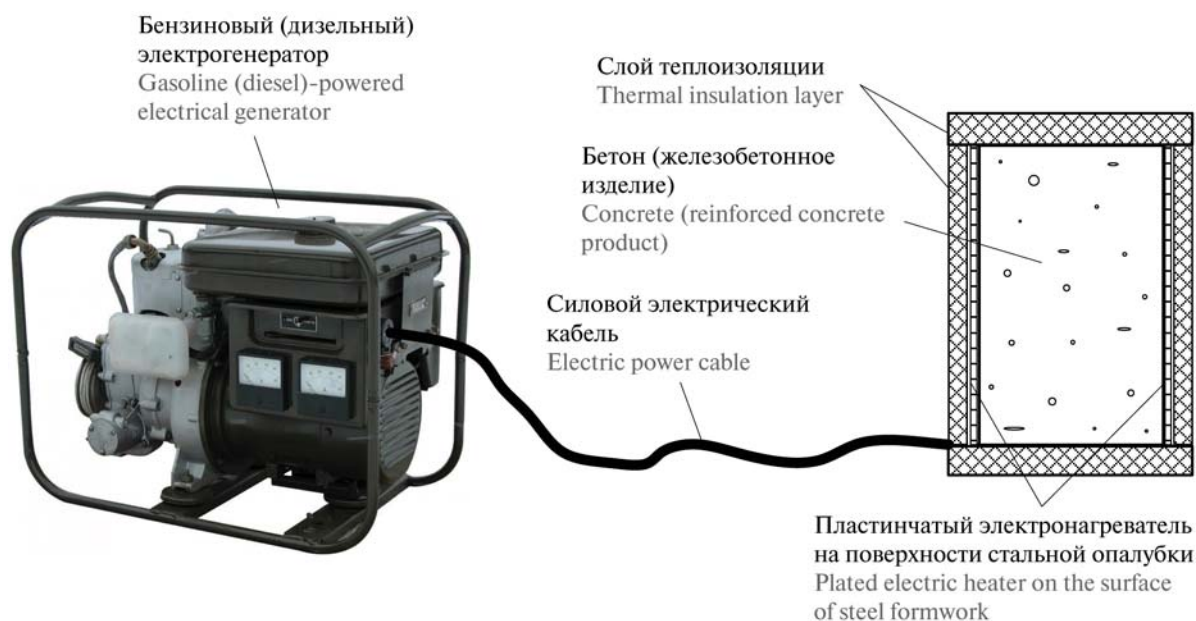


Рис. 3. Технологическая схема выполнения энерготепловой обработки бетона (ЖБИ) с помощью бензинового или дизельного электрогенератора

Fig. 3. The flow diagram of thermal treatment of concrete (reinforced concrete products) using a gasoline or diesel power generator

цедура по времени не будет занимать более 5–10 мин. Установка должна иметь устройства контроля и автоматики, но это тема отдельного рассмотрения.

Для оценки перспективности установок на основе теплонасосных систем с использованием тепловой обработки бетона в полевых условиях целесообразно сравнить такое технологическое решение с конкурирующим вариантом в виде электротепловой обработки с питанием от бензоэлектрического генератора [16–19]. На рис. 3 по аналогии с рис. 1 представлена технологическая схема такого варианта: ДВС вращает электрический генератор переменного или постоянного тока<sup>3</sup> [18, 19], электрический ток по двум проводникам передается от генератора в термоактивную опалубку [6–8], в стенки которой встроены электрические нагреватели.

Прохождение электрического тока приводит к выделению тепла в нагревателях, которое переда-

ется бетону, уложенному в опалубку, и обеспечивает его тепловую обработку в необходимом режиме. Как указывалось ранее (рис. 1), на поверхности опалубки располагается слой теплоизоляции для минимизации теплопотерь.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Технологический процесс изготовления бетонных и ЖБИ с использованием тепловой обработки с помощью воздушных ТН технически реализуем и по своей энергетической эффективности может превышать альтернативный процесс — обработку с применением бензиновых (дизельных) электрогенераторов.

Необходимо разработать опытную установку и выполнить экспериментально-технологические исследования процесса тепловой обработки бетонных и ЖБИ с помощью ТН, предварительно используя информационный анализ на основе реальной цифровой модели двойника для получения числовых показателей.

<sup>3</sup> Рекус Г.Г. Электрические двигатели и электрические генераторы. Электрооборудование производств : учебное пособие для вузов. М., 2005. С. 170–277.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баженов Ю.М. Технология бетона : учебник для студентов высших учебных заведений. М. : Изд-во АСВ, 2003. 500 с.
2. Алимов Л.А., Баженов Ю.М., Воронин В.В. Технология бетона, строительных изделий и конструкций : учебник для вузов. М. : Изд-во АСВ, 2004. 256 с.
3. Бондаренко В.М. и др. Железобетонные и каменные конструкции : учебник для студентов вузов. М. : Высшая школа, 2007. 887 с.
4. Корнеев А.Д., Губарев В.Я., Синельников Д.С., Соловьев В.Г. Экспериментальные исследования тепловлажностной обработки бетона продуктами сгорания природного газа // Строительные материалы. 2007. № 1. С. 30–32.
5. Крылов Б.А., Аруова Л.Б. Комбинированная геотермообработка железобетонных изделий в Республике Казахстан // Бетон и железобетон. 2007. № 4. С. 11–13.
6. Трембизкий С.М. Электротепловые методы интенсификации производства сборного железобетона // Бетон и железобетон. 1989. № 2.
7. Sokolov A.M., Shadrikov T. Increased frequency alternating current systems for the electrothermal processing of composite materials // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020. DOI: 10.1109/uralcon49858.2020.9216268
8. Ли А.И., Крылов Б.А. Электроразогрев бетонных смесей и перспективные области его применения // Строительные материалы. 2002. № 5. С. 8–10.
9. Федосов С.В., Бобылев В.И., Соколов А.М. Электротепловая обработка бетона токами повышен-

ной частоты на предприятиях сборного бетона : монография. Иваново : ИГЭУ им. В.И. Ленина, ИВГПУ, 2016. 336 с.

10. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Воронов В.А. Использование низкопотенциальной теплоты окружающего воздуха в испарительно-конденсационном блоке воздушного теплового насоса // Приволжский научный журнал. 2019. № 3 (51). С. 37–45.

11. Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Петрухин А.Б., Зайцева И.А., Воронов В.А., Емелин В.А. Анализ энергоэффективности воздушного теплового насоса и электродвигателя в условиях текстильного и швейного производства // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 4 (364). С. 5–12.

12. Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Виноградова Н.В., Ткачев В.М., Емелин В.А. Термодинамическая эффективность воздушных тепловых насосов, используемых в малоэтажных текстильных строениях // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2017. № 5 (371). С. 314–318.

13. Азаров А.И., Алексеев В.П., Быков А.В. и др. Холодильные машины : справочник. М. : Легкая и пищевая промышленность, 1982. 223 с.

14. Трубаев П.А., Гришко Б.М. Тепловые насосы : учебное пособие. Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. 142 с.

15. Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Петрухин А.Б. Экономическая эффективность воздушно-тепловых насосов для объектов производственного и непроизводственного назначения // Известия высших учеб-

ных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 1 (361). С. 18–21.

16. Луканин В.Н., Морозов К.Н., Хачиян А.С. и др. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов / под ред. В.Н. Луканина. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высшая школа, 2005. 479 с.

17. Холдерман Д.Д., Митчел Ч.Д. Автомобильные двигатели. Теория и техническое обслуживание.

4-е изд. / пер. с англ. и ред. С.А. Добродеева. М. : Вильямс, 2006. 659 с.

18. Sokolov A., Shadrikov T. Methodology for calculating steady-state modes of non-sinusoidal AC increased frequency networks // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2020.

19. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник для вузов. М. : Питер, 2008. 350 с.

Поступила в редакцию 17 марта 2022 г.

Принята в доработанном виде 31 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 2 июня 2022 г.

**О Б А В Т О Р А Х :** **Сергей Викторович Федосов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения, академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; fedosov-academic53@mail.ru;

**Азарий Абрамович Липидус** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительного производства, советник РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ORCID: 0000-0001-7846-5770; lapidus58@mail.ru;

**Вадим Николаевич Федосеев** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации производства и городского хозяйства; **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ)**; 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; amsokolov37@yandex.ru;

**Александр Михайлович Соколов** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии и организации строительного производства, советник РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; amsokolov37@yandex.ru.

*Вклад авторов:*

*Федосов С.В. — научное руководство, идея, концепция исследования, развитие методологии, итоговые выводы.*

*Липидус А.А. — обработка материала, развитие методологии, научное редактирование текста.*

*Федосеев В.Н. — концепция исследования, развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.*

*Соколов А.М. — идея, концепция исследования, развитие методологии, написание текста, итоговые выводы.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M. *Concrete technology: textbook for university students*. Moscow, Publishing House ASV, 2003; 500. (rus.).

2. Alimov L.A., Bazhenov Yu.M., Voronin V.V. *Technology of concrete, building products and structures: textbook for universities*. Moscow, Publishing House ASV, 2004; 256. (rus.).

3. Bondarenko V.M. *Reinforced concrete and stone structures: textbook for university students*. Moscow, Higher School, 2007; 887. (rus.).

4. Korneev A.D., Gubarev V.Ya., Sinel'nikov D.S., Solov'ev V.G. Experimental studies of heat and moisture treatment of concrete by natural gas combustion products. *Building Materials*. 2007; 1:30-31. (rus.).

5. Krylov B.A., Aruova L.B. Combined sun treatment of reinforced concrete products in the Republic of Kazakhstan. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2007; 4:11-13. (rus.).

6. Trembickij S.M. Electrothermal methods of intensification of precast concrete production. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1989; 2. (rus.).

7. Sokolov A.M., Shadrikov T. Increased frequency alternating current systems for the electrothermal processing of composite materials. *2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2020. DOI: 10.1109/uralcon49858.2020.9216268

8. Li A.I., Krylov B.A. Electric heating of concrete mixes and promising areas of its application. *Building Materials*. 2002; 5:8-10. (rus.).

9. Fedosov S.V., Bobylev V.I., Sokolov A.M. *Electrothermal treatment of concrete with high-frequency currents at precast concrete enterprises: monography*. Ivanovo, FGBOU VO "ISPU named after V.I. Lenin", IVGPU, 2016; 336. (rus.).
10. Fedosov S.V., Fedoseev V.N., Voronov V.A. The use of low-grade heat of the ambient air in the evaporator-condenser unit of an air heat pump. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2019; 3:37-46. (rus.).
11. Aloyan R.M., Fedoseev V.N., Petrukhin A.B., Zaitseva I.A., Voronov V.A., Emelin V.A. Analysis of energy efficiency of air heat pumps and electric boilers in textile and clothing production. *Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*. 2016; 4(364):5-12. (rus.).
12. Aloyan R.M., Fedoseev V.N., Vinogradova N.V., Tkachev V.M., Emelin V.A. The thermodynamic efficiency of the air heat pumps used in low-rise textile structures. *Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*. 2017; 5(371):314-318. (rus.).
13. Azarov A.I., Alekseev V.P., Bykov A.V. et al. *Refrigerating machines: reference book*. Moscow, Light and food industry, 1982; 223. (rus.).
14. Trubaev P.A., Grishko B.M. *Heat pumps: tutorial*. Belgorod, Publishing house of BSTU named after V.G. Shukhova, 2009; 142. (rus.).
15. Aloyan R.M., Fedoseev V.N., Petrukhin A.B. Economic efficiency air heat pumps for industrial and non-use. *Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*. 2016; 1:18-21. (rus.).
16. Lukanin V.N., Morozov K.N., Khachiyan A.S. et al. *Internal combustion engines. In 3 books. Book 1. Theory of work processes* / ed. V.N. Lukanin. 2nd ed. Revised and expanded. Moscow, Higher school, 2005; 479. (rus.).
17. Halderman J.D., Mitchel C.D. *Automotive Engines. Theory and Servicing. 4th ed* / trans. from English. and ed. S.A. Dobrodeev. Moscow [and others], Williams, 2006; 659. (rus.).
18. Sokolov A., Shadrikov T. Methodology for calculating steady-state modes of non-sinusoidal ac increased frequency networks. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2020.
19. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Electric machines. AC machines: textbook for universities*. Moscow, Piter, 2008; 352. (rus.).

Received March 17, 2022.

Adopted in revised form on May 31, 2022.

Approved for publication on June 2, 2022.

**B I O N O T E S :** **Sergey V. Fedosov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Materials Science, Academician of Russian Academy of Architectural and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; fedosov-academic53@mail.ru;

**Azariy A. Lapidus** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production, Adviser to the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ORCID: 0000-0001-7846-5770; lapidus58@mail.ru;

**Vadim N. Fedoseev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Organization of Production and Urban Economy; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetyevo ave., Ivanovo, 153000, Russian Federation; amsokolov37@yandex.ru;

**Alexander M. Sokolov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, Adviser to the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; amsokolov37@yandex.ru.

#### *Contribution of the authors:*

*Sergey V. Fedosov — scientific guidance, idea, research concept, development of methodology, final conclusions.*

*Azariy A. Lapidus — material processing, methodology development, scientific text editing.*

*Vadim N. Fedoseev — research concept, development of methodology, revision of the text, final conclusions.*

*Alexander M. Sokolov — idea, research concept, methodology development, text writing, final conclusions.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

## Перераспределение приоритетов в управлении рисками в жилищном строительстве в условиях последствий внешних шоков

Борис Леонович Ефремян<sup>1</sup>, Вадим Сергеевич Канхва<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ДРИМСТРОЙ; г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Цель исследования заключается в изучении характера воздействия внешних экономических шоков на девелоперские компании в жилищном секторе и определении необходимости смещения приоритета системы управления рисками в сторону управления внешними рисками.

**Материалы и методы.** Методические подходы для решения указанной проблемы основаны на проведении анализа и сравнении статистических данных по экономическим циклам в строительной отрасли Российской Федерации, рассмотрении результатов аналитических исследований и оценок институциональных организаций, экспертных опросов.

**Результаты.** Представлен анализ влияния последствий кризисов с 2014 г. на рынок жилой недвижимости, а также их сравнение с позиции влияния на экономику строительной отрасли, изменения предлагаемого продукта, покупательной способности и потребительских предпочтений. В условиях текущей экономической ситуации и с учетом прогноза на ближайшие 5 лет установлены актуальные организационно-управленческие ориентиры, позволяющие обосновать необходимость изменения распределения рискованной нагрузки в цене производимого продукта, а также предложить дополнительные элементы риск-менеджмента для минимизации сложно прогнозируемых рисков в условиях высокой волатильности внешней экономической среды.

**Выводы.** Определено несоответствие учета внешних рисков в рамках переноса рискованной нагрузки предприятия строительной отрасли на себестоимость продукта в текущей экономической реальности. На период среднесрочной перспективы развития экономики деятельность девелоперской организации в жилищном секторе невозможна без дополнительного внедрения предложенных инструментов риск-менеджмента, а также построения финансовой модели проектов с учетом высокой вероятности новых внешних экономических шоков.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** управление рисками, устойчивость, неопределенность, санкции, пандемия, кризис-менеджмент, кризис, жилищное строительство

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Ефремян Б.Л., Канхва В.С. Перераспределение приоритетов в управлении рисками в жилищном строительстве в условиях последствий внешних шоков // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 756–768. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.756-768

Автор ответственный за переписку: Борис Леонович Ефремян, boris.efremayn@gmail.com.

## Redistribution of risk management priorities in the housing construction sector under the conditions of external shocks

Boris L. Efremyan<sup>1</sup>, Vadim S. Kankhva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DREAMSTROY; Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The purpose of the research is to study the nature of the impact of external economic shocks on development companies in the housing sector and determine the need to shift the priority of the risk management system towards external risk management.

**Materials and methods.** Methodological approaches to solving this problem stem from the analysis and comparison of statistical data on economic cycles in the construction industry of the Russian Federation, as well as the results of analytical studies and assessments, made by institutional organizations, and surveys, conducted by industry experts.

**Results.** The authors have analyzed the effect of the consequences of crises since 2014 on the residential real estate market, as well as their comparison in terms of the impact on the economy of the construction industry, changes in its product, purchasing power and consumer preferences. Relevant corporate and management-focused benchmarks have been set in terms of the current economic situation and its 5-year projections. These benchmarks justify the need to redistribute the risk

load within the product price and add supplementary risk management elements to minimize hard-to-predict risks under the conditions of a highly volatile external economic environment.

**Conclusions.** The authors have found that external risks are inadequately taken account of when the risk load is transferred from a construction industry enterprise to the cost of product in the present-day economic reality. Over the period of the medium-term development of the economy, the activity of a developer in the housing sector is impossible without the implementation of supplementary risk management tools and a financial model of projects that takes account of a high probability of new external economic shocks.

**KEYWORDS:** risk management, sustainability, uncertainty, sanctions, pandemic, crisis management, crisis, housing construction

**FOR CITATION:** Efremyan B.L., Kankhva V.S. Redistribution of risk management priorities in the housing construction sector under the conditions of external shocks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):756-768. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.756-768 (rus.).

*Corresponding author:* Boris L. Efremyan, boris.efremayn@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

Главными задачами, которые ставит перед собой система риск-менеджмента на предприятии строительной отрасли, являются:

- идентификация, оценка и агрегация рисков нагрузки на разных уровнях предприятия (персональный уровень, проектный, надпроектный и надорганизационный (внешние риски));
- определение приемлемого для организации уровня рисков нагрузки, применение инструментов управления рисками для снижения рисков нагрузки до нормативно установленной;
- перенесение остаточных показателей рисков нагрузки на себестоимость продукта и обеспечение предприятия строительной отрасли необходимыми ресурсами покрытия рисков, обладающих требуемой степенью ликвидности для их своевременного высвобождения, в рамках операционной деятельности.

В данном подходе преобладающее значение имеют внутренние риски предприятия строительной отрасли, т.е. риски, на которые предприятие может иметь прямое воздействие, либо эффект от которых с должной степенью точности поддается оценке как с точки зрения количественной оценки вероятности их реализации, так и с точки зрения «коридора» потенциального ущерба; а внешние риски (рыночные, экологические, социально-политические, макроэкономические и прочие) учитываются как маловероятные и не принимаются в расчет или переносятся на себестоимость продукта в виде процентной надбавки на минимальную норму прибыли продукта [1].

Однако в текущей экономической реальности ввиду неослабевающего влияния значительных внешних «шоков», приводящих к непрерывным структурным изменениям в общемировой экономике и локально в РФ, в последние годы на передний план выходят внешние риски.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для обоснования данного тезиса структурируем внешние факторы, которые оказали влияние на строительную отрасль Российской Федерации, как в рам-

ках общемировых трендов, так и локального характера, и проведем анализ степени их воздействия, опираясь на анализ и сравнение статистических данных по экономическим циклам в строительной сфере РФ, изучение результатов аналитических исследований и оценок институциональных организаций, анализ экспертных опросов представителей строительной отрасли.

В период с 2014 г. в порядке их возникновения:

- 1) двухсторонние санкции, введенные странами Запада и РФ в период 2014–2018 гг. вследствие присоединения Крымского полуострова к территории РФ и конфликта на востоке Украины, а также снижения мировых цен на энергоносители;
- 2) переход финансирования долевого строительства на эскроу-счета в 2019 г. с последующим дополнительным внесением поправок в законодательство в рамках закона № 214-ФЗ<sup>1</sup>;
- 3) ограничения, введенные в мире и на территории РФ в связи с пандемией в период 2020–2022 гг.;
- 4) двухсторонние санкции, введенные странами Запада и РФ в 2022 г. в связи с началом специальной военной операции на территории Украины по состоянию на 02.05.2022.

По п. 1, несмотря на усредненную оценку влияния данных событий — 0,8 % ВВП — ежегодную в период с 2014 по 2018 г. в рамках анализа экспертов Международного валютного фонда<sup>2</sup> и переход ВВП к росту уже в 2016 г., необходимо отметить следующие отрицательные факторы:

- темпы роста внутреннего спроса стали отрицательными;
- сохранились низкие темпы роста производительности;

<sup>1</sup> Об участии в долевом строительстве многоквартирных домов и иных объектов недвижимости и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 14.03.2022 № 214-ФЗ.

<sup>2</sup> Российская Федерация. Консультации 2019 года в соответствии со статьей IV — пресс-релиз, доклад персонала МВФ и заявление исполнительного директора от Российской Федерации // Доклад МВФ по стране. 2019. № 19/260.

• большая часть снижения темпов роста объемов производства также имела структурный характер.

Совокупность указанных факторов привела к падению реальных располагаемых доходов населения в период с 2014 по 2017 гг., росту плановых показателей инфляции, кратному росту курса валют.

Строительный рынок, имеющий опыт кризиса 2008 г., в условиях высокой волатильности внешней экономической среды, снизил темп открытия разрешений на строительство, что привело к ежегодной отрицательной динамике ввода жилья в эксплуатацию после рекордных 85,3 млн м<sup>2</sup> в 2015 г., а превышение данного показателя удалось достигнуть только в 2021 г. (табл. 1).

**Табл. 1.** Динамика ввода жилья в эксплуатацию<sup>3</sup>

**Table 1.** Dynamics of housing commissioning<sup>3</sup>

| Год<br>Year | Площадь ввода жилья в эксплуатацию, млн м <sup>2</sup><br>Commissioned housing, mln m <sup>2</sup> |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2015        | 85,3                                                                                               |
| 2016        | 80,2                                                                                               |
| 2017        | 79,2                                                                                               |
| 2018        | 75,7                                                                                               |
| 2019        | 82                                                                                                 |
| 2020        | 82,2                                                                                               |
| 2021        | 92,6                                                                                               |

В целом, невзирая на долгий срок возврата к аналогичным показателям предыдущего периода в части объемов строительства в период с 2015 по 2019 гг., а также существенный рост себестоимости строительства за счет высокого роста стоимости импортных материалов и превалирующего количества иностранной рабочей силы, авторы оценивают данный кризис как малый по глубине по количественным показателям и средний по срокам восстановления экономики. Также следует отметить, что этот кризис принципиально не изменил предлагаемый покупателям продукт на рынке, а также предпочтения покупателей, но наметил устойчивый тренд на необходимость импортозамещения применяемых материалов и оборудования, которые отвечали бы требованиям покупателей в соответствующих ценовых сегментах, в первую очередь по причине волатильности курса и повысившихся рисков ограничения трансграничных поставок из стран Запада.

Следует учитывать тот факт, что, несмотря на выход к устойчивой положительной динамике ключевых макроэкономических показателей к 2018 г., вве-

денные санкции продолжали являться существенным сдерживающим фактором экономического развития.

Следующим фактором, принципиально повлиявшим на структуру рынка жилой недвижимости, стал переход жилищного строительства в 2019 г. на обязательное проектное финансирование с применением эскроу-счетов. Внедрение данного инструмента проходило под эгидой окончательного решения проблемы обманутых дольщиков с помощью «вмещения» между девелопером и покупателем недвижимости промежуточного звена — банка. Финансирование строительства осуществляется за счет кредитных средств по договору проектного банковского финансирования, а средства покупателя квартиры поступают на специальный защищенный банковский счет — эскроу-счет. Средства от продажи недвижимости идут девелоперу только после полного выполнения обязательств по вводу объекта в эксплуатацию. В случае невыполнения девелопером своих обязательств, покупатель получает свои денежные средства в полном объеме, а банк может претендовать на получение в собственность текущего результата строительства.

Такой подход привнес ряд положительных для игроков рынка факторов, таких как:

- исключение для покупателя риска утраты средств;
- повышение требований к застройщику и экспертизе финансовой модели проекта;
- исключение рисков несвоевременного финансирования строительства по причине недостаточного темпа продаж недвижимости.

Вместе с тем это привело к следующим экономическим последствиям [2, 3]:

- снижение темпа восстановления показателя ввода жилья в эксплуатацию в связи с уменьшением предложения на рынке из-за увеличения издержек девелоперов пропорционально ставке проектного финансирования, а также ухода с рынка небольших девелоперских компаний. По данным единой информационной системы жилищного строительства (ЕИСЖС) с октября 2019 г. по февраль 2021 г. количество застройщиков в России сократилось на 33 % — с 3048 до 2026. Данный фактор приводит в свою очередь к уменьшению конкуренции и монополизации рынка, особенно в регионах с незначительным количеством устойчивых девелоперов;

- уменьшение привлекательности недвижимости, как инвестиционного инструмента, в связи с незаинтересованностью девелопера продавать недвижимость с существенным дисконтом на ранних этапах строительства при наличии открытой кредитной линии. В данном случае девелопер осуществляет продажи только в рамках обеспечения выполнения условий банковского финансирования, так получаемые средства от продажи недвижимости уменьшают процентную ставку по кредиту;

- сокращение на рынке предложений с нестандартными и инновационными решениями, а значит,

<sup>3</sup> Ввод в действие жилых домов в городской и сельской местности в Российской Федерации // Федеральная служба государственной статистики РФ. Раздел «Жилищное строительство». 28.03.2022.

проектов с повышенным риском инвестирования для банка;

- увеличение себестоимости строительства, что увеличивает стоимость квадратного метра для покупателя недвижимости.

Влияние этих изменений авторами оценивается как в целом незначительное, поскольку в конечном итоге, благодаря коррекции количества предложений на рынке и дополнительным стимулирующим мерам со стороны правительства РФ по субсидированию кредитной ставки в 2020 г., нивелировало указанные выше издержки за счет роста продажной стоимости недвижимости.

Также необходимо отметить, что оценить влияние данных изменений на девелоперский рынок в среднесрочной перспективе не представляется возможным, так как в марте 2020 г., спустя менее чем через год после перехода на обязательное проектное финансирование, произошло следующее событие, принципиально повлиявшее на строительную отрасль — пандемия COVID-19.

В рамках сдерживания распространения эпидемии в РФ, как и во всех странах, были введены меры ограничения экономической активности<sup>4, 5</sup>, воздействие которых привело к [4–9]:

- 1) периодическому введению режима «нерабочих дней». Оцениваем их влияние как незначительное, в связи с отнесением строительного производства к предприятиям непрерывного производственного цикла, однако повлекшим за собой срыв сроков производства работ на не менее чем 2 месяца;

- 2) жесткие ограничения трансграничного перемещения населения, рост стоимости таких перемещений. В связи с высокой зависимостью строительной отрасли от иностранной рабочей силы, подрядные организации столкнулись с острым дефицитом кадров перед началом строительного сезона. Оцениваем данный фактор как средний по степени влияния, повлекший за собой незначительное общее снижение темпов производства работ и значительный (от 30–70 % в зависимости на направления работ) рост фонда оплаты труда рабочей силы;

- 3) существенному росту стоимости базовых строительных материалов. По отдельным направлениям рост стал кратным (в качестве примера можно выделить металлопрокат — рост в 2 раза, некоторые позиции по пиломатериалам — рост до трех раз, рост цен на теплоизоляционные материалы — 40–80 % и т.д.). Оцениваем влияние данного фактора как значительное;

- 4) росту логистических издержек, разрывам логистических цепочек, срывам сроков поставок оборудования и материалов из стран, которые ввели жесткие карантинные меры и остановили производ-

ства. Отдельно стоит отметить сокращение объемов производства сложного инженерного оборудования по причине острой нехватки на рынке полупроводников и, как следствие, микрочипов. По данной причине срок изготовления и поставок многих позиций инженерного оборудования вырос с 1–2 мес. до 3–6 мес.;

- 5) продолжившемуся снижению реальных располагаемых доходов граждан;

- 6) необходимости ускоренного внедрения инструментов цифровизации строительной отрасли.

Оцениваем все вышеперечисленные издержки как существенные, что также нашло свое отражение в опросе участников строительной отрасли, проводимом порталом «ЕРЗ», по оценкам влияния пандемии на деятельность застройщиков жилья на момент мая 2020 г.<sup>6</sup>, наряду с ожиданиями резкого падения спроса и продаж (62,5 % опрошенных), неработающими государственными институтами по оформлению сделок (50,9 %), неопределенностью и невозможностью осуществления планирования (27,8 %), резко возросшему риску банкротства контрагентов (27,3 %) и т.д.

Однако внедрение существенных мер поддержки строительной отрасли позволило поддержать спрос на недвижимость, пролонгировать исполнение своих обязательств застройщиками перед покупателями недвижимости, что также было отмечено участниками рынка в опросе по итогам 2020 г., это в целом дало возможность вывести строительную отрасль из шокового состояния и привело к росту ключевых показателей отрасли<sup>7</sup>. К мерам, которые оказали или окажут в будущем наибольшее позитивное влияние на бизнес в сфере строительства, опрашиваемые отметили:

- принятие программы государственного субсидирования ставок по ипотеке для новостроек — до 6,5–59,38 % опрошенных;
- снижение ключевой ставки ЦБ с 6,25 % до уровня 4,25 % годовых — 54,7 %;
- поддержка правительством РФ и Госдумой законопроекта о всероссийской реновации — 32,8 %;
- снижение требований к первоначальному взносу по ипотеке — 28,1 %;
- принятие программы государственного субсидирования ставок по кредитам застройщикам — 28,1 %;
- сокращение сроков получения технических условий с 14 календарных до 7 рабочих дней — 26,56 %;

<sup>6</sup> Анкета по оценке влияния пандемии коронавируса на деятельность застройщиков жилья. Опрос № 3 // Единый ресурс застройщиков. URL: [https://profi.erzrf.ru/poll/pandemic\\_impact3/](https://profi.erzrf.ru/poll/pandemic_impact3/)

<sup>7</sup> Итоги отрасли 2020. Опрос ноябрь 2020 г. // Единый ресурс застройщика. URL: <https://profi.erzrf.ru/archive-poll/result/positive/>

<sup>4</sup> Аналитическая записка. Жилищное строительство // Банк России. 2020. № 2 (3).

<sup>5</sup> Аналитическая записка. Жилищное строительство // Банк России. 2021. № 2 (3).

• иные позиции — менее 25 % (разрешение на раскрытие эскроу после разрешения на ввод объекта в эксплуатацию без регистрации права, принятие общенационального плана мероприятий по восстановлению доходов населения и росту экономики, содержащего большой раздел по строительству, разрешение внутригрупповых займов (№ 202-ФЗ), отмене ряда СанПиНов, внедрение в ЕИСЖС функций подачи в электронной форме заявления на выдачу разрешения на строительство, перевод трети СНиПов в разряд рекомендованных, уменьшение размера страховых взносов для малого и среднего бизнеса и др.).

Следует отметить, что совокупность принятых мер, а также влияние ранее описанного процесса перехода на проектное финансирование привело к опережающему спросу и росту цен на жилье, по сравнению с инфляцией на иные товары и услуги, что также подстегивало инвестировать имеющиеся накопления у населения в консервативные активы (недвижимость) с целью сохранения накоплений. Все это привело к тому, что существенный рост цен на жилье нивелировал для покупателей недвижимости положительный эффект от снижения ипотечных ставок, однако позволил не только предотвратить провал темпов ввода жилья в эксплуатацию в 2020 г., но и поставить рекорд в 2021 г., что вселило уверенность в рынок и дало возможность нарастить портфели проектов ключевых игроков рынка в ожидании дальнейших мер дерегуляции строительной отрасли, улучшений макроэкономических показателей страны, завершения пандемии и перехода общемировой и российской экономик в устойчивую фазу роста.

Данный кризис внес принципиальное переосмысление потребительского спроса, особенно в сегментах бизнес и премиум класса. Самоизоляция выдвинула на первый план для покупателей следующие параметры: качественная придомовая территория, создающая комфортные условия для досуга и свободная от машин, увеличение площади квартир, обеспечивающей возможность полноценной работы из дома [10], в том числе отмечен резкий рост спроса на индивидуальное жилищное строительство. В конкурентной борьбе начали выигрывать проекты, которые предоставляют в шаговой доступности, а в идеале внутри среды обитания человека, максимальный перечень услуг и обеспечивающие возможность работать удаленно (в качестве примера можно рассмотреть появление в жилых комплексах коворкингов). В целом данные изменения авторами оцениваются положительно, так как отвечают современным трендам комфортной городской среды.

Следующей поворотной точкой, потребовавшей на текущий момент внесения структурных изменений в деятельность предприятий строительной отрасли, является введение двухсторонних санкций странами Запада и РФ с февраля 2022 г. в связи с началом специальной военной операции на территории Украины.

Важно заметить, что принципиальным отличием этих от предыдущих двухсторонних санкций служат

их асимметрия издержек между инициаторами и мишенью, потенциальная длительность санкций, количество стран инициаторов, комплексность санкций. Современные исследования показывают, что как каждый отдельный из этих факторов существенно препятствует развитию экономики, так и их совокупность оказывает коммуникативный негативный эффект [11–15].

В рамках строительной отрасли следует отметить следующие отрицательные последствия.

1. Прогноз на резкое ухудшение основных макроэкономических показателей (ВВП, инфляция, уровень безработицы, и т.д.)<sup>8,9</sup>, что приведет к неизбежному слоому положительного тренда на восстановление покупательной способности населения после пандемии.

2. Увеличение издержек на обеспечение проектного банковского финансирования пропорционально росту ключевой банковской ставки (рост ключевой ставки составил 11,5 % (с 9,5 до 20 % в феврале)). На текущий момент наметился тренд на возвращение ключевой ставки к изначальным значениям после «охлаждения» внутреннего спроса на иностранную валюту (на 29.04.2022 Центробанк объявил о втором снижении ключевой ставки до 14 %), однако даже текущее значение ключевой ставки выведет с рынка, особенно регионального, значительную долю низкомаржинального сегмента рынка, что в первую очередь приведет к снижению предложения и росту цен на объектах эконом и комфорт классов.

3. Текущий отказ от работы в России либо неопределившийся статус ключевых мировых производителей и поставщиков импортного оборудования и материалов, аналоги которых со схожими потребительскими качествами в большинстве своем не представлены в России или в освоенных и проверенных иностранных дружественных рынках.

4. Ограничения в трансграничных денежных переводах и поставках иностранных материалов и оборудования, что значительно усложняет взаимодействие с иностранными контрагентами и резко повышает риски реализации обстоятельств непреодолимой силы, что в свою очередь приводит к наценке за риски и повышению логистических издержек со стороны иностранных поставщиков, а также росту стоимости отечественных материалов в связи с увеличившимся спросом. В этот пункт стоит также включить высокую волатильность курса рубля.

Авторами описана ситуация на начало мая, и фактическое изменение рынка имеет практически неограниченные «коридоры» для изменения, так как сложившаяся ситуация в современных реалиях является беспрецедентной.

<sup>8</sup> War in the Region: Europe and Central Asia Economic Update. Spring 2022. Pp. 91–92.

<sup>9</sup> Regional economic update. in the shadow of the war. The economic fallout from the war on Ukraine. March 2022. P. 14.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отличительная особенность всех приведенных выше «черных лебедей» — невозможность их прогнозирования с применением аналитических инструментов. Например, на основе сводных опережающих экономических индикаторов [16–19] можно было спрогнозировать экономический кризис 2008 г., так как природа таких кризисов в первую очередь находилась не в экономической плоскости. Также на этапе начала данных кризисов сложно прогнозировать их количественное влияние как на основные макроэкономические показатели, так и влияние на отдельные секторы экономики, в связи с тем, что в условиях современной экономики нет достаточного актуального опыта, на базе которого можно дать подобные оценки.

Также на основе представленного выше анализа можно сделать вывод о том, что прогнозирование деятельности девелоперской компании в среднесрочной

перспективе (до пяти лет) необходимо осуществлять исходя из неизменного ожидания схожих экономических шоков, что требует определения актуальных организационно-управленческих ориентаций, отличных от классических фаз цикла рынка (табл. 2).

После определения актуальных организационно-управленческих ориентаций следующим шагом будет идентификация направлений операционной деятельности, на которые описанные выше шоки оказывают максимальное влияние, и сбои в которых приводят к значительной корректировке первоначально поставленных задач проектам. В качестве описательной основы в большей степени возьмем текущий кризис в связи с тем, что он ставит перед нами большие вызовы нежели предыдущие (табл. 3). Важно отметить, что в рамках данного анализа мы будем рассматривать только вероятные или уже имеющиеся воздействия внешних обстоятельств, а также рекомендуемые инструменты риск-менеджмента в качестве ответной реакции на них.

**Табл. 2.** Матрица актуальности организационно-управленческих ориентаций организации на основе экономических циклов

**Table 2.** Relevance matrix of corporate and management benchmarks stemming from economic cycles

| Матрица актуальности<br>Relevance matrix                                                    | Подъем<br>Rise | Стабильность<br>Stability | Спад<br>Decline | Пребывание в ожидании<br>внешних шоков<br>Expectation of external shocks |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Наращивание кадрового ресурса<br>Building up human resources                                | X              | /                         | O               | O                                                                        |
| Техническое переоснащение основных фондов<br>Technical re-equipment of fixed assets         | X              | /                         | O               | /*                                                                       |
| Эффективность организационной структуры<br>Efficiency of organizational structure           | /              | X                         | X               | X                                                                        |
| Прибыль<br>Profit                                                                           | /              | X                         | X               | /                                                                        |
| Структура портфеля продуктов<br>Structure of the product portfolio                          | O              | /                         | X               | X                                                                        |
| Структура используемого капитала<br>Structure of the capital used                           | O              | /                         | X               | X                                                                        |
| Выручка<br>Revenue                                                                          | X              | /                         | /               | X                                                                        |
| Создание сберегательных высоколиквидных активов<br>Creation of highly liquid savings assets | O              | X                         | X               | /                                                                        |
| Выполнение запланированных финансовых показателей<br>Achievement of financial targets       | /              | X                         | /               | O**                                                                      |
| Продвижение бренда<br>Brand promotion                                                       | X              | X                         | /               | O***                                                                     |

*Примечание:* X — актуален; / — относительно актуален; O — неактуален; \* — под техническим переоснащением основных фондов в данной фазе понимаются только мероприятия, обеспечивающие текущий уровень фондоотдачи; \*\* — ежемесячно обеспечивается актуализация запланированных финансовых задач, в постановке финансовых задач приоритет отдается выполнению организацией базовых обязательств перед контрагентами и аккумуляции ресурсов покрытия рисков текущей операционной деятельности, обеспечению ресурсов покрытия в случае резкого ухудшения ситуации на рынке; \*\*\* — продвижение бренда перестает быть актуальным, однако это не касается продвижения брендов отдельных проектов.

*Note:* X — relevant; / — relatively relevant; O — irrelevant; \* — technical re-equipment of fixed assets at this stage means only activities that ensure the current level of return on assets; \*\* — monthly revision of the planned financial tasks is performed, in the statement of financial tasks priority is given to fulfillment of the basic obligations to contractors and accumulation of resources to cover risks of current operations, provision of coverage resources in case of a sharp deterioration in the market situation; \*\*\* — brand promotion ceases to be relevant, but it does not apply to the brand promotion of individual projects.

Табл. 3. Идентификация основных направлений деятельности девелоперской компании, подверженных максимальному влиянию внешних шоков  
 Table 3. Identification of the main areas of activity of a development company that are subject to the maximum influence of external shocks

| Направления деятельности, подверженные высокой вероятности рисков воздействия<br>Areas of activity subject to a high probability of risk exposure                                               | Рекомендуемые к использованию инструменты риск-менеджмента и изменения бизнес-процессов<br>Recommended tools for risk management and business process changes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Риск резкого изменения покупательной способности населения ввиду внешних шоков<br>The risk of a drastic change in the purchasing power of the population due to external shocks                 | Оценка девелоперских проектов на предынвестиционной стадии, разработка концепции проекта и задания на проектирование<br><i>Assessment of development projects at the pre-investment stage, development of the project concept and design assignment</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Риск изменения потребительских предпочтений на стадии реализации проекта и осуществления продаж<br>The risk of changes in consumer preferences at the stage of project implementation and sales | <ul style="list-style-type: none"> <li>• внедрение в деятельность компании инструментов динамического анализа изменений ценообразования на рынке недвижимости;</li> <li>• уход от ориентации на рынки сбыта недвижимости в городских образованиях/районах с низкой диверсификацией занятости населения по отраслям (моногорода);</li> <li>• проведение стресс-тестирования финансовой модели объекта при переходе на каждый новый этап реализации проекта. Особый акцент сделать на данный анализ при принятии решения перед открытием разрешения на строительство и проектного финансирования</li> <li>• introduction of instruments for the dynamic analysis of pricing changes on the real estate market into the company's activity;</li> <li>• a move from real estate markets in urban formations/districts with low diversification of employment by sectors (single-industry towns);</li> <li>• stress-testing of the financial model of a facility during the transition to each new stage of the project implementation. Particular emphasis should be placed on this analysis when a decision is made before the issuance of a construction permit and disbursement of project financing</li> <li>• универсализация предлагаемого продукта под максимально широкий круг потребителей, переход к конструктивным решениям, обеспечивающим максимально свободные планировочные решения;</li> <li>• при прорисовке квартирографий проектов исходить из уменьшения покупательской способности населения и переходить к уменьшению закладываемых норм м<sup>2</sup> за чел.;</li> <li>• исключение из портфеля инновационных проектов, гипотезы потребительских предпочтений по которым не опробованы на рынке;</li> <li>• сместить акцент на внедрение инструментов, улучшающих визуализацию получаемого продукта, упрощающих процесс приобретения и оформления сделок по покупке продукта;</li> <li>• привлечение при анализе ТЭП и концепции проекта внешних экспертов, специализирующихся в том числе на анализе макроэкономических данных по рынку, дополняющих внутренние компетенции девелоперской компании. Дополнительная проверка актуальности потребительских предпочтений сторонними специалистами до получения разрешения на строительство и открытия проектного финансирования</li> <li>• universalization of the proposed product for the widest range of consumers, transition to design solutions that provide maximum freedom of space-planning solutions;</li> <li>• designing project apartments with regard for a decrease in the purchasing power of the population and a move to a reduction in the norms of square meters per person;</li> <li>• withdrawal of innovative projects from the portfolio, if the hypotheses of consumer preferences in respect of these projects have not been market-tested;</li> <li>• shifting the focus on the introduction of tools that improve the visualization of the resulting product, simplifying the process of acquisition and registration of transactions for the purchase of the product;</li> </ul> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <p>• involvement of external experts specializing in the analysis of feasibility studies and project concepts, including the analysis of macroeconomic market data, supplementing the internal competencies of a development company. Additional verification of the relevance of consumer preferences by third-party experts before obtaining a construction permit and disbursement of the project financing</p> <p>• в рамках проектирования стадии «П» заложить в техническое задание на проектирование условия обеспечения стоимости проектируемого объекта, заложенные в финансовую модель объекта (с поправкой на инфляционные ожидания). Степень запрашиваемой детализации проектирования стадии «П» должна позволять обеспечить степень потрешности оценки стоимости проекта не более 5 %. Также можно рассмотреть подход перехода на одностадийное проектирование;</p> <p>• внедрение проектирования на основе BIM-моделирования, что позволит минимизировать риски проектных коллизий, а также при правильности постановки изначальной задачи получить для расчета стоимости корректные ведомости объемов работ;</p> <p>• в случае, если девелопер не выполняет работы собственными силами, то рекомендуется переходить на контрактное подрячка по системе единого генерального подряда (проектирование документации стадии «Р» и строительство). Также следует обеспечить внедрение в контракт системы мотивирования контрагентов за обеспечение оптимизации проектных решений</p> <p>• as part of the design of the “p” stage, the design assignment must have conditions needed to cover the cost of the designed facility, in compliance with the financial model of the facility (adjusted for inflationary expectations). The degree of requested detailing of the “p” stage design should allow for a degree of error in estimating the cost of the project of no more than 5 %. One can also consider the switching to one-stage design;</p> <p>• implementation of BIM design that allows to minimize the risk of project collisions and to get correct lists of works to calculate the cost if the initial task is set correctly;</p> <p>• if the developer does not perform the work by his own efforts, it is recommended to switch to an agreement with a contractor under a single general contracting system (stage “p” design documentation and construction). It is also necessary to ensure the introduction of a system of incentives for contractors to ensure the optimization of design solutions</p> |
| <p>Риск применения на этапе проектирования решений, приводящих к удорожанию проекта. В том числе исключение удорожания проекта на этапе СМР за счет разнообразных проектных коллизий</p> <p>The risk of applying solutions at the design stage that increase the cost of the project, including the prevention of the project appreciation at the stage of construction and assembly due to various design collisions</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p>Обеспечение финансирования девелоперского проекта на этапе его строительства</p> <p>Development project financing at the construction stage</p>                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p>Изменение условий проектного финансирования по причине изменения ключевых макроэкономических показателей (ставка кредитования, средневзвешенная ставка кредитования, максимальные размеры авансирования и прочие)</p> <p>Changes in the terms of project financing due to changes in key macroeconomic indicators (credit rate, weighted average credit rate, maximum prepayment amount, etc.)</p>                     | <p>• фиксация в условиях договоров проектного банковского финансирования значений ставки кредитования и средневзвешенной ставки кредитования на период всего действия договора неизменной ставки кредитования;</p> <p>• в случае невозможности выполнения вышеизложенного условия, осуществить страхование риска повышения ключевой ставки, приведшего к увеличению плавающей кредитной ставки, у банка</p> <p>• the terms and conditions of the project bank financing agreements must specify the values of the credit rate and the weighted average credit rate for the duration of the agreement, which is an unchanged credit rate;</p> <p>• in case it is impossible to meet the above condition, it is necessary to insure the risk of an increase in the key rate, resulting in an increase in the floating rate</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

| Рекомендуемые к использованию инструменты риск-менеджмента и изменения бизнес-процессов<br>Recommended tools for risk management and business process changes                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Направления деятельности, подверженные высокой вероятности рисков воздействия<br>Areas of activity subject to a high probability of risk exposure                                                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• жесткая стандартизация процессов и повышение управленческого учета в компании. В случае если компания ведет работы собственными силами: уменьшение издержек на закупку материалов за счет предварительной раскладки материалов в рамках проектирования (минимизировать бой материала, обрезки, кражу материалов и др.), повысить механизированность работ, уровень планирования работ для исключения простоя рабочей силы и т.д.;</li> <li>• на периоды высокой волатильности стоимости работ и материалов нет возможности обеспечения выполнения работ контрагентами в рамках твердой цены договора. Рекомендуем переход контрактов на принцип «открытой книги» — компенсация генеральному подрядчику прямых затрат + % за генподрядные услуги. Для отслеживания обоснованности предоставляемых текущих затрат девелоперской компании требуется внедрить внутренние механизмы мониторинга цен на материалы, механизмы и рабочую силу, либо привлечение сторонних специалистов для данной задачи</li> <li>• strict standardization of processes and tighter managerial accounting in the company. If the company performs the work itself: reducing the cost of procurement of materials through pre-deployment of materials within the framework of the project design (to minimize the scrap of material, cuttings, theft of materials, etc.), rising the mechanization of work, tighter work scheduling to eliminate the downtime of the workforce, etc.;</li> <li>• at the times of the high volatility of the cost of work and materials there is no way to ensure that contractors perform the work at the fixed price of the contract. We recommend the reengineering of contracts according to the «open book» principle: compensation of direct costs to the general contractor + % for general contracting services. To track the expediency of current costs of the development company, it is necessary to implement internal mechanisms for the monitoring of prices for materials, machinery and labour, or attract third-party specialists to perform this task</li> </ul> |
| Вывод авансовых средств из реализации проекта контрагентами<br>Withdrawal of prepayment funds from the project by the counterparties                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• целевое авансирование контрагентов подрядчика с применением механизма распределительных писем</li> <li>• targeted prepayments made to the contractor's counterparties using the distribution letter mechanism</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Обеспечение проекта материалами, людскими и иными ресурсами на стадии реализации и эксплуатации. Работа с контрагентами<br>Providing the project with materials, machinery, human and other resources at the stage of implementation and operation. Work with contractors |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Уход с рынка поставщиков иностранных материалов и оборудования<br>Exit of suppliers of foreign materials and equipment from the market                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• в рамках проработки технического задания на проектирование отдавать приоритет применению материалов и оборудования в следующей последовательности: российские (производства которых локализованы на территории РФ), иностранные (дружественные РФ страны, производства которых локализованы на территории РФ), российские (производства которых локализованы в дружественных РФ странах), иностранные (дружественные РФ страны, производства которых локализованы в дружественных РФ странах). При применении иного оборудования, в случае отсутствия альтернативы, требуется получение от потенциальных поставщиков гарантийных писем обеспечения поставки. В данном случае рекомендуем применение оплаты оборудования сразу после открытия проектного финансирования и складирование его на территории РФ до применения;</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

|                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• альтернативный способ поставки иностранного оборудования — открытие/сотрудничество с «торговыми домами», расположенными на территории приграничных дружественных стран, входящих в Евразийский экономический союз, что при условии действия разрешения на так называемый «параллельный импорт» позволит обеспечить прогнозируемую поставку материалов, однако ощутимо увеличивает логистические издержки</li> <li>• within the framework of the design assignment, priority must be assigned to the use of materials and equipment in the following sequence: Russian (whose production is localized in Russia), foreign (Russian Federation-friendly countries, whose production is localized in Russia), Russian (whose production is localized in Russian Federation-friendly countries), foreign (Russian Federation-friendly countries, whose production is localized in Russian Federation-friendly countries). The use of other equipment, if there is no alternative, requires obtaining letters of guarantee from potential suppliers to ensure delivery. In this case we recommend making payment for the equipment immediately after the disbursement of project financing and its warehousing in RF territory until the application;</li> <li>• an alternative method of supplying foreign equipment: opening of/cooperation with “trading houses” located on the territory of bordering friendly countries that are members of the Eurasian Economic Union, which, subject to the permit for the so-called “parallel import” will ensure a predictable supply of materials, but this supply technique can significantly increase the logistics costs</li> </ul> |
| Банкротство контрагентов<br>Bankruptcy of counterparties                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• внедрение, помимо усиленной аккредитации контрагентов до заключения договора, периодической (не реже раз в полгода) финансовой аккредитации действующих контрагентов с целью проверки их финансовой устойчивости;</li> <li>• внедрение механизмов возможности ущемления (не реже двух раз в месяц) выплат по выполненным объемам работ, а также уменьшение временного лага с момента подачи закрывающих документов до их оплаты</li> <li>• in addition to more thorough accreditation of counterparties, introduction of periodic (at least, once every six months) financial accreditation of existing counterparties to check their financial standing before the conclusion of the contract;</li> <li>• introduction of mechanisms to ensure more frequent (at least, twice a month) payments for the completed work, as well as reducing the time lag from the submission of closing documents to the payment</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Невозможность обеспечения эксплуатации иностранного оборудования на период гарантийного периода<br>Inability to ensure the operation of foreign equipment during the warranty period | <ul style="list-style-type: none"> <li>• включение в техническое задание на проектирование требования по дополнению копий иностранных иностранных оборудования и материалов необходимостью поставки резервов и расходных материалов для обеспечения замены вышедшего из строя оборудования (или его обслуживания) и испорченных материалов на период гарантийных обязательств</li> <li>• inclusion in the design specification of the requirement to supplement the foreign equipment and materials by the need to supply reserves and consumables to ensure the replacement of failed equipment (or its maintenance) and spoiled materials for the period of warranty obligations</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

Принципиально необходимые меры со стороны государственных органов в данной статье не рассматриваются, однако важно вкратце их перечислить: скорейшее возвращение ключевых макроэкономических показателей к докризисным (в первую очередь ключевой ставки), снятие валютных ограничений, частичное раскрытие эскроу-счетов либо разрешение банков их использования равносильно вкладам (что позволит снизить процент по кредитованию строительства), упрощение государственного регулирования строительной отрасли, стимулирование спроса на недвижимость и уменьшение налоговой нагрузки, снятие с девелоперов части социальной нагрузки в рамках возводимых объектов (передача их на государство), стимулирование внутреннего производства материалов и оборудования, а также кратного роста числа подготовленных строительных кадров и др.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенный в исследовании анализ внешних экономических «шоков», начиная с 2014 г. и заканчивая текущей экономической реальностью, показывает несоответствие учета внешних рисков как в части переноса рисков на себестоимость продуктов предприятий строительной отрасли, так и в части построения финансовых моделей девело-

перских продуктов. Высокая волатильность внешней среды на протяжении последних 8 лет, а также текущие макроэкономические прогнозы позволяют утверждать, что наметился тренд на отсутствие устойчивого прогнозируемого развития экономики и, как следствие, необходимость осуществления деятельности предприятий строительной отрасли в условиях перманентного ожидания смены экономического цикла в сторону непрогнозируемого количественного спада. На период среднесрочной перспективы развития строительной отрасли РФ учет внешних рисков с применением разных инструментов риск-менеджмента должен быть внедрен на всех уровнях деятельности предприятия строительной отрасли: стратегического планирования, операционной деятельности подразделений, персональном уровне.

Акцент деятельности предприятия смещается в сторону сокращения непроизводственных расходов, повышения операционной эффективности, оптимизации проектных решений, усовершенствования и универсализации предлагаемого продукта.

Также для крупных игроков рынка недвижимости не следует пренебрегать продвижением информационной и политической повести оказания дополнительных послаблений и мер поддержки для строительной отрасли.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Канхва В.С., Ефремян Б.Л. Классификация рисков по уровням операционного управления // Научное обозрение. 2015. № 12. С. 295–298.
2. Рублева Т.А. Роль проектного финансирования в развитии рынка финансирования недвижимости в России // Финансы и кредит. 2021. Т. 27. № 4 (808). С. 894–912. DOI: 10.24891/fc.27.4.894
3. Пухова В.В. Система развития первичного рынка жилой недвижимости в условиях проектного финансирования // Известия Байкальского государственного университета. 2021. Т. 31. № 1. С. 90–97. DOI: 10.17150/2500-2759.2021.31(1).90-97
4. Боркова Е.А., Изотова А.Г., Литвинова Н.А. Цифровая трансформация строительной отрасли в условиях макроэкономического шока COVID-19 // Вопросы инновационной экономики. 2020. Т. 10. № 4. С. 2129–2140. DOI: 10.18334/vines.10.4.111191
5. Чапаргина А.Н., Емельянова Е.Е. Рынок жилья России в условиях постпандемической экономики // Научные труды Вольного экономического общества России. 2020. Т. 223. № 3. С. 372–379. DOI: 10.38197/2072-2060-2020-223-3-372-379
6. Стерник С.Г., Гареев И.Ф. Структурные изменения на рынке жилой недвижимости в 2020 году: экспансия государственной поддержки и системный рост индивидуального жилищного строительства //

Жилищные стратегии. 2021. Т. 8. № 2. С. 85–130. DOI: 10.18334/zhs.8.2.112369

7. Доржиева В.В. Строительная отрасль: тенденции развития, влияние пандемии и условия восстановительного роста в контексте задач структурной модернизации // Научные труды Вольного экономического общества России. 2020. Т. 223. № 3. С. 237–243. DOI: 10.38197/2072-2060-2020-223-3-237-243

8. Курманова Л.Р., Садыкова А.И., Хабибуллин Р.Г. Тенденции развития сферы жилищного строительства в современных условиях // Инновационное развитие экономики. 2021. № 5 (65). С. 105–113. DOI: 10.51832/2223-798420215105

9. Богданова Ю.Н., Хоркина Ж.А. Платежеспособный спрос и уровень доступности жилья на рынке недвижимости Москвы // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 11. С. 63–68. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.11.63-68

10. Евдокимова Е.П. Трансформация повседневных практик городского населения России в условиях пандемии COVID-19 // Социология и право. 2020. № 4 (50). С. 32–41. DOI: 10.35854/2219-6242-2020-4-32-41

11. Гринберг Р.С., Белозеров С.А., Соколовская Е.В. Оценка эффективности экономических

санкций: возможности систематического анализа // Экономика региона. 2021. Т. 17. № 2. С. 354–374. DOI: 10.17059/ekon.reg.2021-2-1

12. Eyler R. Economic sanctions. Palgrave Macmillan, 2007. 237 p. DOI: 10.1057/9780230610002

13. Martin L. Coercive cooperation: Explaining multilateral economic sanctions. Princeton : Princeton University Press, 1992. 324 p.

14. Walentek D. Instrumental or symbolic? The role of multilateral economics sanctions. 2019. 43 p. URL: [https://www.peio.me/wp-content/uploads/2019/01/PEIO12\\_paper\\_19.pdf](https://www.peio.me/wp-content/uploads/2019/01/PEIO12_paper_19.pdf)

15. Smeets M. The theory and practice of economic sanctions // Russian Trade Policy. 2019. Pp. 66–78. DOI: 10.4324/9780429464041-5

16. Головина О.Д., Бадаш Х.З., Поляков Ю.Н. Определение прогностических свойств набора сов-

падающих и опережающих индикаторов // Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право. 2009. № 2. С. 144–150.

17. Поздеев В.Л. Методология экономического анализа циклических колебаний в развитии хозяйствующих субъектов : дис. ... д-ра экон. наук. Йошкар-Ола : Марийс. гос. техн. Университет, 2008. 365 с.

18. Hymans S.H., Greenspan A., Shiskin J., Early J. On the use of leading indicators to predict cyclical turning points // Brookings Papers on Economic Activity. 1973. Vol. 1973. Issue 2. P. 339. DOI: 10.2307/2534095

19. Ефремян Б.Л. Разработка интегрированной системы управления рисками на предприятиях строительной отрасли : автореф. дис. ... канд. экон. наук. М., 2016. 22 с.

Поступила в редакцию 13 мая 2022 г.

Принята в доработанном виде 25 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Борис Леонович Ефремян** — кандидат экономических наук, руководитель строительства; **ДРИМСТРОЙ**; 108802, г. Москва, ул. Николо-Хованская, д. 28 стр. 5; ORCID: 0000-0002-9826-392X; boris.efremayn@gmail.com;

**Вадим Сергеевич Канхва** — кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и управления в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5200-4534, ORCID: 0000-0003-2611-1684; kanhvavs@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Ефремян Б.Л. — разработка концепции исследования, написание текста статьи, подготовка итоговых выводов.

Канхва В.С. — научное редактирование, нормативно-методическое обеспечение.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Kankhva V.S., Efremyan B.L. Classification of risks according to operational management levels. *Scientific Review*. 2015; 12:295-298. (rus.).

2. Rubleva T. The role of project financing in the development of the real estate funding market in Russia. *Finance and Credit*. 2021; 4(808):894-912. DOI: 10.24891/fc.27.4.894 (rus.).

3. Pukhova V. The system of developing the primary market of residential real estate in terms of project financing. *Bulletin of Baikal State University*. 2021; 31(1):90-97. DOI: 10.17150/2500-2759.2021.31(1).90-97 (rus.).

4. Borkova E.A., Izotova A.G., Litvinova N.A. Digital transformation of the construction industry in the context of the COVID-19 macroeconomic shock. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2020; 10(4): 2129-2140. DOI: 10.18334/vinec.10.4.111191 (rus.).

5. Chapargina A.N., Emelyanova E.E. Russian housing market in the conditions of post-pandemic economy. *Scientific Works of the Free Economic Society of Russia*. 2020; 223(3):372-379. DOI: 10.38197/2072-2060-2020-223-3-372-379 (rus.).

6. Sternik S.G., Gareev I.F. Structural changes in the residential real estate market in 2020: expansion of state support and systematic growth of individual housing construction. *Russian Journal of Housing Research*. 2021; 8(2):85-130. DOI: 10.18334/zhs.8.2.112369 (rus.).

7. Dorzhieva V. Construction industry: development trends, impact of the pandemic, and conditions for recovery growth in the context of structural modernization. *Scientific works of the Free Economic Society of Russia*. 2020; 223(3):237-243. DOI: 10.38197/2072-2060-2020-223-3-237-243 (rus.).

8. Kurmanova L.R., Sadykova A.I., Khabibulin R.G. Trends in the development of housing construc-

tion in modern conditions. *Innovative Development of the Economy*. 2021; 5(65):105-113. DOI: 10.51832/2223-798420215105 (rus.).

9. Bogdanova Y.N., Horkina Z.A. Solvent demand and housing affordability levels in the Moscow residential real estate market. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 11:63-68. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.11.63-68 (rus.).

10. Evdokimova E. Everyday life transformation of the urban population of Russia in the context of the COVID-19 pandemic. *Sociology and Law*. 2020; 4(50):32-41. DOI: 10.35854/2219-6242-2020-4-32-41 (rus.).

11. Grinberg R.S., Belozyorov S.A., Sokolovska O. Effectiveness of economic sanctions: assessment by means of a systematic literature review. *Economy of Region*. 2021; 17(2):354-374. DOI: 10.17059/ekon.reg.2021-2-1 (rus.).

12. Eyler R. *Economic sanctions*. Palgrave MacMillan, 2007; 237. DOI: 10.1057/9780230610002

13. Martin L. *Coercive Cooperation: Explaining Multilateral Economic Sanctions*. Princeton, Princeton University Press, 1992; 324.

14. Walentek D. *Instrumental or Symbolic? The Role of Multilateral Economics Sanctions*. 2019;

43. URL: [https://www.peio.me/wp-content/uploads/2019/01/PEIO12\\_paper\\_19.pdf](https://www.peio.me/wp-content/uploads/2019/01/PEIO12_paper_19.pdf)

15. Smeets M. The theory and practice of economic sanctions. *Russian Trade Policy*. 2019; 66-78. DOI: 10.4324/9780429464041-5

16. Golovina O.D., Badash Kh.Z., Polyakov Yu.N. Determination of prognostic properties of a set of coincident and anticipatory indicators. *Bulletin of Udmurt University. Series Economics and Law*. 2009; 2(2):144-150. (rus.).

17. Pozdeev V. *Methodology of economic analysis of cyclical fluctuations in the development of economic entities*. Yoshkar-Ola, Mariys. state tech. university, 2008; 365. (rus.).

18. Hymans S.H., Greenspan A., Shiskin J., Early J. On the use of leading indicators to predict cyclical turning points. *Brookings Papers on Economic Activity*. 1973; 1973(2):339. DOI: 10.2307/2534095

19. Efremyan B. *Development of an integrated risk management system at the enterprises of the construction industry : abstract of the dissertation for the Ph.D in Economic Sciences*. Moscow, 2016; 22. (rus.).

Received May 13, 2022.

Adopted in revised form on May 25, 2022.

Approved for publication on June 6, 2022.

**BIONOTES:** **Boris L. Efremyan** — Candidate of Economic Sciences, Construction Manager; **DREAMSTROY**; build. 5, 28 Nikolo-Khovanskaya st., Moscow, 108802, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9826-392X; boris.efremayn@gmail.com;

**Vadim S. Kankhva** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Economics and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5200-4534, ORCID: 0000-0003-2611-1684; kankhvavs@mgsu.ru.

*Contribution of the authors:*

*Boris L. Efremyan* — development of the research concept, writing the text of the article, preparation of final conclusions.

*Vadim S. Kankhva* — scientific editing, normative and methodological support.

*Conflict of the interests:* the authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.001.36

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.769-789

## Современное состояние инновационной деятельности регионов РФ

Наталья Григорьевна Верстина<sup>1</sup>, Ольга Феликсовна Цуверкалова<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Волгодонский инженерно-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ВИТИ НИЯУ МИФИ); г. Волгодонск, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Возрастающая роль инноваций на современном этапе развития экономики обусловлена необходимостью обеспечения конкурентоспособности и технологического лидерства России на международных рынках. В последние годы принят ряд программных документов, определивших пути перевода российской экономики на инновационный путь развития и индикаторы достижения поставленных приоритетов. Проведено сравнительное исследование российских регионов в контексте достижения ими целевых ориентиров инновационного развития, направленного на достижение национальных стратегических целей.

**Материалы и методы.** Используются открытые статистические данные об инновациях в РФ за 2015 и 2020 гг., публикуемые Федеральной службой государственной статистики. Сравнительный анализ осуществлен с помощью статистических методов и методов кластерного анализа в программных продуктах Statistica и MS Excel.

**Результаты.** Выполнено разбиение регионов РФ на кластеры, каждый из которых был охарактеризован с учетом различных аспектов инновационной деятельности. На основании первичных статистических данных рассчитаны относительные показатели, характеризующие эффективность инновационной деятельности. Полученные результаты визуализированы с использованием различных статистических графиков. Исследования позволили оценить изменения, произошедшие в составе и структуре кластеров за рассматриваемый период. На основании проведенных расчетов дана оценка степени достижения целей, поставленных в Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года. Рассмотрены существующие на сегодняшний день подходы к построению рейтингов инновационной активности регионов.

**Выводы.** Констатированы низкий уровень инновационного развития большинства регионов, а также несовершенство системы показателей, характеризующих инновационную деятельность, и методологии их расчета. В качестве перспективного направления дальнейших исследований предложено совершенствование методов оценки инновационной деятельности с целью стимулирования инновационной активности регионов и повышения эффективности инвестиционных вложений в инновации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** инновационное развитие, инновационная активность, технологические инновации, рейтинг регионов, статистический анализ, кластерный анализ

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Верстина Н.Г., Цуверкалова О.Ф. Современное состояние инновационной деятельности регионов РФ // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 769–789. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.769-789

*Автор, ответственный за переписку:* Ольга Феликсовна Цуверкалова, ofttsuverskalova@mephi.ru.

## Current state of innovative activities in the Russian regions

Natalia G. Verstina<sup>1</sup>, Olga F. Tsuverskalova<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Volgodonsk Engineering and Technical Institute — the branch of National Research Nuclear University MEPhI, Volgodonsk, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** At the current stage of economic development, Russia's focus on competitive performance and technological leadership in international markets has boosted the role of innovations. In recent years, a number of policy documents have been adopted; they outline the ways to ensure the transition of the Russian economy to an innovative development path and list the indicators of attainment of pre-defined priorities. The paper presents a comparative study of the Russian regions in terms of their attainment of innovative development targets aimed at the achievement of national strategic goals.

**Materials and methods.** The authors used open statistical data on innovations in the Russian Federation, published by the Federal State Statistics Service for 2015 and 2020. Statistical methods and cluster analysis were employed to make a comparative analysis using Statistica and MS Excel software.

**Results.** The Russian regions were clustered in the course of the study, and each cluster was characterized by various aspects of innovative activities. Primary statistics were used to calculate relative indicators of effectiveness of innovative activities. Various statistical charts were used to visualize the results. The studies allow assessing changes in the composition and structure of clusters during the period under review. Calculations were made to assess the degree of achievement of goals set in the "Strategy for Innovative Development of the Russian Federation". The authors also consider current approaches to innovative activity rankings made for the Russian regions.

**Conclusions.** The results acknowledge that the level of innovative development is low in the majority of the Russian regions, that have inadequate systems of indicators and calculation methods, used to characterize innovative activities. Development of innovative activity evaluation methods, aimed at promoting innovative activities in the regions and rising the efficiency of investments in innovations, are proposed as promising areas of further research.

**KEYWORDS:** innovative development, innovative activity, technological innovations, rankings of regions, statistical analysis, cluster analysis

**FOR CITATION:** Verstina N.G., Tsuverkalova O.F. Current state of innovative activities in the Russian regions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):769-789. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.769-789 (rus.).

Corresponding author: Olga F. Tsuverkalova, ofttsuverkalova@mephi.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Сложившиеся в XXI в. глобальные тенденции сделали инновационное развитие одним из важнейших инструментов в борьбе стран за достижение мирового экономического лидерства. В связи с этим в 2011 г. утверждена Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года, наметившая основные целевые ориентиры перевода экономики РФ на инновационный путь развития. К ним, в первую очередь, следует отнести «увеличение доли предприятий промышленного производства, осуществляющих технологические инновации, в общем количестве предприятий промышленного производства до 40–50 процентов к 2020 году...; ...увеличение доли инновационной продукции в общем объеме промышленной продукции до 25–35 процентов к 2020 году...»<sup>1</sup>. Поставленные цели в дальнейшем закрепились в Указе Президента «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»<sup>2</sup>, где еще раз подчеркнута необходимость стимулирования создания передовых управленческих, организационных и технологических решений для повышения производительности труда и модернизации основных фондов, а также опережающего увеличения затрат на научные исследования и разработки в областях, определяемых приоритетами научно-технологического развития страны.

Исходя из общенациональных задач, практически во всех отраслях экономики были приняты нормативные документы, стимулирующие предприятия и организации к использованию инновационных технологий и материалов. Так, в сентябре 2020 г. под-

писано Постановление Правительства РФ<sup>3</sup>, регламентирующее применение BIM-технологий в градостроительстве. Данное решение разработано в рамках цифровизации строительной отрасли: использование информационных моделей даст возможность снизить риски и существенно повысить качество строительства на всех этапах жизненного цикла.

Особую значимость инновационное развитие РФ приобрело с принятием курса на развитие импортозамещения в связи с вводимыми с 2015 г. санкциями против российской экономики, связанными с негативными событиями 2014 г. и многократно усилившимися с началом специальной военной операции, проводимой нашей страной с февраля 2022 г. Таким образом, изучение инновационной деятельности в РФ, выявление ее тенденций, проблем и возможных путей их решения становится все более актуальным [1–7]. Вместе с тем некоторые авторы отмечают недостаточную инновационную активность и ее низкую эффективность во многих сферах деятельности [8–11].

Ранее авторами проводилось исследование инновационного развития российской экономики в разрезе федеральных округов [12]. Полученные результаты позволили выявить проблемы: неравномерность развития инновационной деятельности в масштабах страны, снижение инновационной активности в ряде регионов и низкую отдачу от инвестиций в иннова-

<sup>1</sup> Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года : Распоряжение Правительства РФ от 08.12.2011 № 2227-р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902317973>

<sup>2</sup> О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года : Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204.

<sup>3</sup> Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства, состава сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства и представляемых в форме электронных документов, и требований к форматам указанных электронных документов, а также о внесении изменения в пункт 6 Положения о выполнении инженерных изысканий для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства : Постановление Правительства Российской Федерации от 15.09.2020 № 1431. URL: <http://static.government.ru/media/files/idDNokiiAZnlmOLkgjyqNR719mOq4PfT.pdf>

ции. Это обусловило интерес авторов к вопросам обеспечения эффективности инноваций в нашей стране в современных условиях, в том числе и необходимость более детального рассмотрения инновационной деятельности на уровне субъектов федерации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Комплексный анализ инновационной деятельности на уровне отдельных субъектов федерации проводился по 73 краям, областям и республикам РФ на основе данных официальной статистики. Из рассмотрения были исключены: город федерального значения Севастополь, Еврейская автономная область, Республика Алтай, Республика Тыва, Забайкальский край, Чукотский автономный округ, Республика Ингушетия, Республика Северная Осетия – Алания, Чеченская Республика. Это связано с тем, что некоторые сведения по этим субъектам федерации за анализируемый период либо отсутствовали, либо не публиковались в целях обеспечения конфиденциальности первичных статистических данных, полученных от организаций в соответствии с Федеральным законом от 29.11.2007 № 282-ФЗ «Об официальном статистическом учете и системе государственной статистики в Российской Федерации» (ст. 4, п. 5; ст. 9, п. 1)<sup>4</sup>.

В качестве исходных материалов для анализа была выбрана официальная информация об инновационной деятельности в разрезе показателей, представленных на сайте Федеральной службы государственной статистики (Росстат)<sup>5</sup>:

- затраты на технологические инновации организаций (ЗТИ), млн руб.;
- внутренние затраты на научные исследования и разработки (ВЗН), млн руб.;
- численность персонала, занятого научными исследованиями и разработками (ЧПН), человек;
- удельный вес организаций, осуществлявших технологические инновации (ОИ), %;
- уровень инновационной активности организаций (УИА), %;
- используемые передовые производственные технологии (ИПТ), единиц;
- объем инновационных товаров, работ, услуг (ОИТРУ), млн руб.

Выбор приведенных показателей обуславливается целевыми ориентирами, сформулированными в упоминавшихся выше программных документах. Методика определения перечисленных показателей приведена на сайте Росстата<sup>5</sup>. Основными источни-

ками информации для расчета являются формы федерального статистического наблюдения № 2-наука «Сведения о выполнении научных исследований и разработок» и № 4-инновация «Сведения об инновационной деятельности организации».

В ходе исследования для сравнительной оценки инновационного потенциала и инновационной активности регионов применялись методы статистического и кластерного анализа. Использовались программный пакет Statistica компании StatSoft и MS Excel.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе исследования был проведен кластерный анализ субъектов РФ в разрезе их инновационной деятельности по состоянию на конец 2015 г. В статистике под кластером понимается класс родственных элементов статистической совокупности, близких по ряду признаков. Кластеризация осуществлялась методом *k*-средних с помощью программного пакета Statistica. Количество кластеров (групп) определялось по формуле Стерджеса:

$$n = 1 + 3,322 \lg N, \quad (1)$$

где *n* — рекомендуемое число групп; *N* — число единиц анализируемой совокупности.

В нашем случае имеем:

$$n = 1 + 3,322 \lg 73 = 7,19 \approx 7,$$

поэтому задаваемое при настройке алгоритма число кластеров принято равным 7.

Для построения кластеров применялись абсолютные показатели, характеризующие инвестиционную деятельность в субъектах федерации: затраты на технологические инновации организаций; внутренние затраты на научные исследования и разработки; численность персонала, занятого научными исследованиями и разработками; количество используемых передовых производственных технологий; объем инновационных товаров, работ, услуг; а также показатель, характеризующий общий вклад региона в экономику РФ «Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами». Поскольку анализируемые показатели измеряются в разных единицах, и диапазоны их значений существенно различаются, предварительно была осуществлена нормировка данных путем деления каждого из абсолютных значений на максимальное значение соответствующего признака. В качестве метрики в пространстве признаков использовалось евклидово расстояние.

В результате применения алгоритма кластеризации получены следующие кластеры (табл. 1).

Сравнительные нормированные характеристики получившихся кластеров представлены на рис. 1.

Абсолютные средние характеристики кластеров приведены в табл. 2.

<sup>4</sup> Об официальном статистическом учете и системе государственной статистики в Российской Федерации : Федеральный закон от 29.11.2007 № 282-ФЗ.

<sup>5</sup> Статистика/Официальная статистика/Наука, инновации и технологии. URL: <https://rosstat.gov.ru/science>

Табл. 1. Состав кластеров по абсолютным данным 2015 г.

Table 1. Composition of clusters based on the absolute data for 2015

| Кластер<br>Cluster | Количество<br>территориальных<br>единиц<br>Number of territorial<br>units | Субъекты РФ<br>Subjects of the Russian Federation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                  | 1                                                                         | Тюменская область<br>Tyumen region                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 2                  | 5                                                                         | Нижегородская область, Республика Башкортостан, Республика Татарстан,<br>Самарская область, Свердловская область<br>Nizhny Novgorod region, Republic of Bashkortostan, Republic of Tatarstan, Samara<br>region, Sverdlovsk region                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 3                  | 2                                                                         | г. Санкт-Петербург, Московская область<br>St. Petersburg, Moscow region                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 4                  | 19                                                                        | Белгородская область, Владимирская область, Вологодская область, Воронежская<br>область, Иркутская область, Калужская область, Кемеровская область,<br>Краснодарский край, Ленинградская область, Липецкая область, Новосибирская<br>область, Республика Мордовия, Саратовская область, Тверская область, Тульская<br>область, Удмуртская Республика, Хабаровский край, Чувашская Республика,<br>Ярославская область<br>Belgorod region, Vladimir region, Vologda region, Voronezh region, Irkutsk region,<br>Kaluga region, Kemerovo region, Krasnodar region, Leningrad region, Lipetsk region,<br>Novosibirsk region, Republic of Mordovia, Saratov region, Tver region, Tula region,<br>Udmurtia, Khabarovsk region, Chuvash Republic, Yaroslavl region                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 5                  | 7                                                                         | Волгоградская область, Красноярский край, Омская область, Пермский край,<br>Ростовская область, Сахалинская область, Челябинская область<br>Volgograd region, Krasnoyarsk region, Omsk region, Perm region, Rostov region,<br>Sakhalin region, Chelyabinsk region                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 6                  | 38                                                                        | Алтайский край, Амурская область, Архангельская область, Астраханская область,<br>Брянская область, Ивановская область, Кабардино-Балкарская Республика,<br>Калининградская область, Камчатский край, Карачаево-Черкесская Республика,<br>Кировская область, Костромская область, Курганская область, Курская область,<br>Магаданская область, Мурманская область, Новгородская область, Оренбургская<br>область, Орловская область, Пензенская область, Приморский край, Псковская<br>область, Республика Адыгея, Республика Бурятия, Республика Дагестан,<br>Республика Калмыкия, Республика Карелия, Республика Коми, Республика Крым,<br>Республика Марий Эл, Республика Саха (Якутия), Республика Хакасия, Рязанская<br>область, Смоленская область, Ставропольский край, Тамбовская область, Томская<br>область, Ульяновская область<br>Altai region, Amur region, Arkhangelsk region, Astrakhan region, Bryansk region,<br>Ivanovo region, Kabardino-Balkar Republic, Kaliningrad region, Kamchatka region,<br>Karachay-Cherkess Republic, Kirov region, Kostroma region, Kurgan region, Kursk<br>region, Magadan region, Murmansk region, Novgorod region, Orenburg region, Oryol<br>region, Penza region, Primorsky region, Pskov region, Republic of Adygea, Republic of<br>Buryatia, Republic of Dagestan, Republic of Kalmykia, Republic of Karelia, Republic of<br>Komi, Republic of Crimea, Republic of Mari El, Republic of Sakha (Yakutia), Republic<br>of Khakasia, Ryazan region, Smolensk region, Stavropol region, Tambov region, Tomsk<br>region, Ulyanovsk region |
| 7                  | 1                                                                         | г. Москва<br>Moscow                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

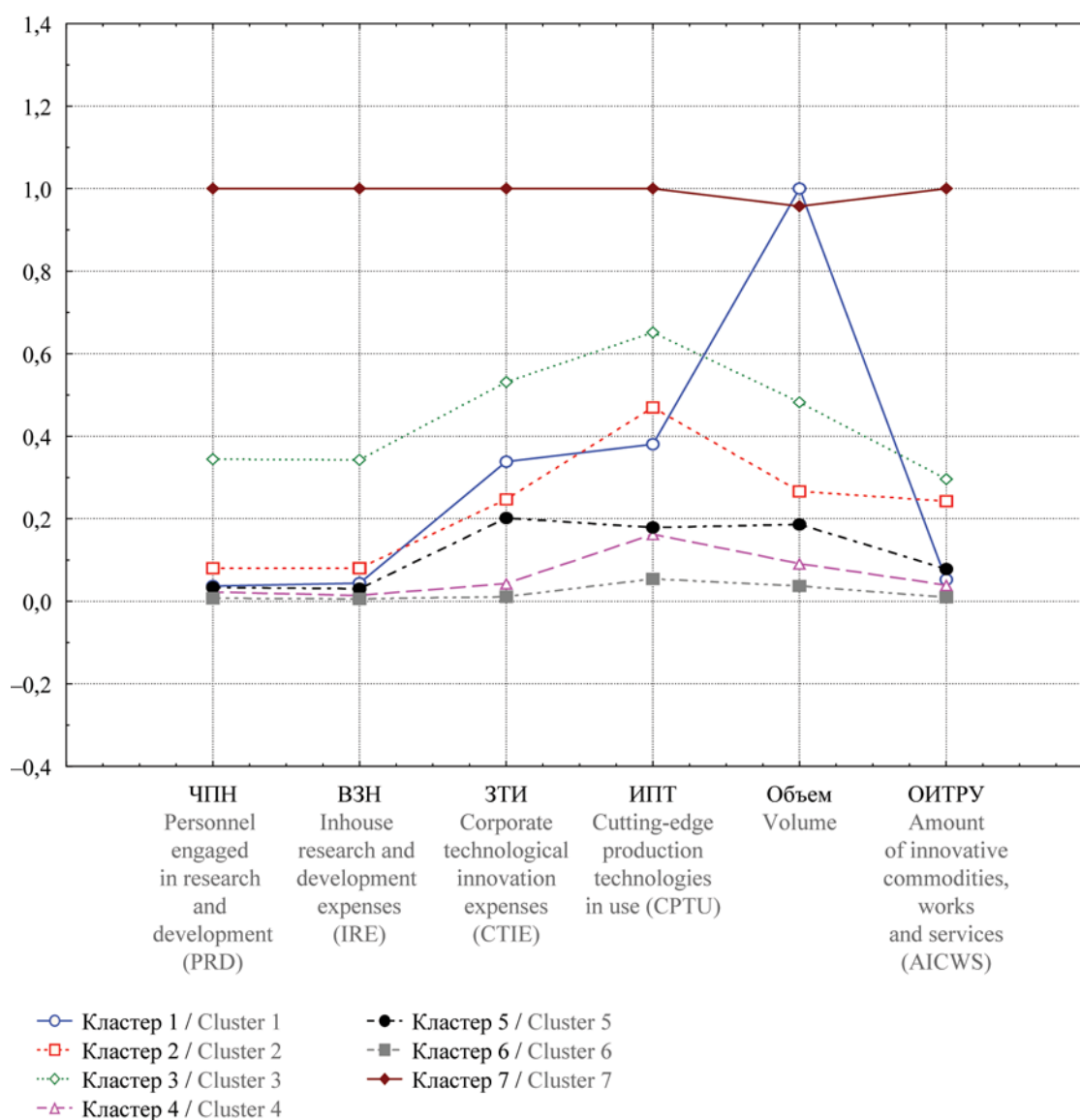


Рис. 1. Средние нормированные значения показателей кластеров (2015 г.)

Fig. 1. Average standardized values of cluster indicators (2015)

Табл. 2. Средние значения показателей кластеров (2015 г.)

Table 2. Average values of cluster indicators (2015)

| Кластер<br>Cluster | ЧПН, чел.<br>PRD, persons | ВЗН, млн руб.<br>IRE, million RR | ЗТИ, млн руб.<br>CTIE, million RR | ИПТ, ед.<br>CPTU, units | Объем продукции,<br>млн руб.<br>Output, million RR | ОИТРУ, млн руб.<br>AICWS, million RR |
|--------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1                  | 8811,0                    | 14 171,8                         | 64 430,0                          | 7170,0                  | 5 200 766,1                                        | 45 145,7                             |
| 2                  | 19 106,2                  | 25 945,7                         | 47 044,1                          | 8851,8                  | 1 384 387,2                                        | 206 775,2                            |
| 3                  | 82 470,0                  | 110 514,9                        | 101 079,5                         | 12 283,0                | 2 509 252,0                                        | 252 195,7                            |
| 4                  | 5262,1                    | 4611,8                           | 8198,2                            | 3065,3                  | 472 221,8                                          | 33 154,4                             |
| 5                  | 7968,3                    | 9838,8                           | 38 381,2                          | 3373,4                  | 970 334,6                                          | 66 721,2                             |
| 6                  | 1847,6                    | 1794,0                           | 2211,6                            | 1014,9                  | 192 828,4                                          | 7912,2                               |
| 7                  | 239 509,0                 | 322 785,1                        | 190 334,7                         | 18 838,0                | 4 978 422,7                                        | 851 583,4                            |

Охарактеризуем вкратце полученные результаты. Следует отметить, что инновационная деятельность регионов характеризуется существенной неравномерностью. Об этом свидетельствует наличие малочисленных кластеров, отличающихся по своим характеристикам.

Прежде всего, рассмотрим кластеры, включающие по одному региону.

Кластер 1 включает единственный регион — Тюменскую область. Регион характеризуется максимальным значением показателя «Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами» и средним уровнем затрат на инновации, а также количеством используемых передовых инновационных технологий, в то время как показатели, характеризующие научную деятельность (ЧПН и ВЗН), и показатель объема инновационных товаров, работ, услуг близки к минимальным. Это можно объяснить спецификой экономической деятельности региона: основная отрасль здесь — добыча и переработка нефти и газа. На долю области в 2015 г. приходилось более 11 % общего объема производства РФ. Научный потенциал сравнительно невысокий, а затраты на инновации связаны главным образом с процессными инновациями, т.е. с совершенствованием технологических процессов.

Второй регион, также являющийся единственным представителем своего кластера (кластер 7), — Москва. По пяти из шести анализируемых показателей регион характеризуется максимальными значениями, а по общему объему производства лишь незначительно уступает Тюменской области (10,9 % от общего объема производства продукции в РФ).

Достаточно высокими значениями всех рассматриваемых показателей характеризуется кластер 3, в который входят Московская область и Санкт-Петербург. Данные субъекты федерации отличаются значительное количество вузов и научных организаций, а также крупных предприятий, что и объясняет полученные результаты.

Следующий по численности — кластер 2, куда входят Нижегородская область, Республика Башкортостан, Республика Татарстан, Самарская область и Свердловская область. Это регионы с развитой промышленностью, которым присущи существенные затраты на инновации и, как следствие, достаточно высокий уровень использования передовых производственных технологий и объем инновационных товаров, работ, услуг.

Кластер 5 включает 7 регионов и по уровню инновационной деятельности несколько уступает кластеру 2. Сюда входят Волгоградская область, Красноярский край, Омская область, Пермский край, Ростовская область, Сахалинская область и Челябинская область. Эти регионы являются «середняками» по величине затрат на инновации, количеству применяемых передовых технологий и общему объему

производства, однако имеют низкий научный потенциал и малый объем инновационной продукции.

Кластер 4, состоящий из 19 регионов, по числу передовых производственных технологий сопоставим с кластером 5, но уступает ему по объемам производства и затратам на инновации.

Самый многочисленный — кластер 6, в который входит более 50 % анализируемых регионов (38 из 73). Он характеризуется низкими значениями всех рассматриваемых показателей.

Перейдем к рассмотрению относительных показателей, характеризующих эффективность инновационной деятельности субъектов федерации по состоянию на конец 2015 г. К ним относятся приведенные ранее показатели «удельный вес организаций, осуществлявших технологические инновации» и «уровень инновационной активности организаций». Дополнительно для каждого региона были рассчитаны удельные затраты на научные исследования и разработки в расчете на одного сотрудника, количество используемых передовых производственных технологий на 1 млн руб. затрат на технологические инновации и объем инновационных товаров, работ, услуг, на 1 млн руб. затрат на технологические инновации, а также удельный вес инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме продукции региона. Для каждого показателя определены минимальное, максимальное и медианное значения. Результаты приведены в табл. 3 и визуализированы на рис. 2–7.

Комплексный анализ данных, выполненный авторами (рис. 2–7), показал, что кластеры в большинстве случаев крайне неоднородны по эффективности использования инноваций. Особо следует отметить «выбросы» на рис. 5 и 6. Так, наиболее высокий уровень применяемых передовых производственных технологий в пересчете на 1 млн руб. затрат на технологические инновации (47,4 единиц на 1 млн руб.) отмечен в Кабардино-Балкарской Республике (кластер 6). В ней же наблюдается максимальный объем инновационных товаров и услуг по отношению к затратам на технологические инновации (240 млн руб. на 1 млн руб. затрат на инновации). Также аномальным значением показателя ОИТРУ/ЗТИ характеризуется Вологодская область (кластер 1; 188,5 млн руб.).

Полученные результаты, прежде всего, вызывают вопросы относительно достоверности представленных сведений и самой методологии расчета статистических показателей, характеризующих инновационную деятельность.

Аналогичный анализ был проведен по информации на конец 2020 г. Его результаты показаны в табл. 4–6 и на рис. 8–14.

Табл. 3. Показатели эффективности инноваций в 2015 г.  
Table 3. Innovation efficiency indicators in 2015

| Кластер<br>Cluster | ОИ<br>Share of organizations<br>implementing technological<br>innovations |               |                   | УИИ<br>Innovative performance of<br>an organization |               |                   | ВЗН/ЧПН<br>IRE/PRD |               |                   | ИПТ/ЗТИ<br>CPTU/CTIE |               |                   | ОИТРУ/ЗТИ<br>AICWS/CTIE |               |                   | ОИТРУ/ВРП<br>AICWS/Gross regional<br>product (GRP) |               |                   |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------|-----------------------------------------------------|---------------|-------------------|--------------------|---------------|-------------------|----------------------|---------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------|----------------------------------------------------|---------------|-------------------|
|                    | Мин.<br>Min.                                                              | Макс.<br>Max. | Медиана<br>Median | Мин.<br>Min.                                        | Макс.<br>Max. | Медиана<br>Median | Мин.<br>Min.       | Макс.<br>Max. | Медиана<br>Median | Мин.<br>Min.         | Макс.<br>Max. | Медиана<br>Median | Мин.<br>Min.            | Макс.<br>Max. | Медиана<br>Median | Мин.<br>Min.                                       | Макс.<br>Max. | Медиана<br>Median |
| 1                  | 15,0                                                                      | 15,0          | 15,0              | 12,8                                                | 12,8          | 12,8              | 1,608              | 1,608         | 1,608             | 0,111                | 0,111         | 0,111             | 0,701                   | 0,701         | 0,701             | 0,009                                              | 0,009         | 0,009             |
| 2                  | 13,8                                                                      | 32,9          | 28,7              | 7,1                                                 | 29,3          | 17,3              | 0,960              | 1,641         | 1,199             | 0,125                | 0,301         | 0,209             | 2,588                   | 6,994         | 3,808             | 0,073                                              | 0,204         | 0,158             |
| 3                  | 23,4                                                                      | 37            | 30,2              | 16,9                                                | 32,7          | 24,8              | 1,296              | 1,387         | 1,342             | 0,119                | 0,123         | 0,121             | 2,189                   | 3,101         | 2,645             | 0,073                                              | 0,137         | 0,105             |
| 4                  | 8,3                                                                       | 37,2          | 26,3              | 6,7                                                 | 31,4          | 17,0              | 0,586              | 1,098         | 0,930             | 0,084                | 4,379         | 0,390             | 1,100                   | 188,515       | 3,902             | 0,010                                              | 0,270         | 0,070             |
| 5                  | 6,2                                                                       | 30,2          | 24,5              | 3,6                                                 | 21,9          | 16,9              | 0,863              | 2,266         | 1,176             | 0,014                | 0,244         | 0,088             | 0,563                   | 4,223         | 1,813             | 0,025                                              | 0,143         | 0,052             |
| 9                  | 10,3                                                                      | 57,1          | 18,1              | 5,3                                                 | 25,2          | 12,5              | 0,390              | 1,854         | 0,780             | 0,055                | 47,392        | 0,789             | 0,158                   | 240,041       | 2,762             | 0,001                                              | 0,165         | 0,027             |
| 7                  | 55,1                                                                      | 55,1          | 55,1              | 44,7                                                | 44,7          | 44,7              | 1,348              | 1,348         | 1,348             | 0,099                | 0,099         | 0,099             | 4,474                   | 4,474         | 4,474             | 0,171                                              | 0,171         | 0,171             |

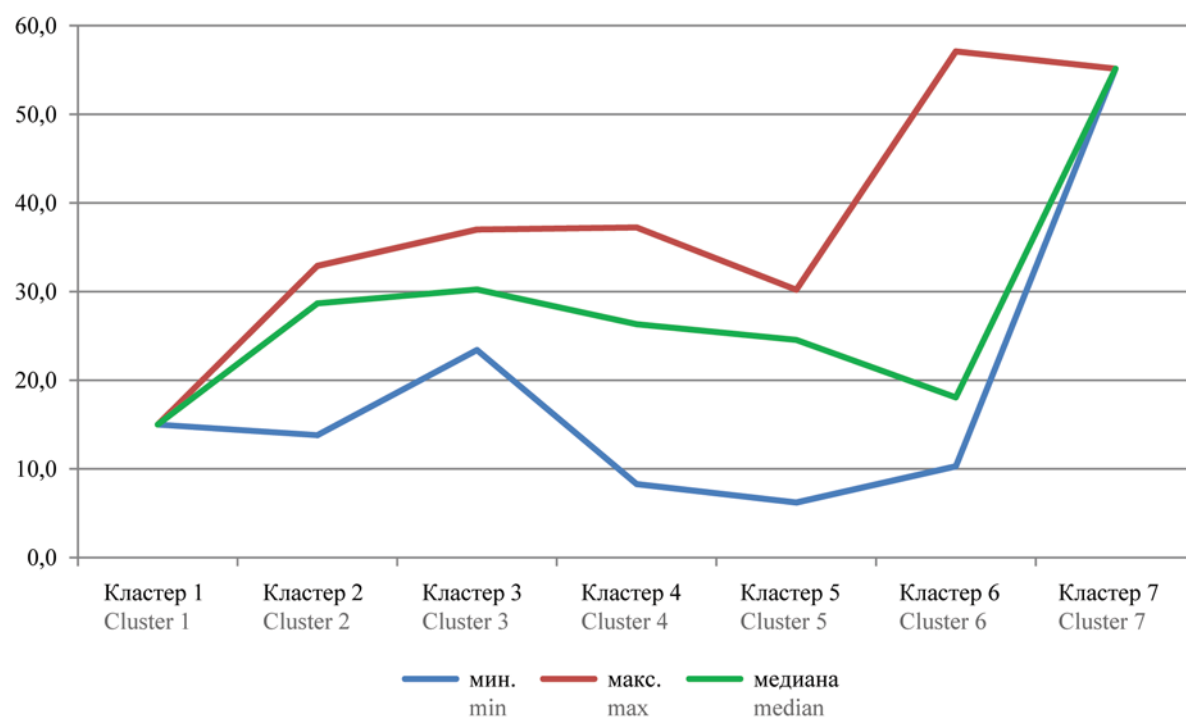


Рис. 2. Удельный вес организаций, осуществлявших технологические инновации, % (2015)

Fig. 2. The share of organizations, implementing technological innovations, % (2015)

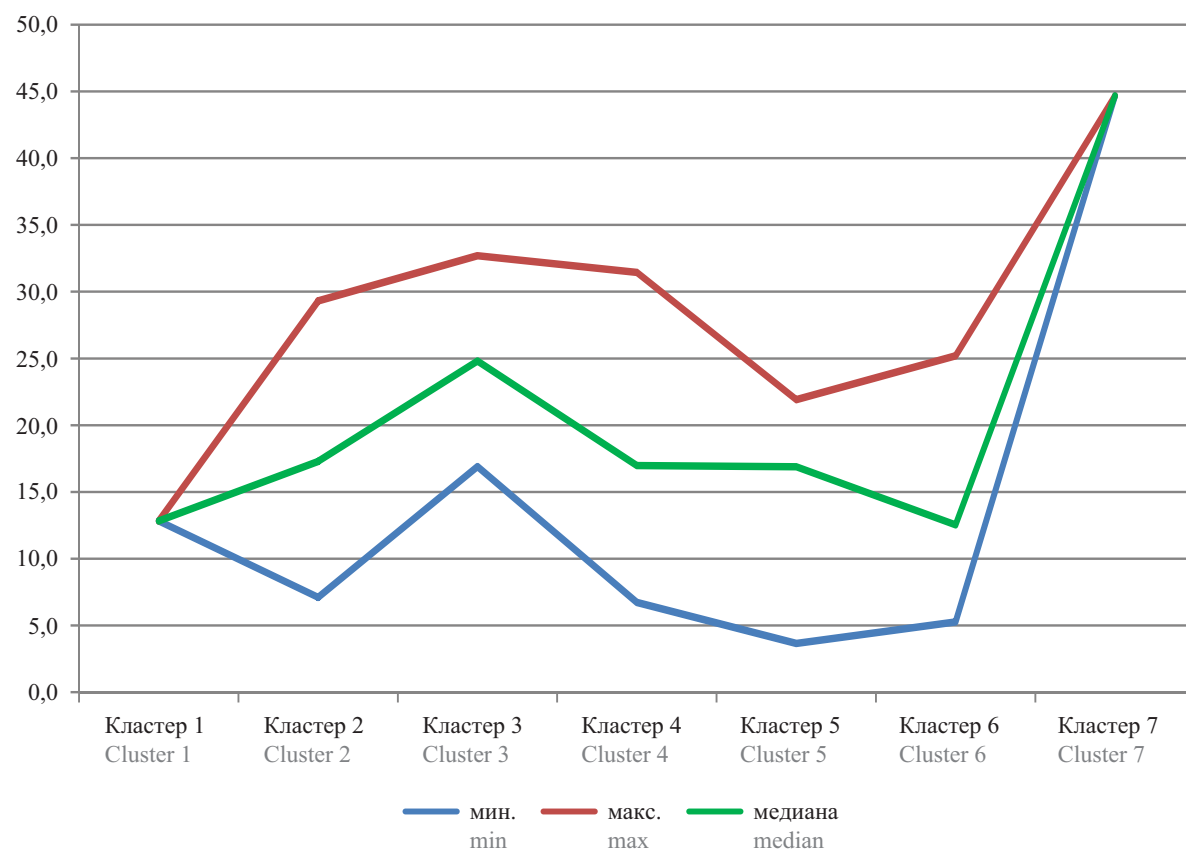
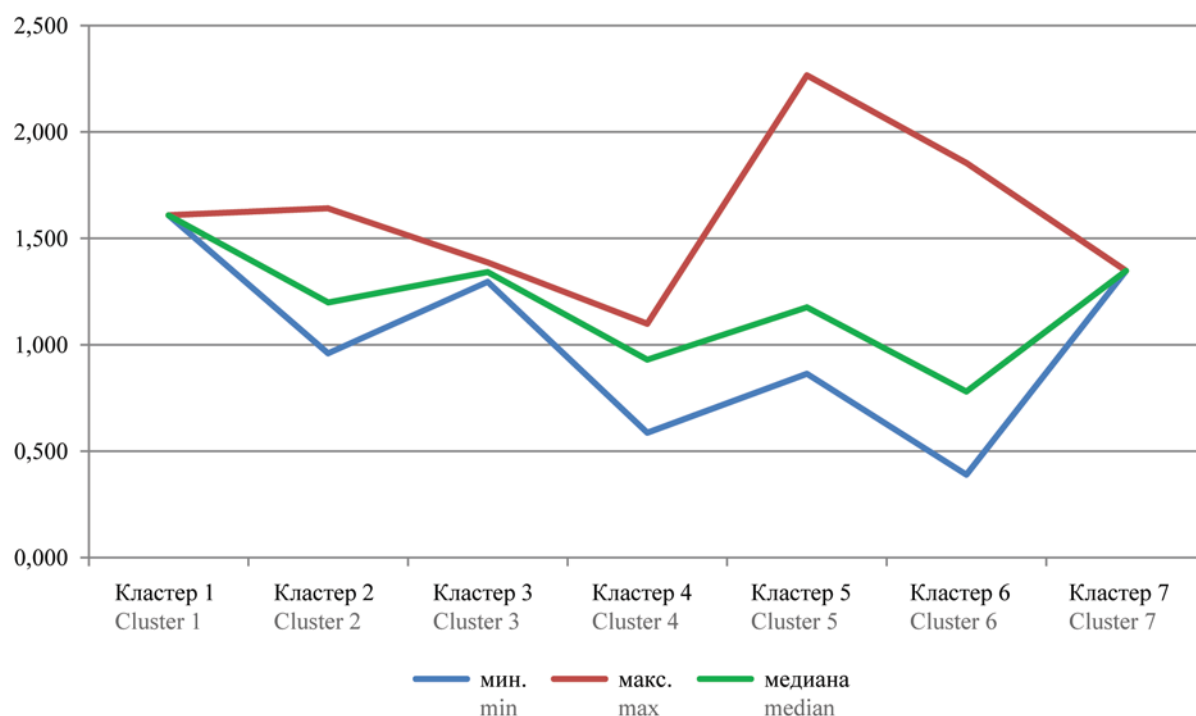


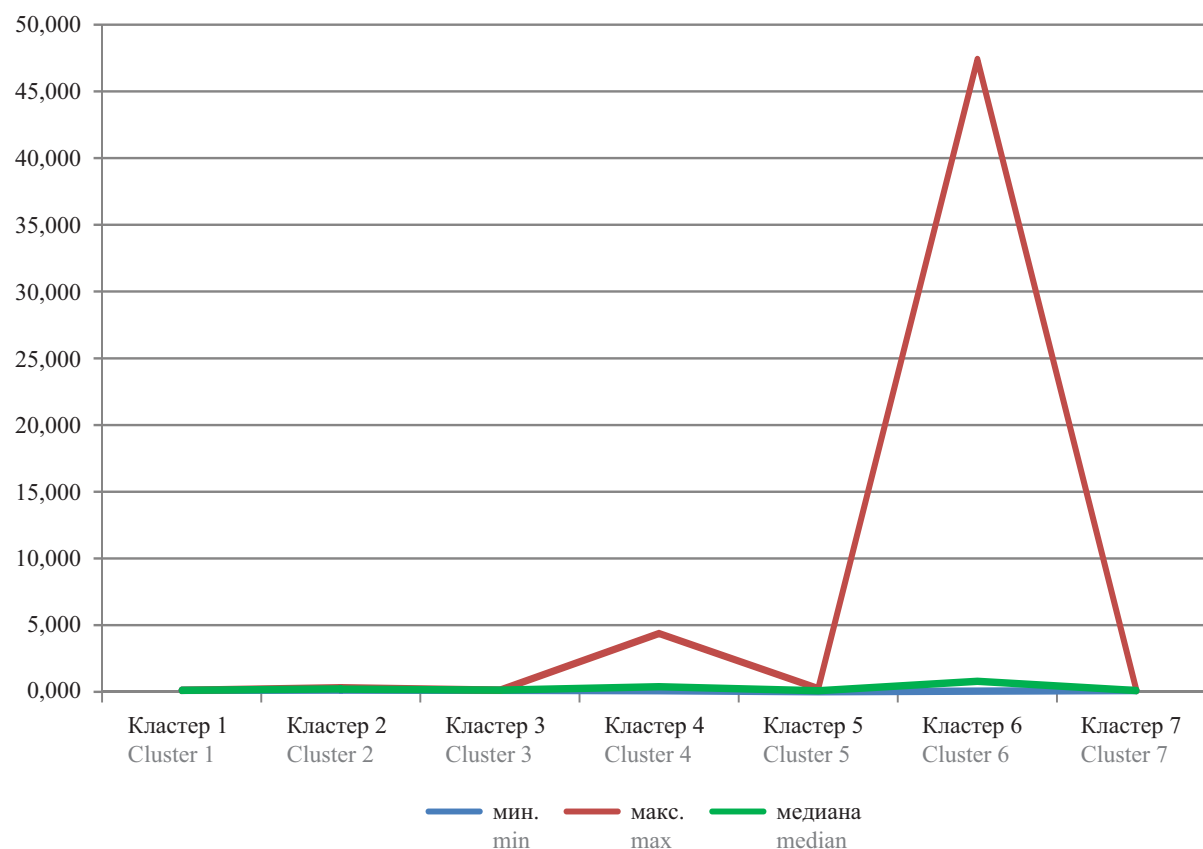
Рис. 3. Уровень инновационной активности организаций, % (2015)

Fig. 3. The level of innovative activity of organizations, % (2015)



**Рис. 4.** Удельные затраты на научные исследования и разработки в расчете на одного сотрудника, млн руб. (2015)

Fig. 4. Unit costs of research and development per employee, million RR (2015)



**Рис. 5.** Используемые передовые производственные технологии на 1 млн руб. затрат на технологические инновации, ед. (2015)

Fig. 5. Implemented cutting-edge production technologies per million rubles of technological innovation costs, units (2015)

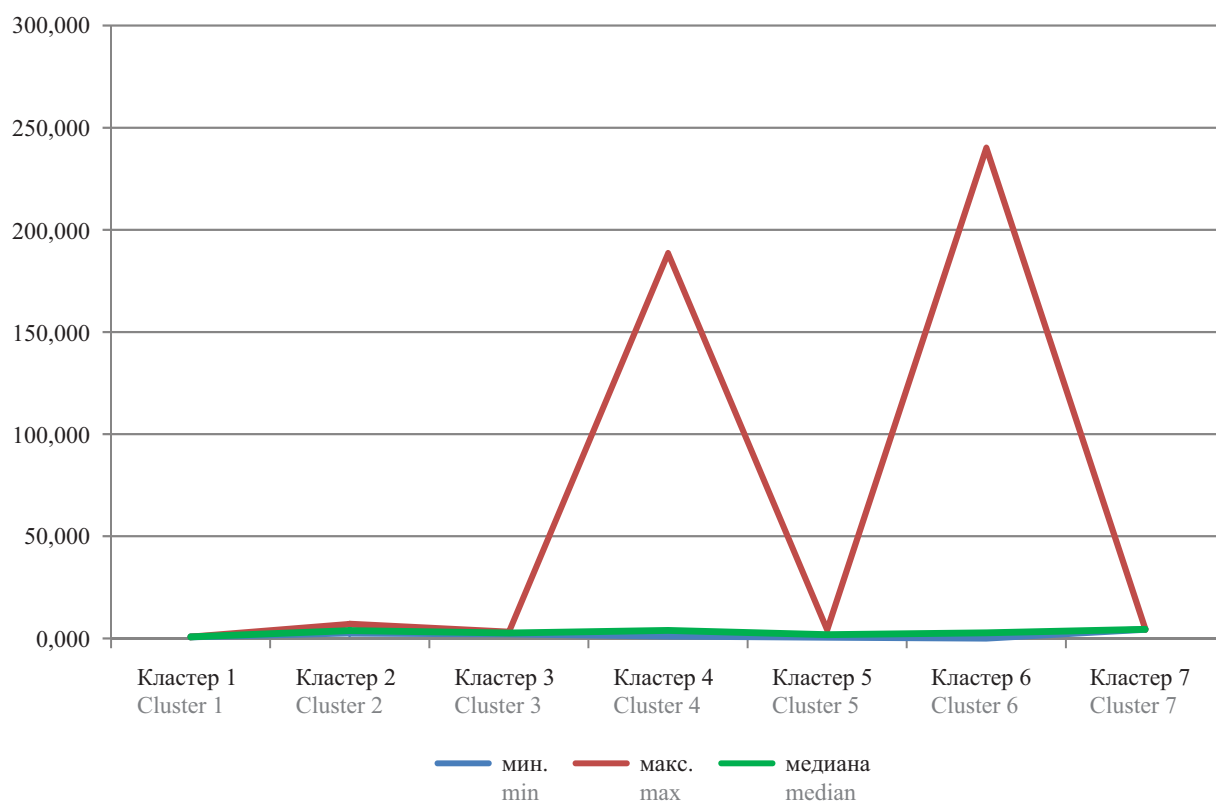


Рис. 6. Объем инновационных товаров, работ, услуг на 1 млн руб. затрат на технологические инновации, млн руб. (2015)

Fig. 6. The volume of innovative goods, works, services per million rubles of technological innovation costs, million RR (2015)

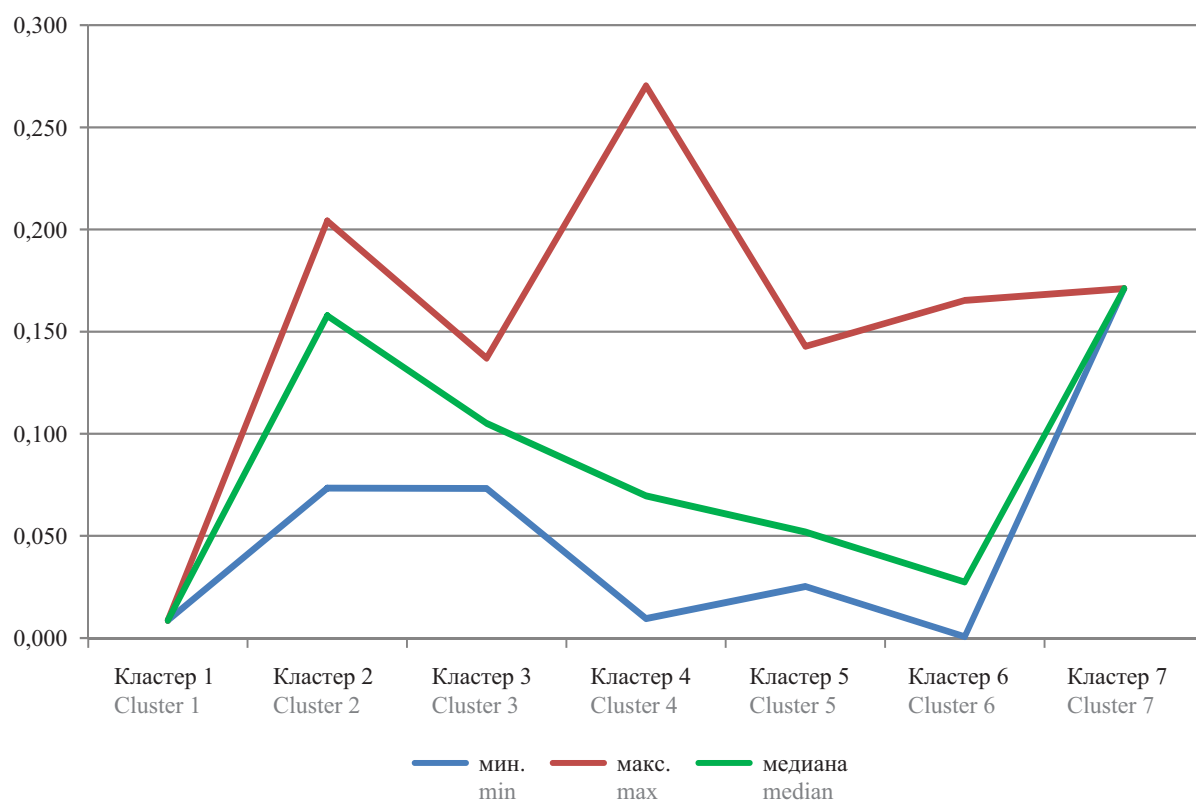


Рис. 7. Удельный вес инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме продукции региона, % (2015)

Fig. 7. The share of innovative goods, works, services in the total amount of regional product output, % (2015)

Табл. 4. Состав кластеров по абсолютным данным 2020 г.

Table 4. The composition of clusters according to the absolute data for 2020

| Кластер<br>Cluster | Количество<br>территориальных<br>единиц<br>Number of territorial<br>units | Субъекты РФ<br>Subjects of the Russian Federation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                  | 7                                                                         | Белгородская область, Красноярский край, Омская область, Республика Башкортостан, Ростовская область, Самарская область, Тульская область<br>Belgorod region, Krasnoyarsk region, Omsk region, Republic of Bashkortostan, Rostov region, Samara region, Tula region                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 2                  | 1                                                                         | г. Москва / Moscow                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 3                  | 14                                                                        | Алтайский край, Вологодская область, Воронежская область, Иркутская область, Калужская область, Кемеровская область, Кировская область, Ленинградская область, Липецкая область, Новосибирская область, Республика Мордовия, Тверская область, Хабаровский край, Ярославская область<br>Altai region, Vologda region, Voronezh region, Irkutsk region, Kaluga region, Kemerovo region, Kirov region, Leningrad region, Lipetsk region, Novosibirsk region, Republic of Mordovia, Tver region, Khabarovsk region, Yaroslavl region                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 4                  | 21                                                                        | Архангельская область, Брянская область, Волгоградская область, Калининградская область, Костромская область, Курская область, Мурманская область, Новгородская область, Оренбургская область, Орловская область, Пензенская область, Приморский край, Псковская область, Республика Коми, Рязанская область, Смоленская область, Ставропольский край, Тамбовская область, Томская область, Ульяновская область, Чувашская Республика<br>Arkhangelsk region, Bryansk region, Volgograd region, Kaliningrad region, Kostroma region, Kursk region, Murmansk region, Novgorod region, Orenburg region, Orel region, Penza region, Primorsky region, Pskov region, Republic of Komi, Ryazan region, Smolensk region, Stavropol region, Tambov region, Tomsk region, Ulyanovsk region, Chuvash Republic |
| 5                  | 7                                                                         | г. Санкт-Петербург, Московская область, Нижегородская область, Пермский край, Республика Татарстан, Свердловская область, Тюменская область<br>St. Petersburg, Moscow region, Nizhny Novgorod region, Perm region, Republic of Tatarstan, Sverdlovsk region, Tyumen region                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 6                  | 5                                                                         | Владимирская область, Краснодарский край, Саратовская область, Удмуртская Республика, Челябинская область<br>Vladimir region, Krasnodar region, Saratov region, Republic of Udmurtia, Chelyabinsk region                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 7                  | 18                                                                        | Амурская область, Астраханская область, Ивановская область, Кабардино-Балкарская Республика, Камчатский край, Карачаево-Черкесская Республика, Курганская область, Магаданская область, Республика Адыгея, Республика Бурятия, Республика Дагестан, Республика Калмыкия, Республика Карелия, Республика Крым, Республика Марий Эл, Республика Саха (Якутия), Республика Хакасия, Сахалинская область<br>Amur region, Astrakhan region, Ivanovo region, Kabardino-Balkar Republic, Kamchatka region, Karachay-Cherkess Republic, Kurgan region, Magadan region, Republic of Adygea, Republic of Buryatia, Republic of Dagestan, Republic of Kalmykia, Republic of Karelia, Republic of Crimea, Republic of Mari El, Sakha (Yakutia) Republic, Khakasia Republic, Sakhalin region                     |

Табл. 5. Средние значения показателей кластеров (2020 г.)

Table 5. Average values of cluster indicators (2020)

| Кластер<br>Cluster | ЧПН, чел.<br>PRD, persons | ВЗН, млн руб.<br>IRE, million RR | ЗТИ, млн руб.<br>CTIE, million RR | ИПТ, ед.<br>CPTU, units | Объем продукции,<br>млн руб.<br>Output, million RR | ОИТРУ, млн руб.<br>AICWS, million<br>RR |
|--------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1                  | 6708,9                    | 12 178,2                         | 37 220,7                          | 4682,6                  | 1 566 923,1                                        | 138 802,1                               |
| 2                  | 212 441,0                 | 427 329,3                        | 527 396,9                         | 11 022,0                | 17 579 949,9                                       | 626 603,4                               |
| 3                  | 4798,5                    | 6034,9                           | 20 450,1                          | 2967,7                  | 992 725,7                                          | 36 147,0                                |
| 4                  | 2359,7                    | 3235,0                           | 4532,9                            | 1685,2                  | 511 598,7                                          | 26 142,4                                |
| 5                  | 35 840,6                  | 63 474,8                         | 110 915,5                         | 11 260,1                | 3 765 091,2                                        | 320 280,7                               |
| 6                  | 6813,4                    | 9218,6                           | 19 435,3                          | 5834,2                  | 1 175 282,5                                        | 45 849,5                                |
| 7                  | 833,6                     | 878,7                            | 4886,4                            | 603,6                   | 288 998,6                                          | 3320,9                                  |

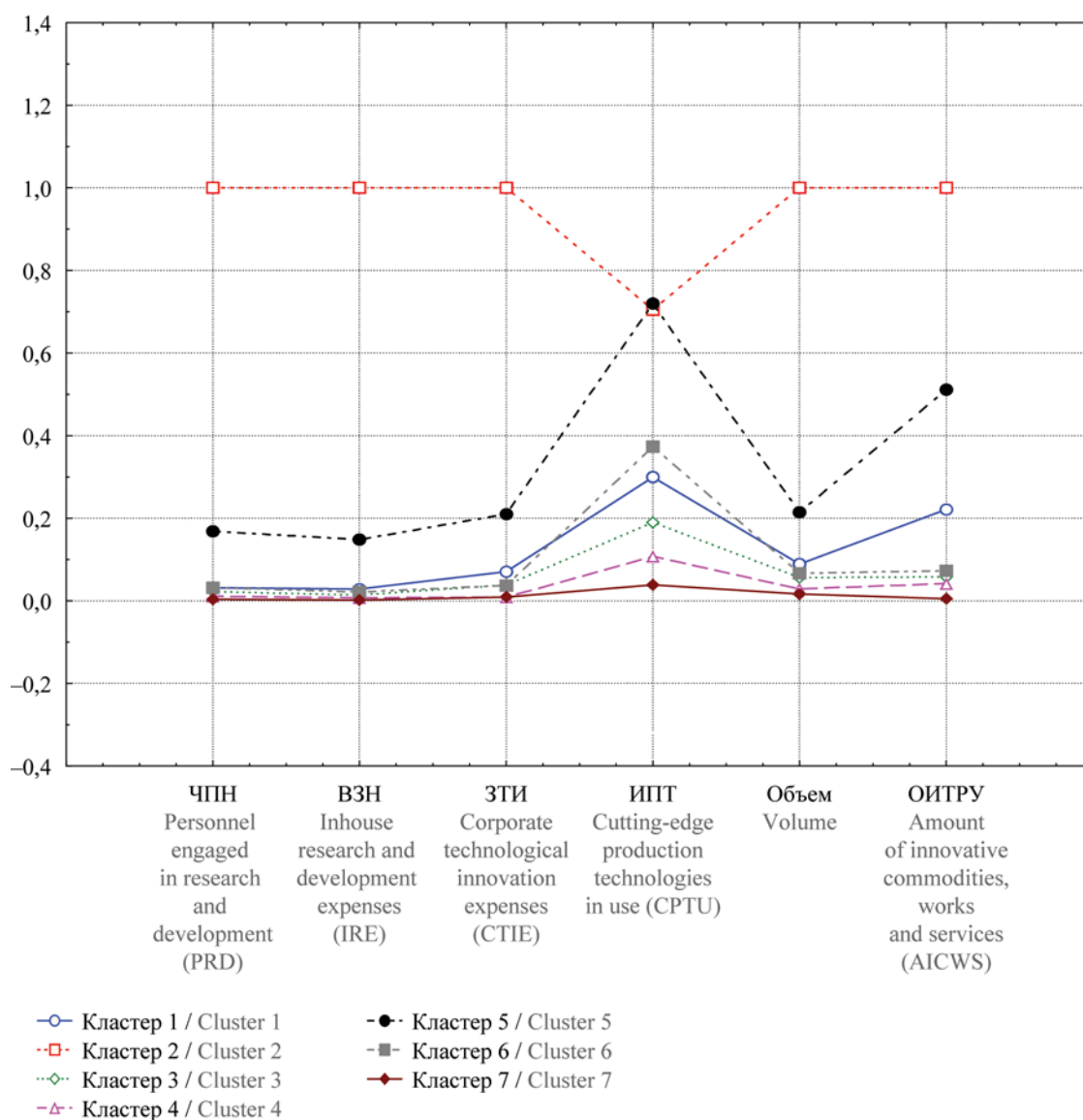


Рис. 8. Средние нормированные значения показателей кластеров (2020 г.)

Fig. 8. Average standardized values of cluster indicators (2020)

Табл. 6. Показатели эффективности инноваций в 2020 г.  
Table 6. Innovation efficiency indicators in 2020

| Кластер<br>Cluster | ОИ<br>Share of organizations<br>implementing technological<br>innovations |               |                   | УИИ<br>Innovative performance of<br>an organization |               |                   | ВЗН/ЧПН<br>IRE/PRD |               |                   | ИПТ/ЗТИ<br>CPTU/CTIE |               |                   | ОИТРУ/ЗТИ<br>AICWS/CTIE |               |                   | ОИТРУ/ВРП<br>AICWS/Gross regional<br>product (GRP) |               |                   |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------|-----------------------------------------------------|---------------|-------------------|--------------------|---------------|-------------------|----------------------|---------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------|----------------------------------------------------|---------------|-------------------|
|                    | Мин.<br>Min.                                                              | Макс.<br>Max. | Медиана<br>Median | Мин.<br>Min.                                        | Макс.<br>Max. | Медиана<br>Median | Мин.<br>Min.       | Макс.<br>Max. | Медиана<br>Median | Мин.<br>Min.         | Макс.<br>Max. | Медиана<br>Median | Мин.<br>Min.            | Макс.<br>Max. | Медиана<br>Median | Мин.<br>Min.                                       | Макс.<br>Max. | Медиана<br>Median |
| 1                  | 14,9                                                                      | 36,0          | 30,6              | 6,7                                                 | 25,1          | 14,9              | 1,2                | 3,2           | 1,8               | 0,073                | 0,245         | 0,154             | 2,0                     | 9,1           | 4,9               | 0,046                                              | 0,141         | 0,092             |
| 2                  | 32,6                                                                      | 32,6          | 32,6              | 13,0                                                | 13,0          | 13,0              | 2,0                | 2,0           | 2,0               | 0,021                | 0,021         | 0,021             | 1,2                     | 1,2           | 1,2               | 0,036                                              | 0,036         | 0,036             |
| 3                  | 14,1                                                                      | 36,4          | 24,2              | 5,9                                                 | 20,4          | 11,8              | 0,8                | 2,9           | 1,4               | 0,047                | 1,133         | 0,260             | 0,4                     | 8,3           | 2,1               | 0,007                                              | 0,209         | 0,045             |
| 4                  | 9,9                                                                       | 32,6          | 18,1              | 4,4                                                 | 24,6          | 9,4               | 0,6                | 2,3           | 1,4               | 0,126                | 3,288         | 0,478             | 1,4                     | 32,8          | 5,0               | 0,010                                              | 0,131         | 0,052             |
| 5                  | 15,7                                                                      | 37,1          | 25,0              | 8,5                                                 | 24,9          | 11,2              | 1,4                | 2,8           | 1,8               | 0,045                | 0,397         | 0,084             | 1,5                     | 5,2           | 3,6               | 0,028                                              | 0,181         | 0,106             |
| 6                  | 12,8                                                                      | 26,7          | 20,2              | 5,3                                                 | 12,6          | 11,4              | 1,1                | 1,6           | 1,1               | 0,093                | 1,761         | 0,539             | 0,7                     | 11,9          | 3,3               | 0,013                                              | 0,104         | 0,044             |
| 7                  | 9,9                                                                       | 24,4          | 15,1              | 2,8                                                 | 16,2          | 6,8               | 0,5                | 1,8           | 1,0               | 0,010                | 6,364         | 0,782             | 0,2                     | 7,3           | 2,0               | 0,001                                              | 0,062         | 0,008             |

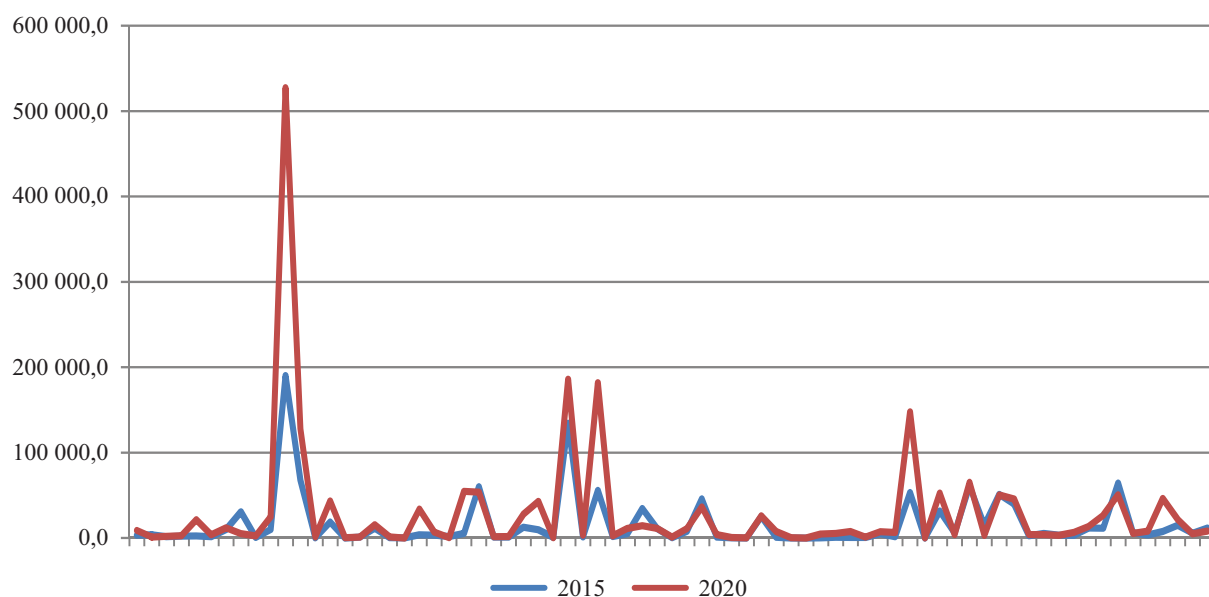


Рис. 9. Затраты на технологические инновации по регионам РФ в 2015 и в 2020 гг., млн руб.

Fig. 9. Costs of technological innovations broken down by the regions of the Russian Federation in 2015 and 2020, million RR

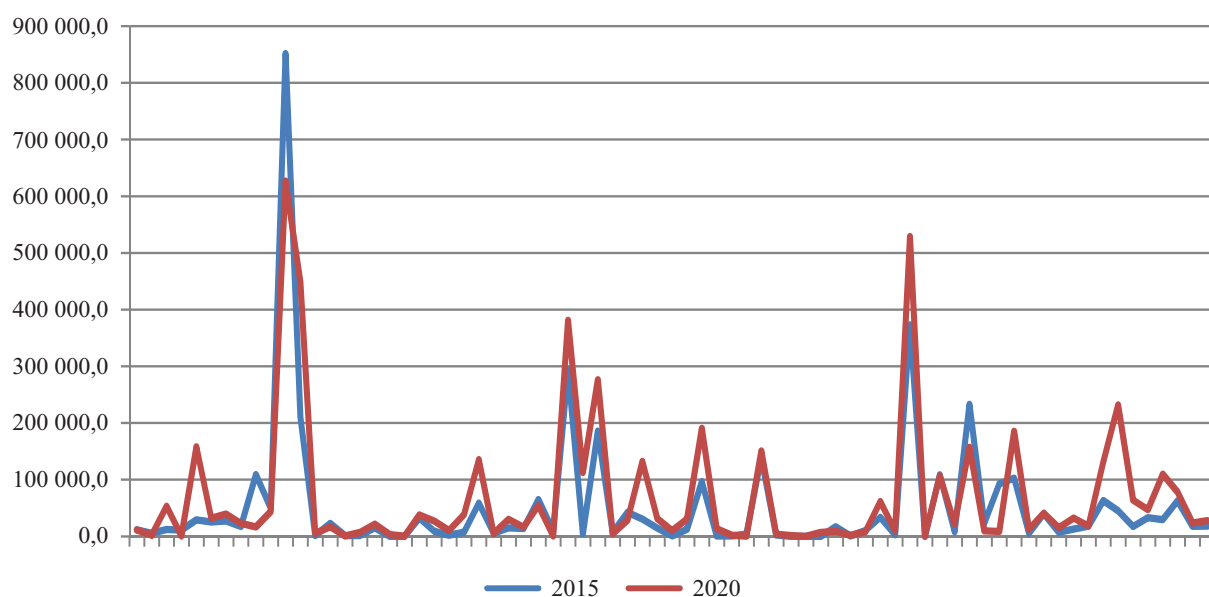


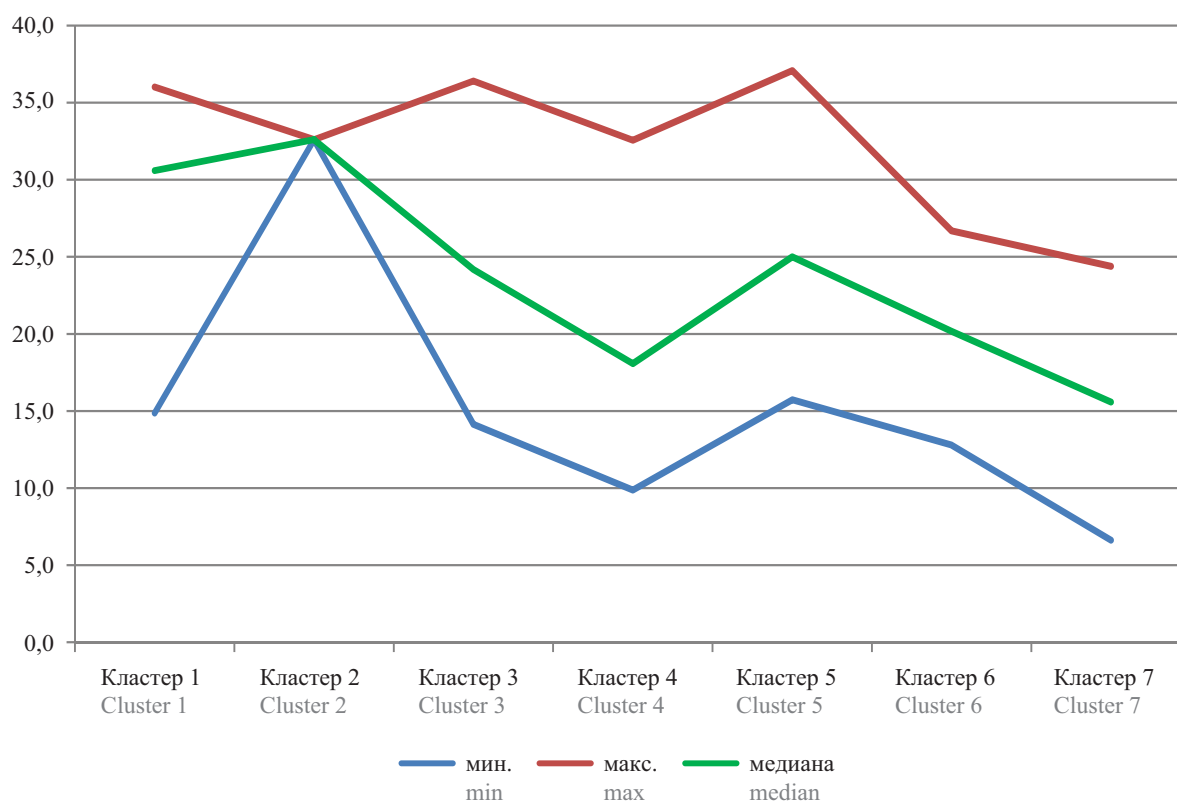
Рис. 10. Объем инновационных товаров, работ, услуг по регионам РФ в 2015 и в 2020 гг., млн руб.

Fig. 10. The volume of innovative goods, works, services broken down by the regions of the Russian Federation in 2015 and 2020, million RR

Сравнивая результаты кластеризации по абсолютным показателям, отметим, что абсолютным лидером по всем показателям по-прежнему является Москва. Однако анализом выявлено, что размер второго по объему инновационной деятельности кластера (кластер 5) увеличился с двух до пяти субъектов федерации. Кроме того, в два раза уменьшилось число регионов-аутсайдеров: кластер с наихудшими показателями (кластер 7) включает только 18 субъектов федерации против 38 в 2015 г. Кроме того, абсолют-

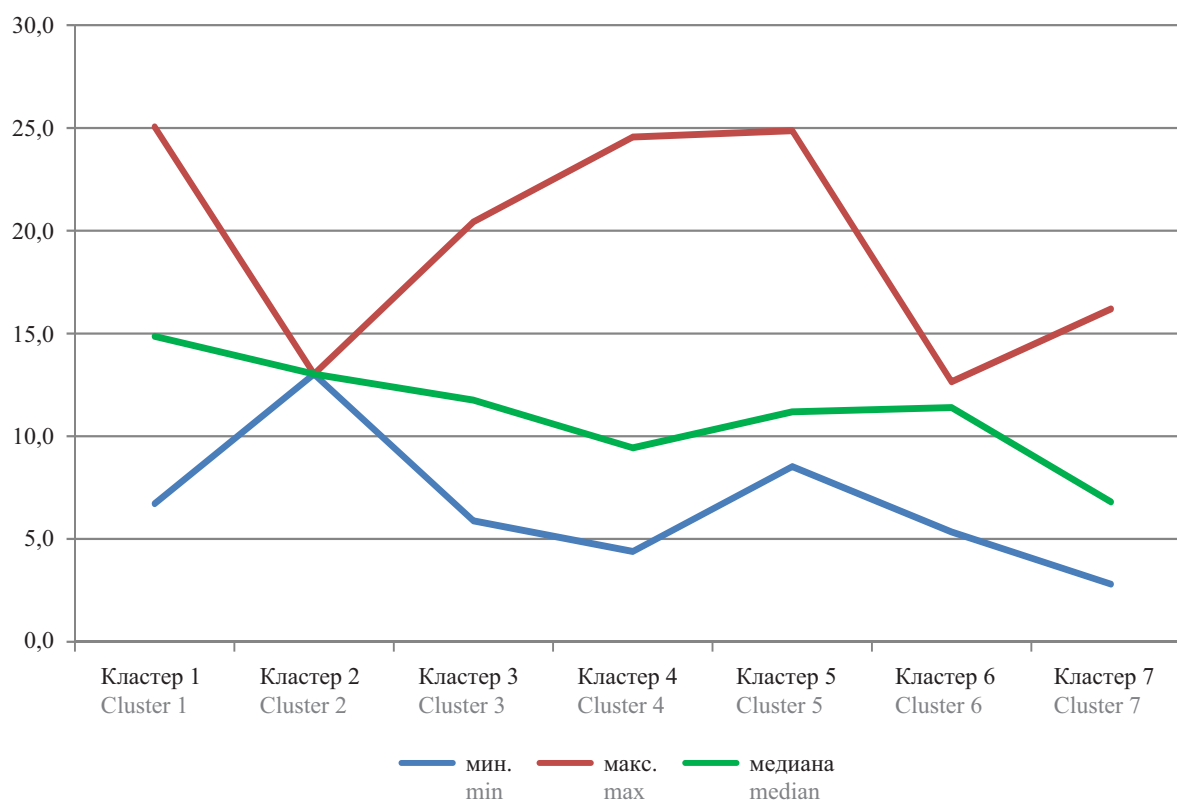
ные характеристики кластеров в среднем увеличились, что свидетельствует о повышении инновационной активности регионов. Для подтверждения этого факта на рис. 9 и 10 представлен сравнительный анализ затрат на технологические инновации и объема инновационных товаров, работ услуг в 2015 и 2020 гг. по субъектам федерации.

Показатели эффективности инноваций за 2020 г. приведены в табл. 6 и визуализированы на рис. 11–16.



**Рис. 11.** Удельный вес организаций, осуществлявших технологические инновации, % (2020)

**Fig. 11.** The share of organizations, implementing technological innovations, % (2020)



**Рис. 12.** Уровень инновационной активности организаций, % (2020)

**Fig. 12.** The level of innovative performance of organizations, % (2020)

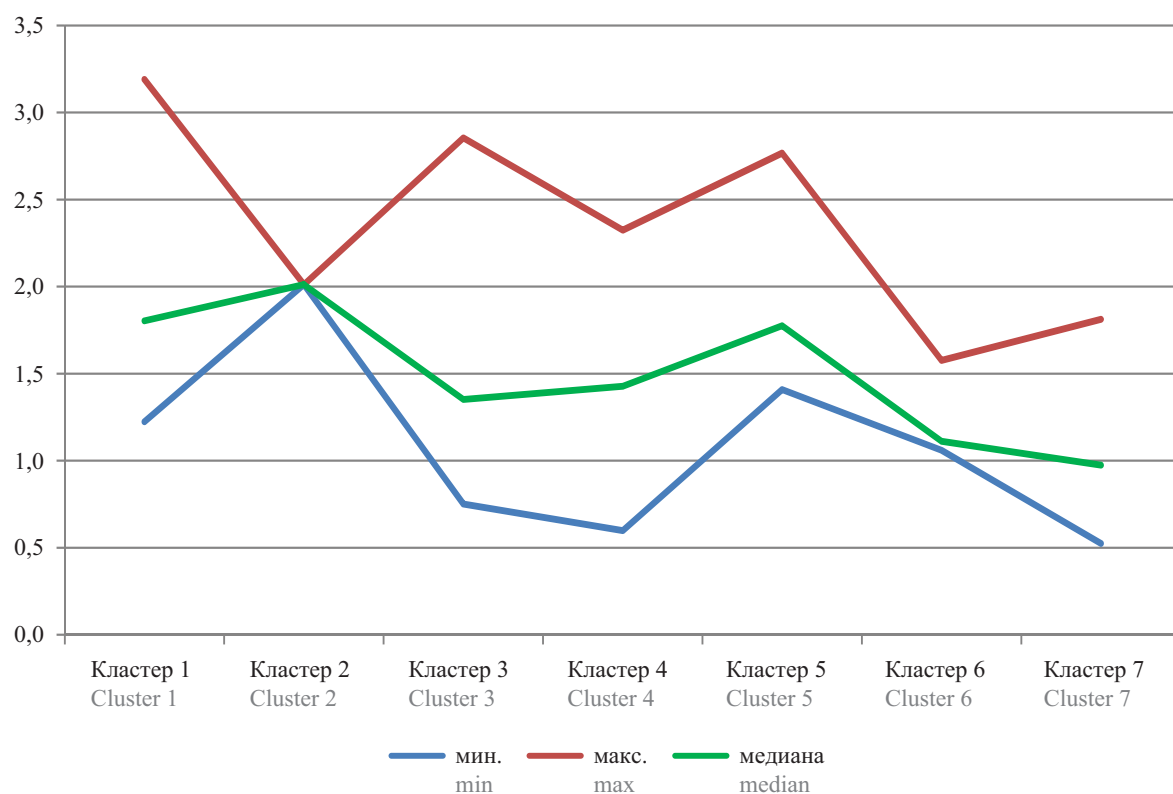


Рис. 13. Удельные затраты на научные исследования и разработки в расчете на одного сотрудника, млн руб. (2020)

Fig. 13. Unit research and development costs per employee, million RR (2020)

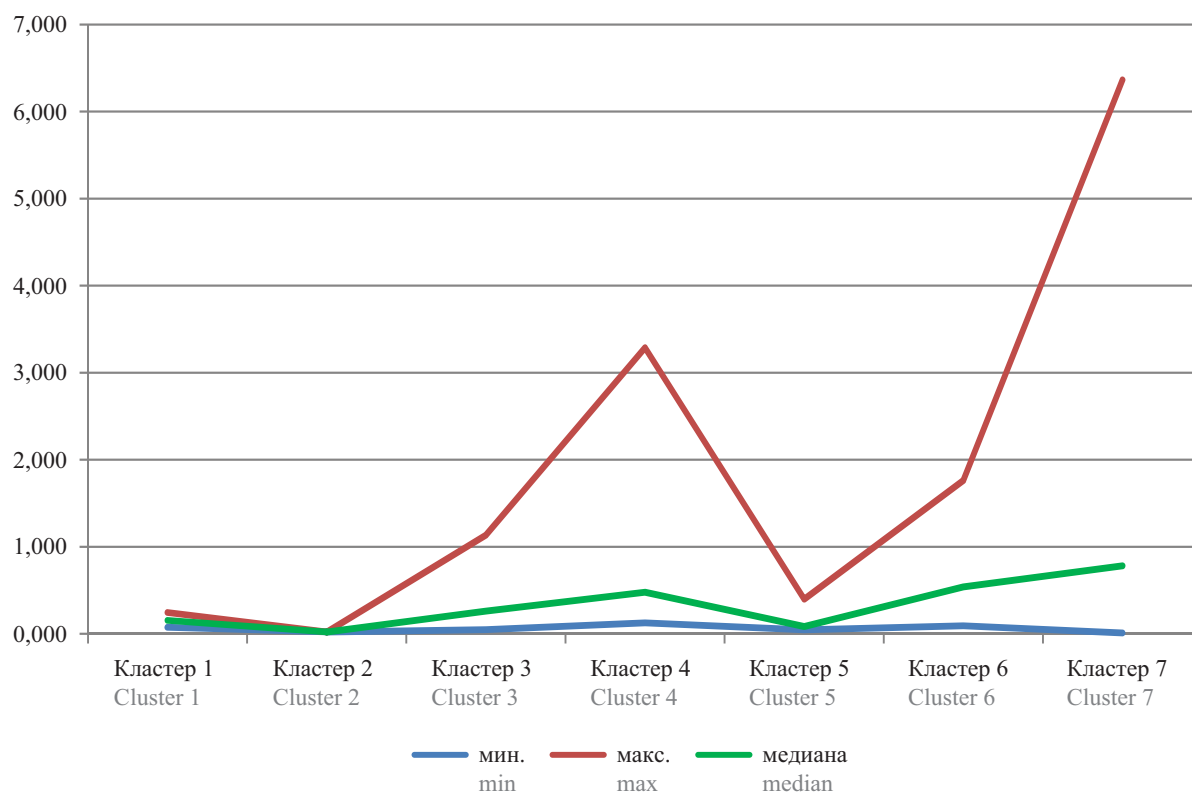
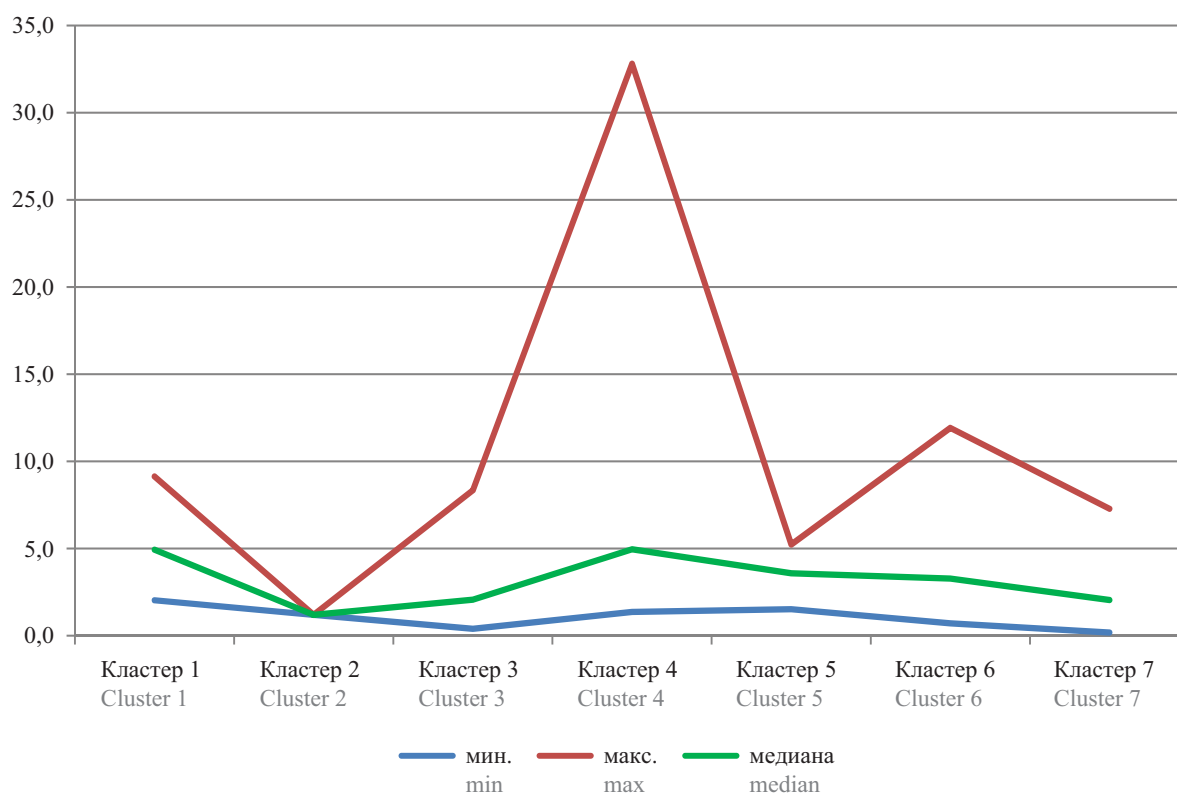


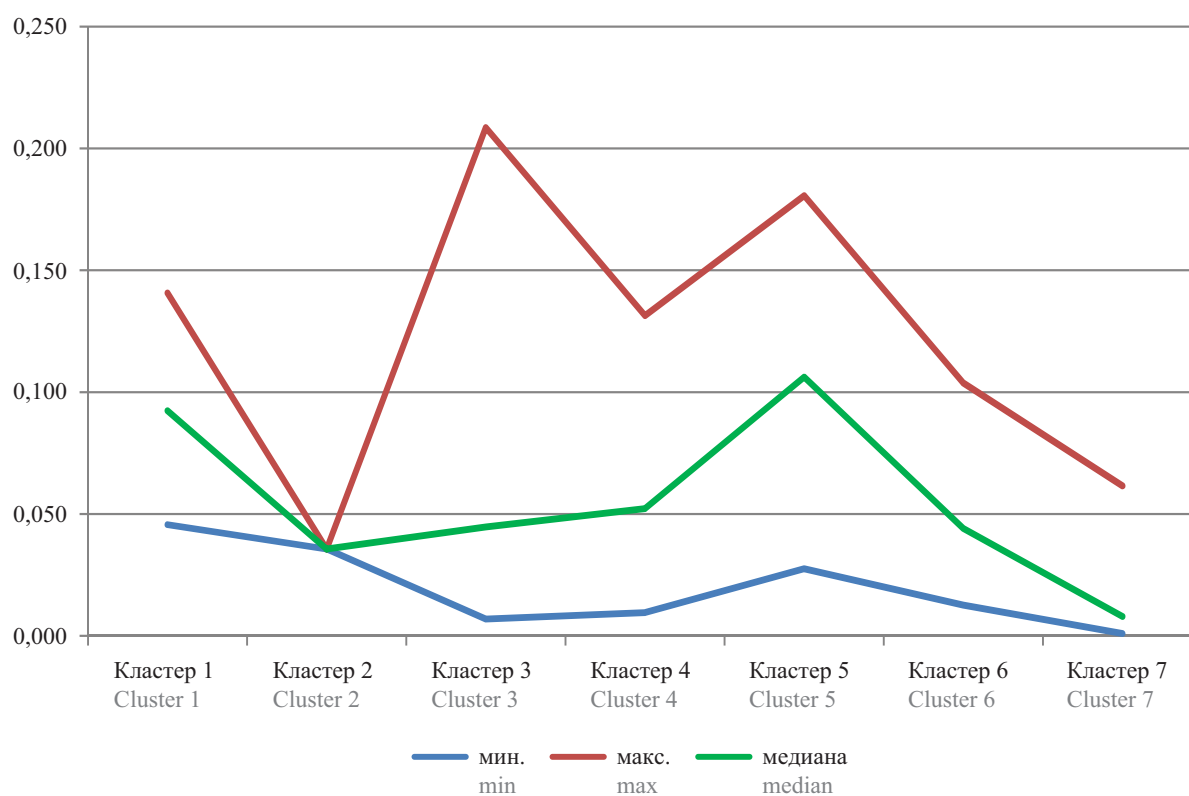
Рис. 14. Используемые передовые производственные технологии на 1 млн руб. затрат на технологические инновации, ед. (2020)

Fig. 14. Applied cutting-edge production technologies per million rubles of technological innovation costs, units (2020)



**Рис. 15.** Объем инновационных товаров, работ, услуг на 1 млн руб. затрат на технологические инновации, млн руб. (2020)

**Fig. 15.** The volume of innovative goods, works, services per million rubles of technological innovation costs, million rubles (2020)



**Рис. 16.** Удельный вес инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме продукции региона, % (2020)

**Fig. 16.** The share of innovative goods, works, services in the total amount of regional products, % (2020)

Несмотря на некоторое уменьшение колеблемости внутри кластеров, они по-прежнему остаются неоднородными по своему составу. В то же время практически исчезли аномальные выбросы, за исключением объема инновационных товаров работ, услуг на единицу инновационных затрат (рис. 15), где максимальное значение по кластеру 4 более чем в 6 раз превышает соответствующее медианное значение (Мурманская область, 32,8 руб. на рубль).

В целом показатели эффективности инноваций в 2020 г. находятся примерно на уровне 2015 г. и существенно ниже намеченных в «Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года» целевых ориентиров, что свидетельствует о неудовлетворительном состоянии инструментов реализации инновационной политики, которые еще не получили должного развития в научных исследованиях и практической деятельности субъектов отечественной экономики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Авторы предприняли попытку систематизации и построения рейтинга российских регионов, выделив две составляющие: инновационный потенциал и эффективность инновационной деятельности. К показателям инновационного потенциала были отнесены затраты на технологические инновации организаций, внутренние затраты на научные исследования и разработки, численность персонала, занятого научными исследованиями и разработками, и уровень инновационной активности организаций. Показатели эффективности инновационной деятельности включали: удельные затраты на научные исследования и разработки в расчете на одного сотрудника, количество используемых передовых производственных технологий на 1 млн руб. затрат на технологические инновации и объем инновационных товаров, работ, услуг на 1 млн руб. затрат на технологические инновации. Для каждого региона определены ранги по перечисленным показателям, произведено суммирование рангов в каждой группе, после чего выявлен окончательный ранг региона. На основании полученных данных рассчитаны коэффициенты корреляции между инновационным потенциалом и эффективностью инновационной деятельности. К сожалению, следует констатировать полное отсутствие зависимости между указанными показателями: коэффициент корреляции в 2015 г. составил 0,01, а в 2020 г. — 0,08. Такие результаты подтверждают сделанные ранее выводы о невысокой эффективности вложений в инновации в РФ, оцениваемой по данным официальной статистики.

С другой стороны, возникает вопрос о полноте и обоснованности системы показателей инновационной деятельности. В частности, отсутствуют четкие рекомендации по определению основных показателей: в ряде случаев идет отсылка к публикации

Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) и Статистического управления Европейских сообществ (Евростат), известной как Руководство Осло<sup>6</sup>, носящей достаточно общий характер и не учитывающей особенности российских реалий.

Следует отметить, что в последние годы появилось большое число исследований, посвященных вопросам построения системы показателей, характеризующих инновационную деятельность, однако большая часть из них посвящена анализу деятельности отдельных предприятий [13–20]. Из национальных рейтингов можно выделить систему рейтингов регионального развития<sup>7</sup> [21], с 2012 г. публикуемых Высшей школой экономики и используемых при расчете российского регионального инновационного индекса, формируемого Институтом статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ в рамках деятельности Российской кластерной обсерватории, а также рейтинг инновационных регионов России<sup>8</sup>, разработанный Ассоциацией инновационных регионов России в 2012 г. совместно с Министерством экономического развития РФ. Однако на уровне государственной официальной статистики подобная система пока не создана. Кроме того, высокие темпы технологических изменений требуют постоянного обновления системы показателей, характеризующих инновационную деятельность.

В связи с этим актуальным становится вопрос о разработке единой динамической системы показателей, которая бы позволила всесторонне описать инновационную деятельность как в разрезе субъектов федерации, так и в разрезе отраслей экономики, каждая из которых имеет свою специфику.

В качестве одного из прообразов такой системы можно упомянуть European innovation scoreboard (EIS, Европейское инновационное табло)<sup>9</sup>. В отличие от упоминавшегося Руководства Осло показатели данного рейтинга динамично обновляются с учетом изменений внешней среды. Первоначально система EIS включала 3 группы индикаторов, разбитых на 8 инновационных измерений, состоящих в общей сложности из 25 показателей. В рейтинге 2021 г. используется 4 группы индикаторов, 12 измерений и 32 показателя. Авторы не призывают слепо копировать данную систему, но общая методология и от-

<sup>6</sup> Oslo Manual 2018 (Руководство Осло — Рекомендации по сбору и анализу данных по инновациям). URL: [https://www.ictt.by/Docs/news/2018/10/2018-10-26\\_01/Oslo\\_Manual\\_2018\\_4th\\_Edition\\_EN.pdf](https://www.ictt.by/Docs/news/2018/10/2018-10-26_01/Oslo_Manual_2018_4th_Edition_EN.pdf)

<sup>7</sup> Рейтинги регионального развития. URL: <https://region.hse.ru/rankingid19>

<sup>8</sup> Рейтинг инновационных регионов России. URL: <https://i-regions.org/reiting/rejting-innovatsionnogo-razvitiya>

<sup>9</sup> European innovation scoreboard. URL: <https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/statistics/performance-indicators/european-innovation-scoreboard>

дельные показатели, скорректированные с учетом российских реалий, могут оказать существенную помощь.

На сегодняшний день создание национальной системы рейтингования инновационной деятельности представляется одним из перспективных направ-

лений повышения эффективности вложений в инновации и стимулирования субъектов экономической деятельности к повышению инновационной активности, что будет способствовать решению вопросов развития импортозамещения и повышения эффективности российской экономики в целом.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Антонова З.Г. Переход экономики России на инновационный путь развития // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322. № 6. С. 26–32.
2. Абдикеев Н.М., Бобылев Г.В., Богачев Д.Ю., Богачев Ю.С., Бунатян Г.З., Бывшев В.А. и др. Инновационное развитие России: проблемы и решения : монография. М. : Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, 2014. 1376 с.
3. Положенцева Ю.С., Клевцова М.Г., Вертакова Ю.В. Макроэкономические условия формирования инновационной среды региона // Управленческое консультирование. 2014. № 10 (70). С. 60–67.
4. Прокин В.В., Лепихина Т.Л., Анисимова Е.Л., Карпович Ю.В. Структура институциональной среды инноваций // Фундаментальные исследования. 2016. № 1–1. С. 182–186.
5. Институциональное обеспечение точек роста инновационной экономики России / под ред. Т.Г. Попадюк. М. : РУСАЙНС, 2016. 207 с.
6. Устинова Л.Н. Тенденции инновационного развития Российской Федерации // Экономика промышленности. 2018. Т. 11. № 11 (4). С. 338–345. DOI: 10.17073/2072-1633-2018-4-338-345
7. Александрова А.И., Зайцев А.А. Институционализация государственной поддержки инновационных процессов // Естественно-гуманитарные исследования. 2020. № 32 (6). С. 35–42. DOI: 10.24412/2309-4788-2020-10684
8. Вертакова Ю.В., Плотников В.А. Стратегия инновационного развития России: управленческие проблемы реализации // Друкеровский вестник. 2020. № 1 (33). С. 5–20. DOI: 10.17213/2312-6469-2020-1-5-20
9. Юсупов А.Х., Садулханов А.А. Проблемы инновационного развития России // Инновационная наука. 2019. № 5. С. 73–75.
10. Иванова Н.М. Проблемы инновационного развития Российской Федерации // Инновации и инвестиции. 2019. № 8. С. 13–18.
11. Серегин Р.С., Бендюков А.Б. Переход экономики России на инновационный тип развития // Вестник науки и образования. 2019. № 6–1 (60). С. 11–13.
12. Бакрунов Ю.О., Васильева Е.Ю., Версти-на Н.Г., Глазкова В.В., Каракозова И.В., Кулаков К.Ю. и др. Инновации в современных условиях: теоретические вопросы и практика реализации. М. : ГУУ, 2022. 142 с.
13. Балашов А.И., Рогова Е.М., Ткаченко Е.А. Инновационная активность российских предприятий: проблемы измерения и условия роста : монография. СПб. : Издательство Политехнического университета, 2010. 205 с.
14. Караваев И.Е. Оценка инновационного потенциала предприятий оборонно-промышленного комплекса // Российское предпринимательство. 2012. № 10 (108). С. 74–80.
15. Матузова И.В. Методика оценки инновационного потенциала промышленного предприятия // Вестник Ленинградского государственного университета им. А.С. Пушкина. 2012. Т. 6. № 4. С. 87–97.
16. Цуканова Н.Е. Методы оценки инновационного потенциала производственных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки. 2012. № 3–1. С. 236–242.
17. Яшин С.Н., Солдатова Ю.С. Совершенствование и практическая апробация методики оценки экономического состояния и уровня инновационного развития предприятия // Финансы и кредит. 2013. № 12 (540). С. 39–47.
18. Полукеева А.В. Показатели инновационной активности предприятий // Экономинфо. 2014. № 22. С. 74–77.
19. Антипин Д.А., Антипина О.В. Инновационно-активные предприятия: критерии соответствия и основные показатели функционирования в РФ // Вестник ИрГТУ. 2015. № 6 (101). С. 157–162.
20. Гораева Т.Ю., Шамина Л.К. Методика мониторинга и оценки инновационной деятельности предприятия // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2015. № 3 (221). С. 198–210. DOI: 10.5862/JE.221.19
21. Городникова Н.В., Гохберг Л.М., Дитковский К.А. и др. Индикаторы инновационной деятельности. М. : НИУ ВШЭ, 2017. 328 с.

Поступила в редакцию 4 июня 2022 г.

Принята в доработанном виде 17 июня 2022 г.

Одобрена для публикации 18 июня 2022 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Наталья Григорьевна Верстина — доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 287560, Scopus: 6506229832, ResearcherID: B-4162-2016, ORCID: 0000-0002-1792-0562; verstinang@mgsu.ru;

Ольга Феликсовна Цуверкалова — кандидат экономических наук, доцент кафедры математики; **Волгодонский инженерно-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ВИТИ НИЯУ МИФИ);** 347360, г. Волгодонск, ул. Ленина, д. 73/94; РИНЦ ID: 595839, Scopus: 57205728266, ResearcherID: J-8183-2016, ORCID: 0000-0001-6304-4498; oftzuverkalova@mephi.ru.

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Antonova Z.G. Transition of the Russian economy to an innovative way of development. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013; 322(6):26-32. (rus.).
2. Abdikeev N.M., Bobylev G.V., Bogachev D. Yu., Bogachev Yu.S., Bunatyan G.Z., Byvshev V.A. et al. *Innovative development of Russia: problems and solutions : monograph*. Moscow, Financial University under the Government of the Russian Federation, 2014; 1376. (rus.).
3. Polozhentseva Y.S., Klevtsova M.G., Vertakova Y.V. Macroeconomic conditions of formation of the innovative environment of the region. *Administrative Consulting*. 2014; 10(70):60-67. (rus.).
4. Prokin V.V., Lepikhina T.L., Anisimova E.L., Karpovich Y.V. Structure of the institutional environment of innovation. *Fundamental Research*. 2016; 1-1:182-186. (rus.).
5. *Institutional support of points of growth of the innovative economy of Russia* / ed. T.G. Popadiuk. Moscow, RUSSIGN, 2016; 207. (rus.).
6. Ustinova L.N. Tendencies of innovative development of the Russian Federation. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2018; 11:11(4):338-345. DOI: 10.17073/2072-1633-2018-4-338-345 (rus.).
7. Alexandrova A.I., Zaytsev A.A. Institutionalization of state support for innovation processes. *Natural-Humanitarian Studies*. 2020; 32(6):35-42. DOI: 10.24412/2309-4788-2020-10684 (rus.).
8. Vertakova Yu.V., Plotnikov V.A. Strategy of innovative development of Russia: management problems of implementation. *Drucker's Bulletin*. 2020; 1(33):5-20. DOI: 10.17213/2312-6469-2020-1-5-20 (rus.).
9. Yusupov A.Kh., Sadul Khanov A.A. Problems of innovative development of Russia. *Innovative Science*. 2019; 5:73-75. (rus.).
10. Ivanova N.M. Problems of innovative development of the Russian Federation. *Innovations and Investments*. 2019; 8:13-18. (rus.).
11. Serogin R.S., Bendyukov A.B. Transition of the Russian economy to an innovative type of development. *Bulletin of Science and Education*. 2019; № 6-1(60):11-13. (rus.).
12. Bakrunov Yu.O., Vasilyeva E.Yu., Verstina N.G., Glazkova V.V., Karakozova I.V., Kulakov K. Yu. et al. *Innovations in modern conditions: theoretical issues and implementation practice*. Moscow, GUU, 2022; 142. (rus.).
13. Balashov A.I., Rogova E.M., Tkachenko E.A. *Innovative activity of Russian enterprises: measurement problems and growth conditions*. St. Petersburg, Publishing house of the Polytechnic University, 2010; 206. (rus.).
14. Karavayev I.E. Assessment of the innovation potential of enterprises in the military industry. *Russian Journal of Entrepreneurship*. 2012; 10(108):74-80. (rus.).
15. Matuzova I.V. Methods of estimation of innovation potential of industrial enterprise. *Pushkin Leningrad State University Journal*. 2012; 4(6):87-97. (rus.).
16. Tsukanova N.E. Methods of innovation potential's evaluation of the production companies. *Izvestiya Tula State University*. 2012; 3-1:236-242. (rus.).
17. Yashin S.N., Soldatova Yu.S. Improvement and practical approbation of the methodology for assessing the economic condition and the level of innovative development of an enterprise. *Finance and Credit*. 2013; 12:39-47. (rus.).
18. Polukeeva A. Indicators of innovativeness. *Economicinfo*. 2014; 22:74-77. (rus.).
19. Antipin D., Antipina O. Innovatively active enterprises: eligibility criteria and main indicators of functioning in Russia. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015; 6(101):157-162. (rus.).
20. Goraeva T.Yu., Shamina L.K. Monitoring and assessment technique of innovative activity of an enterprise. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2015; 3(221):198-210. DOI: 10.5862/JE.221.19 (rus.).
21. Gorodnikova N.V., Gokhberg L.M., Ditkovskiy K.A. et al. *Indicators of innovative activity*. Moscow, NRU HSE, 2017; 328. (rus.).

*Received June 4, 2022.*

*Adopted in revised form on June 17, 2022.*

*Approved for publication on June 18, 2022.*

**B I O N O T E S :** **Natalia G. Verstina** — Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 287560, Scopus: 6506229832, ResearcherID: B-4162-2016, ORCID: 0000-0002-1792-0562; verstinang@mgsu.ru;

**Olga F. Tsuverkalova** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics; **Volgodonsk Engineering and Technical Institute — the branch of National Research Nuclear University MEPhI**; 73/94 Lenina st., Volgodonsk, 347360, Russian Federation; ID RISC: 595839, Scopus: 57205728266, ResearcherID: J-8183-2016, ORCID: 0000-0001-6304-4498; oftsuverkalova@mephi.ru.

*Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflict of interest.*

## Инновационный подход к организации внутреннего аудита строительных предприятий

Наталья Николаевна Щепкина

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Широкое внедрение инноваций в аудите зарубежными предприятиями закладывает основу для применения новых подходов к решению задач внутреннего аудита. Одним из таких инновационных подходов, получивших популярность среди зарубежных предприятий, имеющих филиалы в различных странах мира, является дистанционный аудит (ДА), ориентированный на решение задач внутреннего аудита с использованием информационно-коммуникационных технологий и обеспечивающий повышение эффективности функционирования предприятия в целом. В настоящее время для большинства российских строительных предприятий вопрос внедрения ДА находится в стадии разработки. Ввиду этого в исследовании сконцентрировано внимание на разработке концепции внедрения ДА в деятельность служб внутреннего аудита крупных строительных предприятий.

**Материалы и методы.** Применение метода анализа и классификации информации позволило собрать в единую систему имеющуюся информацию по вопросам внедрения ДА предприятиями различных сфер деятельности, упорядочить значительный информационный ресурс, выявить проблематику определения термина «дистанционный аудит». Системный метод, использованный в исследовании, позволил сформировать общее видение процесса внедрения дистанционного аудита, дал возможность анализа современных условий, влияющих на его внедрение, и на этой основе сформировать факторы, влияющие на внедрение ДА; выявить принципы его применения, а также определить основные этапы внедрения.

**Результаты.** Последовательное решение поставленных задач способствовало разработке концепции по внедрению ДА в деятельность служб внутреннего аудита (СВА) крупных строительных предприятий с филиальной сетью, в основу которой положена модель plan-do-check-act (PDCA), циклический характер которой способствует постоянному улучшению процессов по введению ДА.

**Выводы.** Разработана концепция внедрения ДА, позволяющая в значительной мере унифицировать процесс внедрения ДА в деятельность СВА крупных строительных предприятий с филиальной сетью, и на этой основе обеспечить сокращение нагрузки на объекты аудита, трудозатраты проверяющих и сроки проведения аудита.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дистанционный аудит, инновация, концепция, принципы, строительное предприятие, факторы, служба внутреннего аудита, филиалы

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Щепкина Н.Н. Инновационный подход к организации внутреннего аудита строительных предприятий // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 790–802. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.790-802

*Автор, ответственный за переписку:* Наталья Николаевна Щепкина, Natasha.chepkina@mail.ru.

## Innovative approach to the organization of internal audit of construction enterprises

Natalia N. Shchepkina

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The widespread introduction of auditing innovations by foreign enterprises lays the foundation for the application of new approaches to solving internal audit tasks. One of such innovative approaches, which has gained popularity among foreign enterprises, having branches in various countries of the world, is remote audit, focused on solving internal audit tasks by using information and communication technologies and ensuring an increase in the efficiency of the enterprise as a whole. Currently, the issue of implementing remote audit is being studied by the most Russian construction companies. Hence, the study focuses on the development of the concept of implementing remote audit by internal audit arms of large construction enterprises.

**Materials and methods.** The application of methods of analysis and classification of information made it possible to pool the information about the implementation of remote audit at enterprises operating in various fields, organize a substantial information resource, and identify the problems of defining the term “remote audit”. The system method, used in the study, helped to develop the general idea of the process of implementing remote audit, analyze the current conditions affecting

its implementation, formulate the factors influencing the implementation of remote audit; determine the principles of its application and the main stages of implementation.

**Results.** The phased solution of the tasks, outlined in the study, contributed to the development of a concept of introduction of remote audit into the activities of internal audit arms of major construction enterprises having a network of branches that follows the plan-do-check-act (PDCA) model, whose cyclical nature contributes to the ongoing improvement of remote audit implementation processes.

**Conclusions.** The concept for the introduction of remote audit has been developed Based on the results of the study. It allows to significantly unify the process of introducing remote audit into the activities of internal audit arms of large construction enterprises, having a branch network, and decrease the burden on audited companies, labour expenditures of auditors and audit deadlines.

**KEY WORDS:** remote audit, innovation, concept, principles, construction company, factors, internal audit arm, branches

**FOR CITATION:** Shchepkina N.N. Innovative approach to the organization of internal audit of construction enterprises. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):790-802. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.790-802 (rus.).

Corresponding author: Natalia N. Shchepkina, Natasha.chepkina@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Новые вызовы времени, обусловленные стремительным развитием технологий, увеличением объемов информации, турбулентностью на финансовых рынках, растущим ожиданием от внутреннего аудита, ростом уровня киберпреступности, требуют от предприятий строительной отрасли активного внедрения инновационных решений для повышения эффективности операций, быстрого реагирования на потребности клиентов, усиления конкурентных преимуществ. В современных условиях наиболее распространенными инновациями среди крупных строительных предприятий являются перемены в кор-

поративной стратегии, роботизация процессов автоматизации, анализ данных<sup>1</sup> (рис. 1).

Вместе с тем внедрение инноваций приводит к изменениям в работе всех подразделений предприятия, в том числе и службы внутреннего аудита (СВА), деятельность которой ориентирована на предоставление независимой и объективной информации совету директоров и исполнительным органам управления о состоянии финансово-хозяйственной

<sup>1</sup> Margaret H. Christ, Marc Eulerich, David A. Wood. Internal Auditors' Response to Disruptive Innovation. URL: [https://contentz.mkt5790.com/lp/2842/268211/Foundation%20IAResponseToDisruptiveInnovations%20June%202019\\_0.pdf](https://contentz.mkt5790.com/lp/2842/268211/Foundation%20IAResponseToDisruptiveInnovations%20June%202019_0.pdf)



**Рис. 1.** Основные инновации, внедряемые строительными предприятиями, % респондентов (исследование Института внутренних аудиторов)

**Fig. 1.** The main innovations introduced by construction companies, % of respondents (the research is made by the Institute of Internal Auditors)

деятельности, надежности и эффективности систем управления рисками и внутреннего контроля для сохранения финансовой устойчивости, повышения результативности бизнес-процессов, совершенствования деятельности и достижения поставленных целей. Аналогично инновационные изменения в работе внутренних аудиторов, основанные на применении новых методов коммуникаций, методов анализа данных или непрерывного аудита, также могут повлиять на деятельность строительного предприятия в целом. Виды технологических решений, используемых СВА<sup>2</sup>, представлены на рис. 2.

Среди типов аудитов, в рамках которых применяются анализ данных, стоит выделить закупки (63 %), запасы (50 %), финансовый учет и отчетность (35 %), расследование мошенничеств и злоупотреблений (34 %). Стоит отметить, что Microsoft Office (преимущественно Excel) продолжает оставаться основным инструментом, используемым СВА для анализа. При этом за последние два года не произошло существенных изменений в автоматизации внутреннего аудита российских предприятий.

Тем временем в мировой практике широкое распространение во внутреннем аудите получили такие инновации, как нейронные сети, Big Data, BI-системы, роботизация, искусственный интеллект, процессный анализ, единое хранилище данных<sup>1</sup>. Внедрение инноваций формирует основу для применения новых подходов к решению задач внутреннего аудита. Одним из таких инновационных подходов, получивших популярность среди зарубежных предприятий, имеющих филиалы в различных странах мира, является дистанционный аудит (далее — ДА), ориентированный на решение задач внутреннего аудита с помощью информационно-коммуникационных технологий и обеспечивающий

повышение эффективности функционирования предприятия в целом. В настоящее время для большинства российских строительных предприятий вопрос внедрения ДА находится в стадии разработки.

На сегодняшний день большая часть трудов российских авторов в области аудита посвящена внутреннему традиционному аудиту, тема дистанционного аудита как подхода к решению задач внутреннего аудита в отечественной литературе изучена недостаточно. Среди российских ученых, в трудах которых рассматриваются теоретические аспекты внутреннего аудита, стоит отметить: Х.М. Гумбу<sup>3</sup>, Т.А. Мирошниченко<sup>4</sup>, Н.А. Казакову<sup>5</sup>, М.А. Штефана<sup>6</sup>, Б.Н. Соколова, А.С. Русакову<sup>7</sup>; К. Азовцева, А. Горлова [1]; Н.В. Пислегина<sup>8</sup>. Методические основы проведения ДА системы менеджмента качества исследуются А.Н. Хаценко, Г.А. Машенцевой, Н.В. Предеус [2]; Н.Ю. Извариной, Р.О. Реутовой, Р.А. Бондарева, С.С. Зубаревой [3]. Значительная часть работ в сфере ДА принадлежит зарубежным ученым. Концептуальные основы риск-ориентированного внутреннего

<sup>3</sup> Гумба Х.М. и др. Строительный контроль и аудит : учебник для вузов / ответ. ред. Х.М. Гумба. М. : Юрайт, 2022. 240 с.

<sup>4</sup> Мирошниченко Т.А. Аудит : учебное пособие. Часть 1. Основы аудита. Новочеркасск : Колорит, 2018. 163 с.

<sup>5</sup> Аудит : учебник для СПО / под общ. ред. Н.А. Казаковой. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Юрайт, 2021. 409 с.

<sup>6</sup> Аудит. Часть 2. Учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / под ред. М.А. Штефан. М. : Юрайт, 2018. 404 с.

<sup>7</sup> Соколов Б.Н. Создание и функционирование систем внутреннего контроля, внутреннего аудита и управления рисками. М. : Перо, 2017. 390 с.

<sup>8</sup> Филиппев Д.Ю., Пислегина Н.В. Аудит : учебник. М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2020. 278 с.

<sup>2</sup> Исследование текущего состояния и тенденций развития внутреннего аудита в России. URL: <https://www.iaa-ru.ru/>

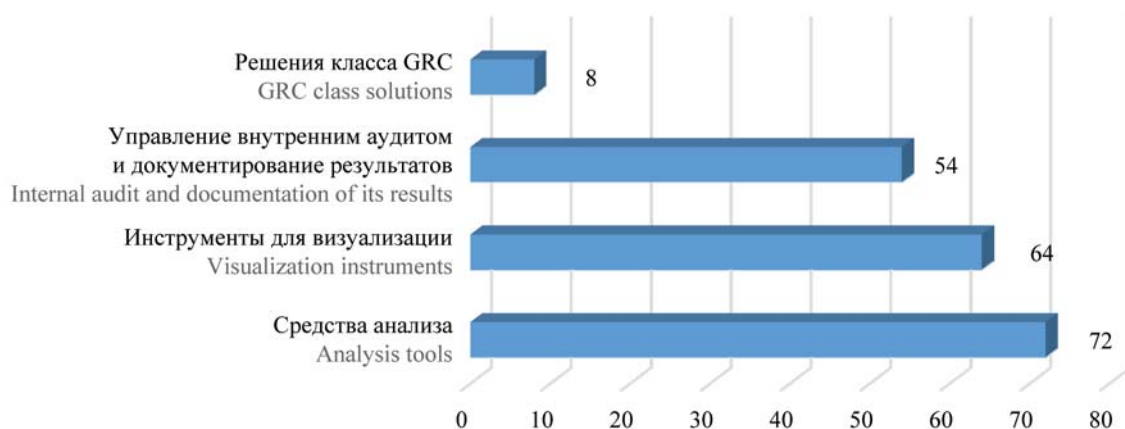


Рис. 2. Технологические решения, используемые СВА в своей деятельности (исследование Института внутренних аудиторов)

Fig. 2. Technological solutions used by IAS in their activities (the research of the Institute of Internal Auditors)

**Табл. 1.** Логическая последовательность решения задач исследования  
**Table 1.** Logical sequence of solving problems of the research project

|                                                                                                                                                                                                                         | Этап 1 / Stage 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Этап 2 / Stage 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Этап 3 / Stage 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Задачи / Tasks                                                                                                                                                                                                          | Исследование информационных источников<br>Research of information sources                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Анализ и систематизация собранной информации<br>Analysis and systematization of collected information                                                                                                                                                                                                           | Разработка Концепции внедрения<br>ДА в деятельность СВА<br>Development of a Concept for the implementation of RA in the activities of an IAA (internal audit arm)                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <p>1. Конкретизировать понятие «дистанционный аудит» для целей разработки Концепции внедрения ДА</p> <p>1. To specify the concept of “remote audit” for the purposes of developing the Concept of RA implementation</p> | <p>Систематизация нормативно-законодательной базы в сфере дистанционного аудита.</p> <p>Определение нормативно-правовых актов, актуальных для конкретизации термина «дистанционный аудит»</p> <p>Systematization of the regulatory and legal framework in the field of remote audit.</p> <p>Identification of regulatory legal acts relevant to the refining of the “remote audit” term</p>                                                                                                                                                                            | <p>Систематизация подходов к трактовке термина «дистанционный аудит».</p> <p>Уточнение понятия «дистанционный аудит»</p> <p>Systematization of approaches to the interpretation of the “remote audit” term.</p> <p>Clarification of the notion of “remote audit”</p>                                            | <p>Обоснование конкретизации трактовки термина «дистанционный аудит» для целей разработки Концепции внедрения ДА</p> <p>Rationale for more specific interpretation of the “remote audit” term for the purposes of developing the Concept of RA implementation</p>                                                                                                                                                                                     |
| <p>2. Определить факторы, влияющие на проведение ДА и принципы его применения</p> <p>2. Determine the factors affecting the RA and the principles of its application</p>                                                | <p>Систематизация открытых зарубежных и российских источников в сфере дистанционного аудита.</p> <p>Определение источников, значимых для определения условий внедрения ДА.</p> <p>Определение лучших российских и зарубежных практик в сфере дистанционного аудита</p> <p>Systematization of open foreign and Russian sources in the field of remote audit.</p> <p>Identification of sources significant for determining the conditions for the implementation of RA.</p> <p>Identification of the best Russian and foreign practices in the field of remote audit</p> | <p>Систематизация условий, влияющих на внедрение ДА.</p> <p>Определение факторов, влияющих на формирование ДА, принципов применения</p> <p>Systematization of conditions affecting the implementation of RA.</p> <p>Identification of factors influencing the formation of RA, principles of RA application</p> | <p>Обоснование классификации факторов, влияющих на внедрение ДА.</p> <p>Выделение классификационного признака</p> <p>Систематизированное представление факторов в зависимости от классификационного признака</p> <p>The rationale for the classification of factors affecting the implementation of RA.</p> <p>Selection of the classification attribute.</p> <p>Systematized representation of factors depending on the classification attribute</p> |
| <p>3. Сформировать этапы внедрения ДА в деятельность СВА</p> <p>3. Formulate the stages of RA implementation in IAA activities</p>                                                                                      | <p>Систематизация лучших российских и зарубежных практик в области внедрения ДА.</p> <p>Определение последовательности внедрения ДА</p> <p>Systematization of the best Russian and foreign practices in the area of RA implementation.</p> <p>Identification of the sequence of RA implementation</p>                                                                                                                                                                                                                                                                  | <p>Систематизация этапов внедрения ДА.</p> <p>Определение последовательности этапов внедрения ДА</p> <p>Systematization of the stages of RA implementation.</p> <p>Identification of the sequence of stages of RA implementation</p>                                                                            | <p>Представление Концепции внедрения ДА в деятельность СВА строительных предприятий, имеющих филиальную сеть</p> <p>Presentation of the Concept for the implementation of RA in the activities of the IAA of construction enterprises having networks of branches</p>                                                                                                                                                                                 |

аудита освещаются в трудах D. Griffiths, D. McNamee, G.M. Selim, Pickett K.H. Spencer, Института внутренних аудиторов Великобритании и Ирландии, Комитета спонсорских организаций Комиссии Тредвея (США), Международного института внутренних аудиторов. Влияние методов ДА на качество и результативность аудиторской проверки представлено в публикациях Saeed Rabea Baatwah [4]; Lily Nguyen, Le Vu, Xiangkang Yin [5]. Вопросам внедрения новых технологий в процессы внутреннего аудита и фундаментального переосмысления на этой основе парадигмы внутреннего аудита посвящены исследования Pavel Castka, Cory Searcy [6]; Johan Frishammar, Anders Richtnér, Anna Brattström, cMatsMagnusson, Jennie Björk [7]; Andrew Gross, Jamie Hoelscher, Brad J. Reed, Gregory E. Sierra [8]; Sergeja Slapničar, Tina Vuko, Marko Čular, Matej Drašček [9]. Различные аспекты ДА данных при использовании облачных хранилищ представлены в трудах Imad El Ghoubach, Rachid Ben Abbou, Fatiha Mrabti [10]; Kuan Fan, Zijian Bao, Mingxi Liu, Athanasios V. Vasilakos, Wenbo Shi [11]; Jiaying Li, Jigang Wu, Guiyuan Jiang, Thambipillai Srikanthan [12]; Rama Krishna Kalluri, C.V. Guru [13]; Haoxiang Han, Fei aZhengYan, Xiaokang Zhou [14]. Однако, отмечая вклад зарубежных ученых, необходимо заметить, что полученные ими результаты требуют определенной систематизации и адаптации к специфике российских предприятий.

В настоящей работе автор сконцентрировал внимание на процессе внедрения дистанционного аудита в деятельность СВА крупных строительных предприятий, имеющих филиалы в различных регионах Российской Федерации, и финансовые возможности на внедрение инноваций.

Цель исследования — разработка концепции формирования ДА, позволяющей в значительной мере унифицировать процесс внедрения ДА в деятельность СВА крупных строительных предприятий с филиальной сетью и на этой основе обеспечить сокращение нагрузки на объекты аудита, трудозатраты проверяющих и сроки проведения аудита. Для достижения поставленной цели определены несколько логически взаимосвязанных задач, последовательное решение которых позволило получить новые научные результаты:

- конкретизировать понятие «дистанционный аудит» для разработки концепции;
- установить факторы, влияющие на проведение ДА, принципы его применения;
- разработать этапы внедрения ДА в деятельность СВА крупных строительных предприятий, имеющих филиальную сеть.

Решение этих задач осуществлялось в рамках выполнения трех последовательных этапов (табл. 1).

Первый этап — изучение информационных источников. Направлен на сбор и обработку информации, актуальной для разработки концепции ДА.

Второй — анализ и систематизация собранной информации. Ориентирован на систематизацию подходов к трактовке термина «дистанционный аудит», условий, влияющих на его внедрение, этапов внедрения ДА.

Третий — разработка концепции внедрения ДА в деятельность СВА. Фокусирует усилия первых двух этапов на ее разработку, основанную на обновленном понятии дистанционного аудита, новой системе факторов, влияющих на внедрение ДА, и принципов его применения на строительном предприятии.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование автором открытых российских и зарубежных источников, значимых для разработки концепции внедрения ДА, показало, что активная работа в направлении внедрения ДА в деятельность СВА зарубежными предприятиями различных видов деятельности была начата в условиях распространения коронавирусной инфекции COVID-19. В экономически развитых странах (США, странах Евросоюза) крупные предприятия, имеющие филиальную сеть в различных странах мира, для обеспечения проведения внутреннего аудита применили дистанционный аудит, который получил дальнейшее развитие и после снятия ограничений, вызванных пандемией [15].

Для решения задачи определения термина «дистанционный аудит» при формировании концепции использован метод анализа и классификации информации, который дал возможность собрать в единую систему имеющуюся информацию по вопросам применения ДА предприятиями различных сфер деятельности, упорядочить значительный информационный ресурс, выявить проблематику в определении термина. Применение этого метода обеспечило понимание необходимости конкретизации понятия «дистанционный аудит» для разработки концепции по внедрению ДА в деятельность СВА крупных строительных предприятий, имеющих филиальную сеть.

Анализ законодательной и нормативно-правовой базы различных стран мира, актуальной для уточнения ключевого понятия исследования, свидетельствует о том, что к настоящему времени трактовку термина «дистанционный аудит» дают лишь два стандарта. Стандарт ISO 9001 «Группа аудиторских практик. Издание 1. Руководство по дистанционным аудитам»<sup>9</sup>, утвержденный Международной организацией по стандартизации 16.04.2020, рассматривает ДА как метод аудита, обеспечивающий гибкость достижения целей аудита. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 59424-2021 «Руководящие указания по дистанционному проведению

<sup>9</sup> ISO 9001. Группа аудиторских практик. Издание 1. Руководство по дистанционным аудитам. URL: 9a46cce24d39b1436fc10e04a67fdc50.pdf (nadzor-info.ru)

анализа состояния производства и аудита систем менеджмента»<sup>10</sup> представляет ДА как «систематический, независимый и документированный процесс получения свидетельств аудита для их объективной оценки и определения степени выполнения согласованных критериев аудита без посещения объекта аудита с использованием информационно-коммуникационных технологий для обеспечения проведения аудита».

Систематизация материалов, представляющих различные подходы к определению ДА, показала следующие варианты его идентификации в открытых источниках:

- эффективная альтернатива или дополнением к традиционным подходам [16];
- систематический, независимый, документированный процесс получения свидетельств аудита и объективного их оценивания в целях установления степени выполнения согласованных критериев аудита, реализуемый без посещения объекта аудита, с использованием информационно-коммуникационных технологий [17];
- инновация к проведению внутреннего аудита [18];
- процесс использования информационно-коммуникационных технологий для анализа данных и составления отчетов контроля качества, сбора электронных доказательств и взаимодействия с проверяемым предприятием, независимо от местонахождения аудитора [19].

Изучение собранных автором материалов продемонстрировало потребность их анализа в соответствии с поставленными задачами. Важно отметить, что трактовка понятия «дистанционный аудит» в рассмотренных источниках в целом схожа по содержанию, а специфика ее формулировки обусловлена различием задач, решаемых при разработке документов — программ, стандартов. Возникла необходимость конкретизации понятия «дистанционный аудит» для разработки концепции по его внедрению в деятельность СВА крупных предприятий с филиальной сетью в соответствии с принципами его использования. Таким образом, в рамках данного исследования термин «дистанционный аудит» предлагается рассматривать как подход к решению задач внутреннего аудита с помощью информационно-коммуникационных технологий, позволяющих автоматизировать аудиторские процедуры и анализировать исследуемые данные как ретроспективно, так и в режиме реального времени на основе непрерывного мониторинга и охвата всего объема информации, которая требуется для аудиторской проверки. С целью разработки концепции по внедрению ДА стоит выделить основные виды ДА:

• непрерывный аудит — вид дистанционного аудита, в рамках которого аудиторские процедуры автоматизируются и встраиваются в информационные системы компании, чтобы обеспечить их выполнение непрерывно (в режиме реального времени) или с заданной периодичностью;

• компьютеризированная обработка данных для аудита — вид ДА, в рамках которого применяется полностью или частично автоматизированный анализ массива изучаемых сведений с целью извлечения полезной информации и формирования выводов и рекомендаций.

Переход к следующей задаче исследования, связанной с формированием факторов, влияющих на внедрение ДА и принципов его применения, определил необходимость получения материалов из открытых российских и зарубежных источников относительно современной практики использования ДА организациями в различных странах мира для определения условий, влияющих на его внедрение. Выявление условий внедрения ДА в деятельность СВА основано на сравнительном анализе. Этот метод дает возможность выделить наиболее значимые условия, влияющие на внедрение ДА, принять решение по выбору факторов и определить принципы использования ДА при разработке концепции.

Первый подход к выявлению условий основывается на практическом опыте организаций различных сфер деятельности США и стран Евросоюза, имеющих филиалы в различных странах мира и применивших в своей деятельности дистанционный аудит в период пандемии COVID-19 [15]. Согласно такому подходу, выделяют условия, ограничивающие введение ДА в деятельность СВА, и условия, дающие преимущества от его внедрения. Среди условий, сдерживающих ДА, отмечены сложности при установлении взаимопонимания с проверяемыми, возможности появления случаев мошенничества ввиду отсутствия личного общения; отсутствие возможности замены очных наблюдений. Среди преимуществ — сокращение командировочных расходов; большое количество доступных аудиторов, готовых принять участие в проверке; расширенное покрытие вопросов проверки; широкие возможности привлечения узких специалистов для проверки; снижение времени аудиторского присутствия на объекте; улучшение организации сбора и подтверждения необходимой документации.

Исследованные материалы показали различие условий, влияющих на введение ДА, обусловленных различными видами деятельности предприятий. В частности, производственное предприятие, имеющее более чем 40 объектов на территории США, использующее ДА в 2019 г. в качестве инструмента для проведения ежегодных аудитов на каждом проверяемом объекте, в последующем стало применять ДА на постоянной основе и отметило значительное сокращение расходов на командировки сотрудников СВА.

<sup>10</sup> ГОСТ Р 59424-2021. Руководящие указания по дистанционному проведению анализа состояния производства и аудита систем менеджмента.

Табл. 2. Условия, влияющие на внедрение ДА строительных предприятий

Table 2. Conditions affecting the implementation of DA at construction enterprises

| Условия, в отношении которых ожидания внутренних аудиторов совпали<br>Conditions for which internal auditors' expectations match                                                                                                          | Условия, которые были переоценены внутренними аудиторами<br>Conditions overestimated by internal auditors                                                                           | Условия, которые недооценены внутренними аудиторами<br>Conditions underestimated by internal auditors                                                                                                                                                                         | Условия, влияющие на ресурс времени внутреннего аудитора<br>Conditions affecting internal auditor's time resource                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Существенное снижение количества источников информации, которые возможно использовать при проведении внутреннего аудита<br>Significant reduction in the number of sources of information that can be used when conducting internal audits | Переход на общение в формате видеоконференции с точки зрения коммуникации<br>Transition to videoconferencing for communication purposes                                             | Повышение риска сбора информации, которая не соответствует международным профессиональным стандартам в части достоверности и объективности<br>A higher risk of collecting information that does not meet international professional standards for reliability and objectivity | Время нахождения аудиторов в пути<br>The time when the auditors are on the road                                                                                                          |
| Возникновение сложностей с определением реального состояния активов<br>The emergence of difficulties in identifying the real condition of assets                                                                                          | Технические ограничения, сбои, связанные с удаленным использованием информационных систем<br>Technical restrictions, failures associated with the remote use of information systems | Увеличение доли вторичной информации, получаемой из различных видов отчетов<br>Increasing the share of secondary information obtained from various types of reports                                                                                                           | Дополнительная проверка информации, полученной в дистанционном режиме<br>Additional double-checking of information received in the remote mode                                           |
| Ограничения в работе с определенными видами документации<br>Limitations in work with certain types of documentation                                                                                                                       | Трудности с подтверждением физического наличия активов<br>Difficulties in confirming the physical existence of assets                                                               | Ограничения, связанные с использованием некоторых видов аудиторских процедур<br>Restrictions associated with the use of certain types of audit procedures                                                                                                                     | Взаимодействие с сотрудниками, частично выполняющими процедуры аудита, на местах проведения проверки<br>Interaction with employees who partially perform audit procedures at audit sites |
|                                                                                                                                                                                                                                           | Отсутствие опыта проведения дистанционного аудита у членов аудиторской команды<br>Team members have no experience in conducting remote audits                                       | Процент повышения уровня вовлеченности в процесс сотрудников аудируемого подразделения<br>The percent increase in the level of involvement of employees of the audited unit                                                                                                   | Использование дополнительных механизмов информационной защиты<br>The use of additional information security mechanisms                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                           | Отсутствие методик проведения дистанционного аудита<br>Lack of remote auditing methodologies                                                                                        | Необходимость соответствия возросшим требованиям в области информационной безопасности<br>The need to meet tighter information security requirements                                                                                                                          | Преодоление прочих технических ограничений<br>Overcoming other technical limitations                                                                                                     |

Юридическая французская организация, применившая ДА для проведения обязательного юридического аудита, указала на сокращение сроков аудиторской проверки.

Второй подход основан на анализе и обобщении результатов опроса, проведенного Ассоциацией «Институт внутренних аудиторов», в котором приняли участие внутренние аудиторы крупных строительных предприятий; направлен на выявление условий, влияющих на внедрение ДА строительных предприятий; отражает разницу между ожиданием и реальностью в части использования ДА как инструмента внутреннего аудитора (табл. 2) [20].

Решение третьей задачи потребовало систематизации подходов к внедрению ДА предприятиями различных сфер деятельности в российской и зарубежной практике, установления последовательности внедрения ДА и формирования на этой основе его этапов. Среди лучших российских практик внедрения ДА в деятельность СВА стоит отметить опыт Банка России, применяющего в течение последних 5 лет ДА для проверки своих подразделений в регионах<sup>11</sup>. В зарубежной практике наибольшего внимания заслуживает опыт немецкого предприятия по производству автомобилей, обладающего обширной дилерской сетью по всему миру. Предприятие в течение последних 10 лет периодически проводит дистанционные аудиторские проверки для контроля за соблюдением нормативных требований и осуществлением складских операций в политически нестабильных и опасных регионах [15]. Применение метода сравнительного анализа позволило систематизировать и определить последовательность внедрения ДА в деятельность СВА.

Системный метод, использованный в исследовании, дал возможность сформировать общее видение процесса введения ДА, провести анализ современных условий, влияющих на его внедрение, и на этой основе сформировать факторы, влияющие на его введение; определить принципы применения ДА и последовательность его внедрения в деятельность СВА крупных строительных предприятий. Это дало возможность представить концепцию внедрения ДА в виде взаимосвязанных элементов с применением цикла PDCA, направленного на постоянное улучшение процессов внедрения ДА в деятельность СВА строительных предприятий.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представим основные результаты, полученные в процессе исследования собранного материала с использованием рассмотренных методов, позволивших сформировать концепцию формирования ДА на круп-

ных строительных предприятиях и решить поставленные задачи.

Для решения задачи выявления факторов, влияющих на введение ДА, использовалась консолидированная информация выполненного анализа открытых источников в сфере ДА и результатов сравнительного анализа условий проведения ДА, представленных в практике различных стран, сравнительная характеристика которых показала разнообразие подходов к осуществлению ДА предприятиями различных сфер деятельности.

На основе анализа выявленных условий было определено факторное пространство внедрения ДА крупными строительными предприятиями, имеющими филиальную сеть. В основу классификации факторов, влияющих на введение ДА, положены признаки, отражающие характер влияния условий на внедрение ДА (условия, ограничивающие, способствующие его внедрению). Предлагаемая классификация факторов, влияющих на внедрение ДА, включает ограничительные факторы и факторы положительного воздействия. Признаком выделения в группу ограничительных факторов внедрения ДА является наличие барьеров для полномасштабного введения ДА и дальнейшего его проведения на постоянной основе. К данной группе факторов отнесены такие факторы, как наличие «ручных операций» (операций, отражающихся на бумажных носителях); необходимость доработки информационных систем, предназначенных для хранения, поиска и обработки информации; неполная информация в автоматизированных системах; несовместимость форматов данных.

Признаком выделения в группу факторов положительного воздействия является наличие преимуществ от внедрения ДА. К данной группе факторов отнесены такие факторы, как переход от ретроспективного анализа к непрерывному мониторингу; увеличение количества проверяемых с помощью ДА дочерних предприятий; повышение эффективности аудита за счет акцента на анализе данных и использовании ИТ-инструментов; развитие технических и аналитических компетенций и навыков сотрудников СВА путем применения ДА; повышение качества отчетных материалов за возможности получения данных напрямую из систем объекта аудита и проведения их углубленного анализа с использованием ДА; снижение издержек СВА на осуществление внутреннего аудита; снижение нагрузки на объекты аудита при проведении внутреннего аудита с использованием ДА.

Особенности внедрения ДА на крупных строительных предприятиях, обусловленные наличием большого количества филиалов в различных регионах РФ и спецификой их деятельности, и значительное количество влияющих на его внедрение факторов обусловили необходимость формирования концепции внедрения ДА в деятельность СВА. В основу решения данной задачи положены принципы использования ДА:

<sup>11</sup> План работы. Банк России. URL: <https://cbr.ru/today/audit/ekspertnyy-sovet-po-regulirovaniyu-metodologii-vnutrennego-audita-vnutrennego-kontrolya-i-upravleniya-riskami-v-banke-rossii-i-finansovykh-organizatsiyakh/plan-raboty/>

• критичности; предполагающего применение подхода к решению задач внутреннего аудита с помощью информационно-коммуникационных технологий там, где это критично, т.е. в первую очередь в отношении тех областей, которые невозможно проанализировать с нужной глубиной и качеством, используя традиционные подходы;

• целесообразности; основывающегося на том, что решение о применении ДА должно приниматься исходя из соотношения необходимых затрат на его внедрение и выгод, ожидаемых от его применения, наличия технической возможности применения ДА, качества данных и необходимости получения дополнительной информации о рассматриваемой области;

• ориентированности на риски; позволяющего получить на основе применения ДА более высокий уровень уверенности в отношении анализируемых данных и применяемого при рассмотрении областей повышенного риска;

• масштабируемости; предполагающего повторное применение ДА, т.е. многократное использование автоматизированных аудиторских процедур для внутреннего аудита;

• концентрации на анализе данных; предполагающего работу с массивами данных и применения к ним автоматизированных средств вне зависимости от физической удаленности от объекта аудита.

Решение задачи по формированию этапов внедрения ДА в деятельность СВА основывалось на анализе процесса введения ДА ведущими российскими и зарубежными организациями различных видов деятельности путем выделения ключевых этапов внедрения ДА в деятельность их СВА и консолидации полученной информации. Таким образом, были определены следующие этапы: выстраивание бизнес-процессов; классификация данных, необходимых для внутреннего аудита; определение источников данных (ИТ-систем); разработка методологии проведения аудита; создание ИТ-инструментов; обучение и развитие сотрудников; оптимизация методов ДА.

Первостепенной задачей процесса внедрения ДА в деятельность СВА является выстраивание бизнес-процессов проверяемого филиала. Далее требуется классификация данных, необходимых для внутреннего аудита на основе формирования «Витрины данных», т.е. систематизации перечня аудиторских процедур (обследование, наблюдение, расчеты и измерения, запрос и подтверждение, ин-

тервьюирование, ревизия, инвентаризация и др.) с указанием используемых по ним данных (табл. 3).

На основании «Витрины данных» утверждается «Классификатор данных внутреннего аудита» для проверяемого филиала, структурированный в разрезе бизнес-процессов и перечня данных с присвоением каждому виду информации уникального номера. Впоследствии определяются источники, из которых будут получены сведения для проведения аудита, и на этой основе осуществляется разработка методологии проведения аудиторской проверки для проверяемого филиала, предусматривающая выбор аудитором методов организации аудита, методов получения аудиторских доказательств, а также методов дистанционного аудита и информационно-коммуникационных технологий. После этого создаются ИТ-инструменты, упрощающие поиск, сбор, хранение, обработку и распространение различных сведений, обучаются сотрудники новым цифровым навыкам. На заключительном этапе происходит оптимизация методов дистанционного аудита.

Последовательное решение поставленных в исследовании задач способствовало разработке концепции по внедрению ДА в деятельность СВА крупных строительных предприятий с филиальной сетью, в основу которой положена модель plan-do-check-act (PDCA), циклический характер которой способствует постоянному улучшению процессов по внедрению ДА. На этапе планирования разрабатывается проект концепции введения ДА в деятельность СВА, затем происходит ее апробация, по результатам которой вносятся корректировки в план действий по реализации концепции (рис. 3).

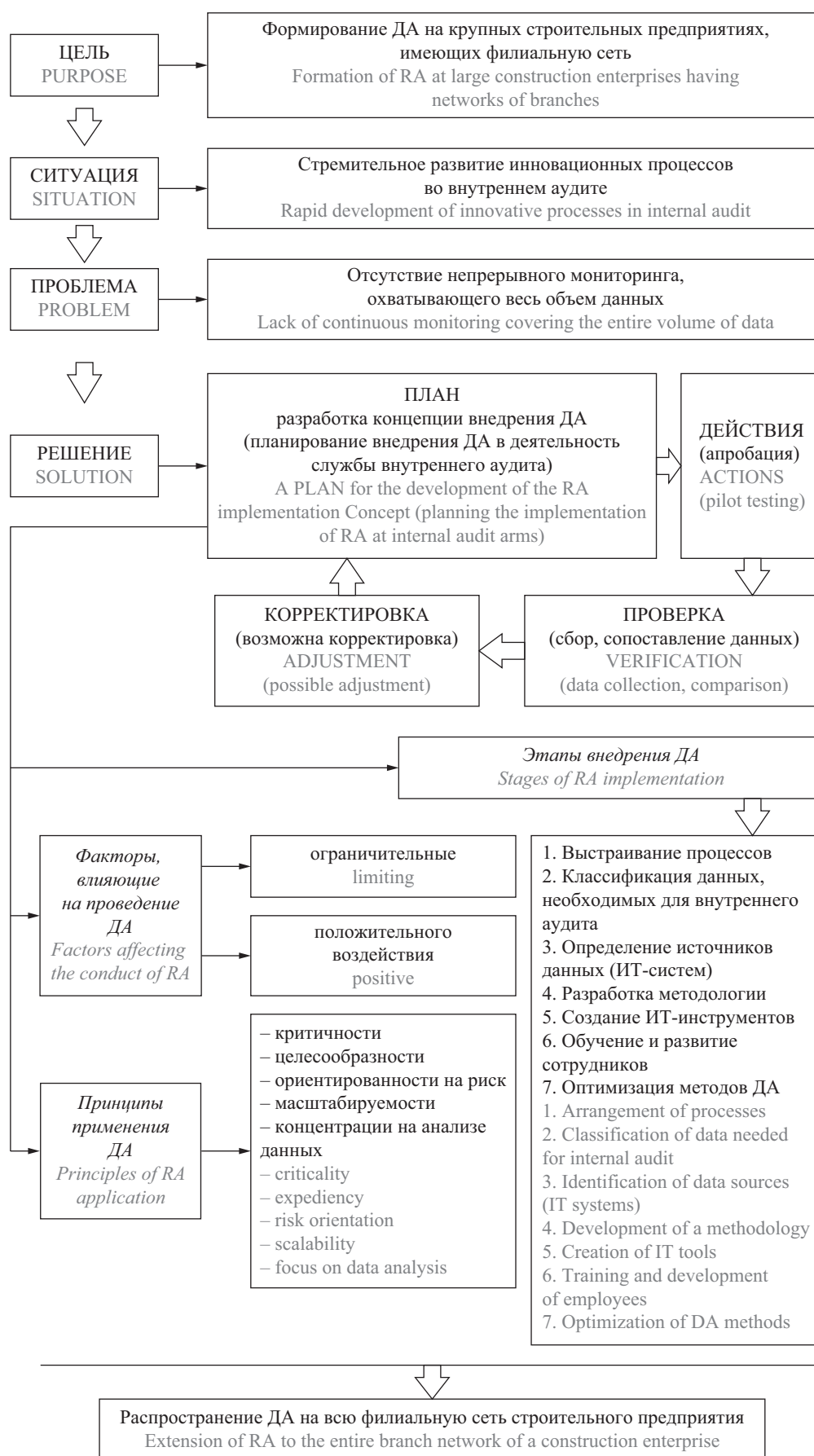
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе анализа предметной области исследования выявлены и решены научно-практические задачи, обеспечивающие разработку концепции внедрения ДА в деятельность СВА крупных строительных предприятий с филиальной сетью. Полученные результаты достигнуты за счет применения комплекса методов исследования, основывающихся на материалах значимых изданий в сфере дистанционного аудита; информации, представленной на официальных сайтах Института внутренних аудиторов, Международной организации по стандартизации (ISO).

Табл. 3. «Витрина данных» строительного предприятия

Table 3. "Data showcase" of a construction company

| Перечень аудиторских процедур:<br>List of audit procedures:                                                                                                                           |                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| по которым в настоящее время отсутствуют данные в автоматизированных системах объектов аудита<br>for which there is currently no data in the automated systems of the audited objects | которые по предварительным данным могут проводиться дистанционно<br>which, according to preliminary data, can be conducted remotely | которые не могут проводиться дистанционно (ревизия, интервьюирование, инвентаризация)<br>which cannot be conducted remotely (inspection, interviewing, inventory) |



**Рис. 3.** Концепция внедрения ДА в деятельность СВА строительного предприятия с филиальной сетью

**Fig. 3.** The concept of introducing DA into the activities of a construction company having a network of branches

Первым вопросом, решенным в настоящей работе, стало уточнение понятия «дистанционный аудит». Была выявлена общая проблематика — отсутствие единого подхода к его определению, обусловленная различными целями его применения. Предлагаемая трактовка позволила конкретизировать «дистанционный аудит», обобщив имеющиеся формулировки с учетом целей его применения для внедрения ДА, что дало возможность реализовать следующие задачи. Для объективного описания факторного пространства внедрения дистанционного аудита рассмотрены различные подходы к формированию условий, влияющих на внедрение ДА.

Важнейшим результатом исследования стали сформированные этапы внедрения ДА, которые были положены в основу разработки концепции внедрения ДА. Предлагаемые этапы учитывают накопленный практический опыт введения ДА ведущими российскими и зарубежными организациями различных видов деятельности и актуальные теоретические разработки, представленные в научных работах, которые позволили сформировать логическую последовательность его внедрения.

Представленная концепция внедрения ДА в деятельность СВА строительных предприятий направлена на постоянное улучшение процессов по вне-

рению ДА в филиальную сеть строительного предприятия и может выступать в качестве методического инструментария при его введении в практическую деятельность.

Внедрение ДА в СВА крупных строительных предприятий, имеющих филиальную сеть, будет способствовать формированию новой корпоративной культуры внутреннего аудита на строительном предприятии, системному применению риск-ориентированного подхода на всех этапах жизненного цикла внутреннего аудита, в рамках которого будут использоваться все доступные информационные ресурсы строительного предприятия; развитию внутреннего аудита как универсального аналитического центра строительного предприятия; формированию эффективной системы непрерывного аудита на строительном предприятии.

Дальнейшие исследования обусловлены необходимостью разработки методики оценки целевых показателей эффективности реализации концепции внедрения ДА в деятельность СВА; дорожных карт распространения ДА на другие направления деятельности строительного предприятия; методического обеспечения с учетом приоритетных направлений внедрения ДА.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Азовцева К., Горлов А. Внутренний аудит во времена неопределенности // Внутренний аудитор. 2022. № 1 (17). С. 28–33.
2. Хаценко А.Н., Машенцева Г.А., Предеус Н.В. Методический подход к проведению дистанционного аудита системы менеджмента качества (СМК) организации // Московский экономический журнал. 2021. № 4. DOI: 10.24411/2413-046X-2021-10198
3. Изварина Н.Ю., Реутова Р.О., Бондарев Р.А., Зубарев С.С. Особенности дистанционного аудита систем менеджмента качества в современных условиях // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. № 10–1 (80). С. 146–149. DOI: 10.24412/2411-0450-2021-10-1-146-149
4. Baatwah S.R., Al-Ansi A.A. Dataset for understanding the effort and performance of external auditors during the COVID-19 crisis: A remote audit analysis // Data in Brief. 2022. Vol. 42. P. 108119. DOI: 10.1016/j.dib.2022.108119
5. Nguyen L., Vu L., Yin X. The undesirable effect of audit quality: Evidence from firm innovation // The British Accounting Review. 2020. Vol. 52. Issue 6. P. 100938. DOI: 10.1016/j.bar.2020.100938
6. Castka P., Searcy C. Audits and COVID-19: A paradigm shift in the making // Business Horizons. 2021. DOI: 10.1016/j.bushor.2021.11.003
7. Frishammar J., Richtnér A., Brattström A., Magnusson M., Björk J. Opportunities and challenges in the new innovation landscape: Implications for innovation auditing and innovation management // European Management Journal. 2019. Vol. 37. Issue 2. Pp. 151–164. DOI: 10.1016/j.emj.2018.05.002
8. Gross A., Hoelscher J., Reed B.J., Sierra G.E. The new nuts and bolts of auditing: Technological innovation in inventorying inventory // Journal of Accounting Education. 2020. Vol. 52. P. 100679. DOI: 10.1016/j.jaccedu.2020.100679
9. Slapničar S., Vuko T., Čular M., Drašček M. Effectiveness of cybersecurity audit // International Journal of Accounting Information Systems. 2022. Vol. 44. P. 100548. DOI: 10.1016/j.accinf.2021.100548
10. Ghoubach I.E., Abbou R.B., Mrabti F. A secure and efficient remote data auditing scheme for cloud storage // Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences. 2021. Vol. 33. Issue 5. Pp. 593–599. DOI: 10.1016/j.jksuci.2019.02.011
11. Fan K., Bao Z., Liu M., Vasilakos A.V., Shi W. Dredas: Decentralized, reliable and efficient remote outsourced data auditing scheme with blockchain smart contract for industrial IoT // Future Generation Computer Systems. 2020. Vol. 110. Pp. 665–674. DOI: 10.1016/j.future.2019.10.014

12. Li J., Wu J., Jiang G., Srikanthan T. Blockchain-based public auditing for big data in cloud storage // *Information Processing & Management*. 2020. Vol. 57. Issue 6. P. 102382. DOI: 10.1016/j.ipm.2020.102382
13. Kalluri R.K., Guru C.V. An effective analytics of third party auditing and Trust architectures for integrity in cloud environment // *Materials Today: Proceedings*. 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.312
14. Han H., Fei S., Yan Z., Zhou X. A survey on blockchain-based integrity auditing for cloud data // *Digital Communications and Networks*. 2022. DOI: 10.1016/j.dcan.2022.04.036
15. Рой Литценбергер, СРЕА, Кэрри Ф. Рамирес, СИА, CHMM, CDG. Дистанционный аудит в период пандемии COVID-19 и в дальнейшей перспективе. URL: <https://www.iaa-ru.ru/news/opublikovann-perevod-brifa-distsionnyy-audit-v-period-pandemii-covid-19-i-v-dalneyshey-perspektive/?ysclid=14cwa655971030590>
16. Зверев Е. Дистанционный аудит: как удостовериться в надежности количественной информации? // *МСФО и МСА в кредитной организации*. 2018. № 1 (67).
17. Дзедик В.А., Загорюлько Ю.В., Владимирцев А.В., Рязанова Е.Е. Удаленные аудиты систем менеджмента: перспективы, риски, преимущества // *Стандарты и качество*. 2020. № 9. С. 60–63.
18. Бровкина Н.Д. Дистанционный аудит: инновации коммуникаций // *Аудит и финансовый анализ*. 2014. № 6. С. 434–437.
19. Варламова Д.В., Филатова В.Б., Абдураимова Н.О. Модернизация процесса аудита посредством информационно-коммуникационных технологий // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2020. № 7–1. С. 47–53. DOI: 10.17513/vaael.1206
20. Тельман Е. Дистанционный внутренний аудит. URL: <https://www.iaa-ru.ru/news/opublikovann-perevod-brifa-distsionnyy-audit-v-period-pandemii-covid-19-i-v-dalneyshey-perspektive/>

Поступила в редакцию 4 июня 2022 г.

Принята в доработанном виде 19 июня 2022 г.

Одобрена для публикации 19 июня 2022 г.

О Б АВТОРЕ: **Наталья Николаевна Щепкина** — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1017109, Scopus: 5720830587, ResearcherID: ABI-3123-2020, ORCID: 0000-0002-3250-6212; [natasha.chepkina@mail.ru](mailto:natasha.chepkina@mail.ru).

## REFERENCES

1. Azovtseva K., Gorlov A. Internal audit in times of uncertainty. *Internal Auditor*. 2022; 1(17):28-33. (rus.).
2. Khatsenko A.N., Mashentseva G.A., Predeus N.V. Methodological approach to conducting a remote audit of the quality management system (QMS) of an organization. *Moscow Economic Journal*. 2021; 4. DOI: 10.24411/2413-046X-2021-10198 (rus.).
3. Izvarina N.Yu., Reutova R.O., Bondarev R.A., Zubarev S.S. Features of remote audit of quality management systems in modern conditions. *Economics and Business: Theory and Practice*. 2021; 10-1(80):146-149. DOI: 10.24412/2411-0450-2021-10-1-146-149 (rus.).
4. Baatwah S.R., Al-Ansi A.A. Dataset for understanding the effort and performance of external auditors during the COVID-19 crisis: A remote audit analysis. *Data in Brief*. 2022; 42:108119. DOI: 10.1016/j.dib.2022.108119
5. Nguyen L., Vu L., Yin X. The undesirable effect of audit quality: Evidence from firm innovation. *The British Accounting Review*. 2020; 52(6):100938. DOI: 10.1016/j.bar.2020.100938
6. Castka P., Searcy C. Audits and COVID-19: A paradigm shift in the making. *Business Horizons*. 2021. DOI: 10.1016/j.bushor.2021.11.003
7. Frishammar J., Richtnér A., Brattström A., Magnusson M., Björk J. Opportunities and challenges in the new innovation landscape: Implications for innovation auditing and innovation management. *European Management Journal*. 2019; 37(2):151-164. DOI: 10.1016/j.emj.2018.05.002
8. Gross A., Hoelscher J., Reed B.J., Sierra G.E. The new nuts and bolts of auditing: Technological innovation in inventorying inventory. *Journal of Accounting Education*. 2020; 52:100679. DOI: 10.1016/j.jaccedu.2020.100679
9. Slapničar S., Vuko T., Čular M., Drašček M. Effectiveness of cybersecurity audit. *International Journal of Accounting Information Systems*. 2022; 44:100548. DOI: 10.1016/j.accinf.2021.100548
10. Ghoubach I.E., Abbou R.B., Mrabti F. A secure and efficient remote data auditing scheme for cloud storage. *Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences*. 2021; 33(5):593-599. DOI: 10.1016/j.jksuci.2019.02.011

11. Fan K., Bao Z., Liu M., Vasilakos A.V., Shi W. Dredas: Decentralized, reliable and efficient remote outsourced data auditing scheme with blockchain smart contract for industrial IoT. *Future Generation Computer Systems*. 2020; 110:665-674. DOI: 10.1016/j.future.2019.10.014
12. Li J., Wu J., Jiang G., Srikanthan T. Blockchain-based public auditing for big data in cloud storage. *Information Processing & Management*. 2020; 57(6):102382. DOI: 10.1016/j.ipm.2020.102382
13. Kalluri R.K., Guru C.V. An effective analytics of third party auditing and Trust architectures for integrity in cloud environment. *Materials Today: Proceedings*. 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.312
14. Han H., Fei S., Yan Z., Zhou X. A survey on blockchain-based integrity auditing for cloud data. *Digital Communications and Networks*. 2022. DOI: 10.1016/j.dcan.2022.04.036
15. Roy Litzenberger, CPEA, Carrie F. Ramirez, CIA, CHMM, CDG. Remote audit during the COVID-19 pandemic and in the future. URL: <https://www.iaa-ru.ru/news/opublikovan-perevod-brifa-distantionnyy-audit-v-period-pandemii-covid-19-i-v-dalneyshey-perspektive/?ysclid=14cwatg655971030590>
16. Zverev E. Remote audit: how to verify the reliability of quantitative information? *IFRS and ISAs in a credit institution*. 2018; 1(67). (rus.).
17. Dzedik V., Zagorulko Y., Vladimirtsev A., Ryazanova E. Remote audits of management systems: prospects, risks, advantages. *Standards and Quality*. 2020; 9:60-63. (rus.).
18. Brovkina N.D. Remote audit: innovations of communications. *Audit and Financial Analysis*. 2014; 6:434-437. (rus.).
19. Varlamova D.V., Filatova V.B., Abduraimova N.O. Modernization of the audit process by information-communication technologies. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2020; 7-1:47-53. DOI: 10.17513/vaael.1206 (rus.).
20. Telman E. Remote internal audit. URL: <https://www.iaa-ru.ru/news/opublikovan-perevod-brifa-distantionnyy-audit-v-period-pandemii-covid-19-i-v-dalneyshey-perspektive/>

Received June 4, 2022.

Adopted in revised form on June 19, 2022.

Approved for publication on June 19, 2022.

**B I O N O T E S :** **Natalia N. Shchepkina** — PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1017109, Scopus: 5720830587, ResearcherID: ABI-3123-2020, ORCID: 0000-0002-3250-6212; [natasha.chepkina@mail.ru](mailto:natasha.chepkina@mail.ru).

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.242

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.803-812

## Механизм ГЧП при реализации инновационных проектов строительства и реконструкции объектов федерального имущественного комплекса

Татьяна Сергеевна Мещерякова<sup>1</sup>, Елена Сергеевна Зуева<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Главное производственно-коммерческое управление по обслуживанию дипломатического корпуса при Министерстве иностранных дел Российской Федерации (ГлавУнДК); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Актуальность темы исследования обусловлена ограничениями в финансовых возможностях полной и частичной реновации федерального имущественного фонда, находящегося в оперативном управлении подведомственных учреждений органов исполнительной власти. Проблематика применения механизма государственно-частного партнерства (ГЧП) при реализации подобных проектов связана с узкой направленностью практики его использования. Цель исследования — системное представление организационно-экономического механизма реализации ГЧП при реконструкции и строительстве объектов недвижимости федерального имущественного фонда. Задачи исследования — провести анализ теоретических и методических аспектов реализации ГЧП, рынка ГЧП; предложить схему реализации ГЧП при реконструкции и строительстве объектов недвижимости федерального имущественного фонда с учетом инновационных технологий в строительстве.

**Материалы и методы.** Используются материалы российских и международных организаций: официальные издания Национального центра ГЧП (аналитические обзоры по данным платформы «Росинфра»), инвестиционно-аналитической компании InfraOne Research, Национальной ассоциации инфраструктурных компаний (НАИК), публикации Всемирного банка, научные публикации по предметной области исследования. Применяются традиционные общенаучные методы синтеза, индукции, дедукции, аналогии.

**Результаты.** Основными результатами являются консолидированная теоретико-методологическая база реализации ГЧП, а также предлагаемая схема реализации ГЧП при реконструкции и строительстве объектов федерального имущественного фонда. Практическая значимость итогов исследования состоит в том, что они могут быть использованы при выработке рекомендаций для органов власти по организации проектов реконструкции, полной или частичной реновации федерального имущественного комплекса с применением ГЧП.

**Выводы.** Проведенный анализ эффективности управления федеральным имуществом показал необходимость механизма ГЧП. Данный механизм имеет накопленный опыт практической реализации для инфраструктурных проектов. Однако, несмотря на имеющийся потенциал реализации в рамках предметной области исследования, отмечены ограничения, препятствующие его активному применению. Приведен детальный анализ предлагаемого механизма ГЧП и схемы его реализации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ГЧП, инновации, реновация, реконструкция, реставрация, ремонтно-восстановительные работы, инвестиционно-строительный проект, федеральный имущественный фонд, инвестиционный механизм

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Мещерякова Т.С., Зуева Е.С. Механизм ГЧП при реализации инновационных проектов строительства и реконструкции объектов федерального имущественного комплекса // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 803–812. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.803-812

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Сергеевна Мещерякова, MeshcheryakovaTS@mgsu.ru.

## The mechanism of public — private partnerships for the implementation of innovative projects entailing the construction and reconstruction of items of federal property

Tatyana S. Meshcheryakova<sup>1</sup>, Elena S. Zueva<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Main Administration for Service to the Diplomatic Corps (GlavUpDK); Moscow; Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The relevance of the research stems from the limited financial capabilities available for complete or partial renovation of the federal property fund, which is in the operating management of subordinate institutions of executive

authorities. The problem of applying the mechanism of public-private partnerships (PPPs) to such projects is associated with a narrow focus of the practice of its application. The purpose of the study is the systematic presentation of the organizational and economic PPP mechanism applied to the reconstruction and construction of real estate facilities comprising the federal property fund. The objectives of the research are to analyze the theoretical and methodological aspects of implementation of PPPs, present the analysis of the PPP market, propose a PPP implementation pattern for the reconstruction and construction of real estate facilities comprising the federal property fund, taking into account the use of innovative technologies in the construction sector.

**Materials and methods.** The authors take advantage of the materials provided by the Russian and international organizations, such as the official publications of the National PPP Centre (analytical reviews published on the Rosinfra website), investment and analytical company InfraOne Research, National Association of Infrastructure Companies (NAIK), World Bank reports, and research publications. Traditional methods of synthesis, induction, deduction, and analogy were used in the course of research.

**Conclusions.** The analysis of effectiveness of federal property management has proven the need to use the PPP mechanism. This mechanism has accumulated the experience of practical implementation of infrastructure projects. However, despite the existing implementation potential of the subject area, some limitations prevent its widespread use. The paper provides a detailed analysis of the proposed PPP mechanism and the pattern for its implementation.

**KEYWORDS:** PPP, innovations, renovation, reconstruction, restoration, repair and restoration works, investment and construction project, federal property fund, investment mechanism.

**FOR CITATION:** Meshcheryakova T.S., Zueva E.S. The mechanism of public — private partnerships for the implementation of innovative projects entailing the construction and reconstruction of items of federal property. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):803-812. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.803-812 (rus.).

Corresponding author: Tatyana S. Meshcheryakova, MeshcheryakovaTS@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на достаточную степень операционной эффективности преобладающего количества коммерческих организаций, находящихся в ведомстве органов государственной власти, проблемы финансового обеспечения капиталоемких проектов строительства и реконструкции федерального имущества в настоящее время приобретают все большую значимость. Отдельным вопросом, который также рассматривается в качестве приоритетного направления развития инвестиционных механизмов, является проведение восстановительных работ с помощью инновационных технологий на объектах, составляющих культурно-историческую ценность.

Выполнен анализ нормативно-правовой базы, практики и перспектив применения механизма государственно-частного партнерства (ГЧП) с приложением к объектам федерального имущества комплекса, требующим работ по реконструкции, частичной или полной реновации.

В 2020 г. совокупная стоимость сделок по ГЧП, которые дошли до финансового закрытия в ЕС, составила 7,9 млрд евро, что на 27 % меньше, чем в 2019 г. (10,8 млрд евро).

Количество транзакций ГЧП, достигших финансового закрытия, немного снизилось до 34, по сравнению с 38 в 2019 г. Это самое низкое количество транзакций с 1997 г.

Средний размер сделки уменьшился до 231 млн евро (284 млн евро в 2019 г.).

Шесть крупных сделок закрыты в 2020 г. Их совокупная стоимость — 5,1 млрд евро, это 65 % от общей рыночной стоимости (по сравнению с 55 % в 2019 г.).

Основные сделки по ГЧП в странах ЕС, достигших финансового закрытия в 2020 г.:

- расширение дороги A3 (1,5 млрд евро) в Германии;
- автомагистраль A49 Кассель — Швальм (1 млрд евро) в Германии;
- концессия аэропорта Софии (881 млн евро) в Болгарии;
- A465 Dualing Section 5 & 6 (716 млн евро) в Соединенном Королевстве;
- маршрут Centre — Europe Atlantique (548 млн евро) во Франции;
- ГЧП широкополосного доступа Loiret FTTH (500 млн евро) во Франции<sup>1</sup>.

Механизм ГЧП в РФ набирает популярность ввиду все больших бюджетных ограничений.

В 2021 г. было объявлено на 33 % больше концессионных и ГЧП конкурсов, чем в 2020 г. Общий объем инвестиций, который планировалось оформить контрактами ГЧП в случае успешного прохождения данных процедур, составляет более 447,9 млрд руб., что почти в 4 раза больше, чем годом ранее. Однако крупных и средних проектов ГЧП, прошедших коммерческое закрытие, т.е. по которым были в итоге подписаны соглашения о ГЧП/МЧП (муниципально-частное партнерство) или концессионные соглашения, в 2021 г. на 22,7 % меньше, чем в 2020 г. (102 против 132). Можно констатировать, что в количественных показателях рынок ГЧП в России продолжает стагнироваться. При этом увеличивается общий объем привлекаемых в проекты ГЧП инвестиций и, как следствие, средний объем

<sup>1</sup> Market Update Review of the European PPP Market in 2020. URL: [https://www.eib.org/attachments/epec/epec\\_market\\_update\\_2020\\_en.pdf](https://www.eib.org/attachments/epec/epec_market_update_2020_en.pdf)

инвестиций, приходящийся на один проект ГЧП. Так, в 2020 г. общий объем инвестиций по схеме ГЧП составил 363,9 млрд руб., из них частных — 211,3 млрд руб., а в 2021 г. общий объем «заказанных» инвестиций — более 414,8 млрд руб., из них частных — не менее 344,1 млрд руб.<sup>2</sup>

Таким образом, можно сделать вывод что рынок проектов ГЧП постепенно восстанавливается после первых волн пандемии, особенно стабильный рост наблюдается в социальной сфере и городской инфраструктуре, в первую очередь, благодаря появлению специальных механизмов поддержки, предусмотренных государственными программами (в сфере образования и спорта, «дальневосточной концессии», «инфраструктурных кредитов» и др.), а также усилению роли институтов развития в поддержке «городских» ГЧП проектов («инфраструктурные облигации» ДОМ.РФ, льготное заемное финансирование Фонда реформирования ЖКХ, программный подход ВЭБ.РФ к развитию инфраструктуры в городах и др.)<sup>3</sup>.

Как отмечают эксперты, в ближайшие годы на рынке могут появиться новые схемы реализации проектов соглашений ГЧП. При этом в большинстве случаев в новых крупномасштабных проектах ГЧП смогут участвовать только опытные участники рынка.

В процессе проведения работ по строительству, реконструкции и реставрации объектов федерального имущественного комплекса возникают проблемы как технического, так и экономического порядка. Именно в отношении последних рассматривается предметная область исследования.

Важным перспективным инструментом реализации указанных проектов может стать механизм ГЧП.

В общем смысле под ГЧП можно понимать механизм взаимодействия бизнеса и органов власти.

В РФ законодательство о ГЧП на федеральном уровне представлено Федеральным законом от 13.07.2015 № 224-ФЗ «О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»; Федеральным законом от 21.07.2005 № 115-ФЗ «О концессионных соглашениях».

Как показывает проведенный анализ публичных данных экспертных организаций и аналитических агентств, зачастую под объектом ГЧП подразумевают инфраструктурные объекты, что было отмечено ранее. При этом накопленный опыт реализации и нор-

мативно-правовая база позволяют данный механизм рассматривать для различных объектов инвестиционных контрактов, в том числе объектов федерального имущественного комплекса.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованы материалы российских и международных организаций, основанные на данных органов власти и статистики. Приведенные сведения позволяют сделать аргументированные выводы по исследованию и сформировать его гипотезу, заключающуюся в возможности применения механизма ГЧП при реконструкции, частичной или полной реновации объектов федерального имущественного комплекса.

Анализ профилей различных стран по реализации ГЧП, представленный в национальных профилях Правового ресурсного центра ГЧП (PPPLRC), демонстрирует преимущественно инфраструктурное приложение данного механизма<sup>4</sup>. В то же время законодательные акты, регламентирующие ГЧП, не ограничивают сферу применения механизма, что дает возможность рассматривать его в контексте объекта исследования.

Приведем теоретико-методологическую информацию, составляющую концептуальную основу исследования.

Причины для инициирования проектов по схеме ГЧП могут различаться у разных органов власти государственного сектора и субъектов РФ. Тем не менее имеется единый социальный и политический контекст, в котором сопровождается инициирование и выполнение конкретных проектов ГЧП. Контекст определяет основные цели вовлеченных сторон и, следовательно, предпринимаемые действия. Это особенно актуально для субъектов государственного сектора. На макроуровне существует несколько причин, по которым могут быть инициированы ГЧП. Примерами таких проектов являются: государственная политика и управление (Rosenau, 2000; Министерство финансов Великобритании, 2000; DTF, 2001); влияние на структуру финансового контроля государственного сектора и контроль над расходами (Broadbent and Laughlin, 2002; Spackman, 2002); устойчивое развитие в ассоциациях организаций и регионах (Kerr, 1998). Описания договоренностей, которые соответствуют общепринятому определению ГЧП, можно проследить более чем две тысячи лет назад (Polybius, 1979). Однако в наибольшей степени находит отражение данный механизм именно в настоящее время.

Изучая содержательную характеристику ГЧП, отметим, что основное его отличие от государственного заказа — обязательное финансирование создания объекта частным партнером/концессионером,

<sup>2</sup> Основные тренды и статистика рынка ГЧП по итогам 2021 года. Аналитический обзор. URL: <https://pppcenter.ru/upload/iblock/5b4/5b4d97fb08864dd525b2923a2b14b415.pdf>

<sup>3</sup> Инициирование проектов государственно-частного партнерства в Приморском крае. URL: <https://invest.primorsky.ru/uploads/attachments/rekomendatsii-1.5e21585dc786f.pdf>

<sup>4</sup> Национальный Центр ГЧП. URL: <https://pppcenter.ru/>

при этом публичный партнер/концедент вправе компенсировать часть затрат, понесенных на создание объекта соглашения, а также осуществлять полное или частичное финансирование затрат, связанных с эксплуатацией и/или техническим обслуживанием объекта соглашения [1–3].

К формам реализации проектов с государственным или муниципальным участием относятся:

1. По нормативному признаку:
  - концессионное соглашение<sup>5</sup>;
  - соглашение о ГЧП, МЧП<sup>6</sup>.
2. Иные договорные формы привлечения внебюджетных средств в развитие общественной инфраструктуры:
  - контракт жизненного цикла<sup>7</sup>;
  - договор аренды государственного имущества с инвестиционными обязательствами арендатора<sup>8,9</sup>;
  - долгосрочный договор на поставку товаров, работ, услуг с инвестиционными обязательствами исполнителя<sup>10</sup>.
3. Корпоративные формы привлечения внебюджетных средств в развитие общественной инфраструктуры:
  - создание специальной проектной компании (СПК) с государственным и частным капиталом для создания и управления объектами общественной инфраструктуры<sup>11</sup> [1–5].

В контексте объекта исследования — федерального имущественного комплекса, находящегося в хозяйственном ведении подведомственной организации, представляется возможность применения механизма ГЧП (форма 1.2), где одной из сторон (публичным партнером) соглашения выступает Росимущество, осуществляющее управление федеральным имуществом.

<sup>5</sup> О концессионных соглашениях : Федеральный закон от 21.07.2005 № 115-ФЗ.

<sup>6</sup> О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 13.07.2015 № 224-ФЗ.

<sup>7</sup> О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд : Федеральный закон от 05.04.2013 № 44-ФЗ.

<sup>8</sup> Гражданский кодекс Российской Федерации (ГК РФ).

<sup>9</sup> О защите конкуренции : Федеральный закон от 26.07.2006 № 135-ФЗ.

<sup>10</sup> О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц : Федеральный закон от 18.07.2011 № 223-ФЗ.

<sup>11</sup> Бюджетный кодекс Российской Федерации от 31.07.1998 № 145-ФЗ (ред. от 28.05.2022), ст. 80. Предоставление бюджетных инвестиций юридическим лицам, не являющимся государственными или муниципальными учреждениями и государственными или муниципальными унитарными предприятиями.

Варианты схем ГЧП имеют преимущества и ограничения по отношению друг к другу в плане закупок в государственном секторе. При принятии и реализации ГЧП правительством и привлечении частного партнера необходимо учитывать интересы ключевых заинтересованных сторон, т.е. правительства, частного сектора и заказчика/пользователя. Приведем общепринятые формы ГЧП, реализуемые в международной практике (в общих схемах ГЧП их насчитывается не менее восьми вариаций).

1. Строительство, эксплуатация, передача (BOT): правительство передает строительство и эксплуатацию частной стороне на определенное количество лет (часто несколько десятилетий или более). По истечении этого срока объект передается правительству.

2. Строительство, владение, эксплуатация, передача (BOOT): аналог BOT, но частная сторона получает не только в управление, но и закрепляет за собой право собственности на установленный срок. BOOT «обратный» предполагает, что государство финансирует и сооружает объект, передает его в доверительное управление частному партнеру, который имеет право на его последующий выкуп.

3. Проектирование-строительство (DB): правительство заключает контракт с частной стороной на проектирование и строительство проекта за определенную плату. Правительство сохраняет за собой право собственности и может либо управлять им самостоятельно, либо передавать операции по контракту.

4. Покупка, строительство, эксплуатация (BBO): правительство продает объект, который эксплуатировался государством, частной стороне. Частная сторона эксплуатирует и при необходимости инвестирует в восстановление или расширение объекта [6–10].

Согласно ФЗ № 224 этапы реализации ГЧП (МЧП) могут быть определены в соответствии с рис. 1<sup>12</sup>.

Согласно законодательству, проект ГЧП (МЧП) может быть инициирован как публичной стороной, так и частным инвестором. В случае, если инициатором проекта выступает публичный партнер, он обеспечивает разработку предложения о реализации проекта и направляет такое предложение на рассмотрение в уполномоченный орган. Указанный орган должен быть предварительно определен на основании распорядительного акта Правительства РФ, высшего исполнительного органа государственной власти субъекта РФ или на основании устава муниципального образования.

Схема запуска ГЧП показана на рис. 2.

<sup>12</sup> Рекомендации по реализации проектов государственно-частного партнерства. Лучшие практики. URL: <https://rosinfra.ru/digest/documents/one/rekomendacii-po-realizacii-proektov-gosudarstvenno-castnogo-partnerstva-lucsie-praktiki>

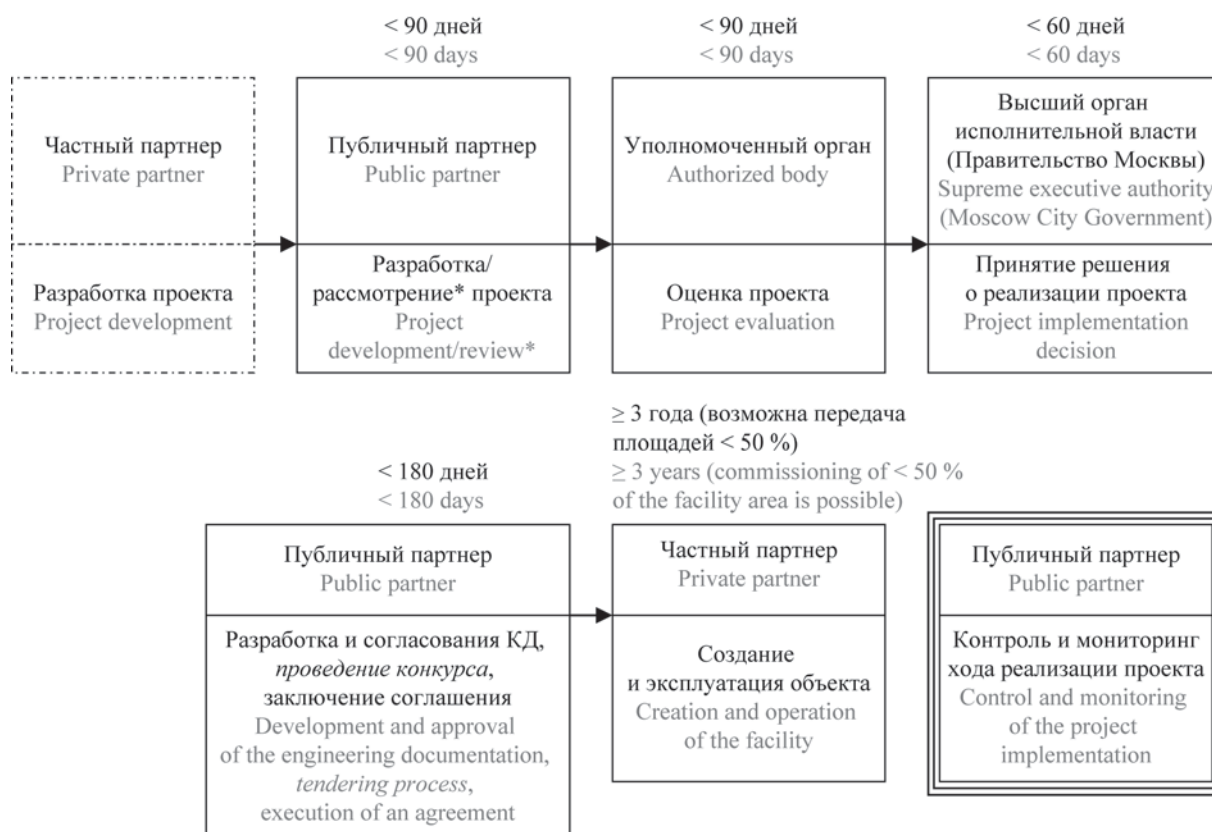


Рис. 1. Этапы реализации ГЧП  
Fig. 1. Stages of PPP implementation

Ключевым регулятором верхнего уровня является уполномоченный орган (Росимущество), который рассматривает проект ГЧП в целях оценки его эффективности и определения его сравнительного преимущества в срок, не превышающий 90 дней со дня поступления такого проекта в случае, если инициация проекта осуществляется частным партнером (инвестором).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

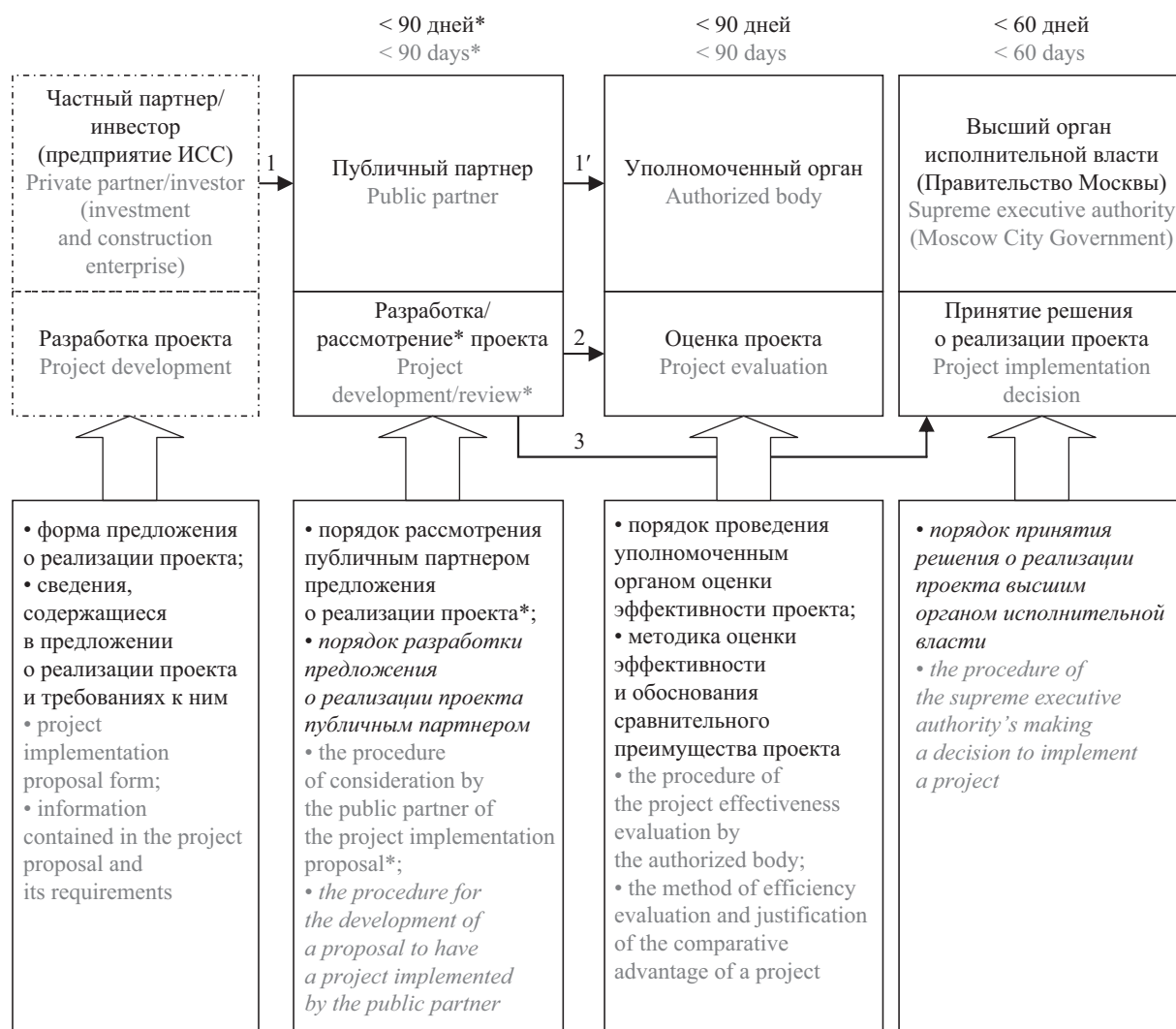
Учет всего жизненного цикла государственных инвестиций помогает оптимизировать и сделать прозрачными общие затраты по сравнению с традиционной ситуацией, когда государственные субъекты сами выполняют вышеуказанные мероприятия. Тем не менее нет универсального способа предсказать с высокой вероятностью ожидаемые выгоды ГЧП, что требует валидации в каждом конкретном случае [11–13].

Правительство субъекта (в данном случае Москвы), например, может иметь первостепенные цели, как в период пандемии или международного санкционного давления, и не в состоянии осуществить капиталоемкий строительный проект, однако частное строительное предприятие может быть заинтересовано в финансировании своего строитель-

ства в обмен на получение операционной прибыли после завершения проекта.

Государственно-частные партнерства обычно заключают контракты на срок от 20 до 30 лет и более. Финансирование частично поступает из частного сектора, но требует платежей от государственного сектора и/или пользователей в течение всего срока реализации проекта. Частный партнер участвует в разработке, завершении, реализации и финансировании проекта, в то время как государственный партнер занимается определением и мониторингом соответствия целям. Риски распределяются между государственными и частными партнерами в процессе переговоров, в идеале, хотя и не всегда, в соответствии со способностью каждого оценивать, контролировать и справляться с ними.

В предлагаемом варианте правительство заключает контракт с компанией или группой компаний (консорциум). После подписания контракта консорциум должен зарегистрировать компанию (SPV) в соответствии с законодательством, регулирующим создание компаний. SPV подписывает контракт с органом, осуществляющим закупки (этот этап также называют «закрытием коммерческой сделки»), а члены консорциума подписывают инвестиционный контракт. При подписании контракта частный партнер



**Примечание:** 1 — предложение о реализации проекта, направленное частным партнерам на рассмотрение публично-му партнеру;

1' — предложение о реализации проекта, разработанное/рассмотренное\* и направленное публичным партнерам на оценку;

2 — заключение об эффективности и сравнительном преимуществе проекта;

3 — проект решения о реализации проекта (ГЧП) и иные материалы

*Курсив* — акты, обязательная разработка которых ФЗ № 224 не предусмотрена

\* — в случае инициирования проекта частным партнером.

*Note:* 1 — the proposal to implement a project is submitted to the public partner for review;

1' — the project implementation proposal is developed/reviewed\* and submitted to the public partners for evaluation;

2 — conclusion on the effectiveness and comparative advantage of the project;

3 — draft decision on project implementation (PPP) and other materials

*In italics* — acts, the mandatory development of which is not stipulated by Federal Law No. 224

\* — in case the project is initiated by a private partner.

**Рис. 2. Схема запуска ГЧП**

**Fig. 2. PPP launch pattern**

принимает на себя следующие обязательства, изложенные в договоре:

- завершение проектирования, строительства или развития объекта инфраструктуры (включая получение всех необходимых разрешений, если это необходимо);
- финансирование работ (полная стоимость или соответствующая часть, если контракт имеет струк-

туру софинансирования с безвозмездным финансированием от правительства);

- эксплуатация и техническое обслуживание объекта (после ввода объекта в эксплуатацию, получение согласований и разрешений).

В большинстве проектов орган, производящий закупки, санкционирует начало эксплуатации только после завершения строительства и сдачи работ в экс-

платацию. Когда контракт имеет тип оплаты пользователем, SPV разрешает взимать плату с пользователей (в некоторых проектах, связанных с модернизацией существующей транспортной инфраструктуры, плата с пользователей может взиматься во время строительства). Когда контракт относится к типу государственных платежей, SPV может выставять счета закупающему органу с периодичностью, установленной в контракте (например, ежемесячно), и в соответствии с механизмом оплаты, определенным в контракте [14–16].

На собранные средства SPV компенсирует затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, которые обычно соответствуют платежам, причитающимся подрядчикам по эксплуатации и техобслуживанию. SPV также оплачивает налоги и формирует предписанные резервы, требуемые законом и договором. Оставшиеся средства используются для выплаты процентов и погашения долга, а также для распределения среди акционеров.

Плата за эксплуатацию и техническое обслуживание, подлежащая уплате подрядчикам по эксплуатации и обслуживанию, может составлять фиксированную годовую сумму или быть переменной (в процентах от доходов, особенно когда поток доходов проектной компании основан на спросе или объеме). Эти сборы обычно подлежат тем же вычетам и/или заранее оцененным убыткам, которые влияют на первоначальный доход SPV, частично или полностью передавая производственные риски подрядчикам.

На этапе эксплуатации необходимо обеспечивать отдельные работы (по обновлению или реинвестированию, также иногда называемые «капитальным обслуживанием» или «расходами в течение жизненного цикла»), чтобы поддерживать объект в надлежащем состоянии в течение всего срока контракта по ГЧП. Эти работы обычно выполняются подрядчиками по эксплуатации и техническому обслуживанию согласно контрактам на эксплуатацию и техническое обслуживание [15–20].

Помимо указанной системы закупок, возможно предложение упрощенной схемы «прямого контракта». Данная форма договора имеет как преимущества, так и недостатки. Уменьшается срок реализации работ, что имеет весомое значение для ряда объектов, например, при восстановлении объектов культурного наследия (ОКН). При этом отсутствует рыночный механизм, позволяющий минимизировать цену контракта, а это означает возможность для реализации инновационных проектов с высокой себестоимостью. Таким образом, для различных типов проектов должны применяться принципиально различные схемы, учитывающие интересы всех заинтересованных сторон, и в первую очередь общественные.

ГЧП является лишь одним из нескольких альтернативных инвестиционных механизмов, который следует рассматривать открытым, непредвзятым и про-

зрачным. В этом контексте необходимо провести анализ затрат и результатов, в котором сравниваются ожидаемые затраты в течение жизненного цикла, что позволяет выбрать вариант закупки в соответствии с требованиями закона о бюджете и административными положениями, а также руководствами и конкретными руководствами по затратам [20].

Проведенное исследование позволило сделать вывод о следующих причинах применения механизма ГЧП: партнерские отношения между частными компаниями и правительствами субъектов дают преимущества обеим сторонам. Технологии и инновации частного сектора, например, могут помочь повысить операционную эффективность предоставления государственных услуг. Государственный сектор, со своей стороны, обеспечивает стимулы для частного сектора с целью реализации проектов вовремя и в рамках бюджета. Кроме того, создание экономической диверсификации делает страну более конкурентоспособной в развитии инфраструктурной базы и стимулировании связанного с этим строительства, оборудования, вспомогательных услуг и других видов бизнеса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ эффективности управления федеральным имуществом комплексом показал необходимость проработки новых инвестиционных механизмов строительства и реконструкции объектов. Одним из наиболее перспективных механизмов, предлагаемых авторами исследования, может стать ГЧП. Достоинства ГЧП при реализации проектов, предметом сделки которых выступают объекты, расположенные на участках территорий, относящихся к федеральной собственности: снижение сроков реализации проекта; минимизация объема финансирования проекта из собственного капитала организации; диверсификация рисков проекта по участникам проекта, а в отдельных случаях — перенесение рисков на инвестора. Недостатки ГЧП: необходимость учета интересов всех участников проекта; отсутствие проработанного механизма ГЧП на законодательном уровне для подобного рода объектов. Последний аспект и является ключевой проблемой предметной области исследования.

Самая значимая проблема, с которой сталкиваются при реализации проектов ГЧП, заключается в несогласованности и несоблюдении взаимных интересов между государством и частным партнером. С точки зрения государственного сектора, цель состоит в том, чтобы обеспечить минимизацию субсидий и бюджетных трат на реализацию капиталоемких неэффективных проектов. С другой стороны, частный партнер стремится максимизировать прибыль, при этом компенсировав все риски.

Механизм ГЧП имеет накопленный опыт практической реализации для инфраструктурных проек-

тов. Однако, несмотря на имеющийся потенциал реализации в рамках предметной области исследования, отмечены ограничения, препятствующие его применению для объекта исследования — федерального имущественного комплекса, находящегося в оперативном управлении подведомственной организации.

В работе проведен детальный анализ предлагаемого механизма ГЧП и представлены этапы его реализации с учетом предметной области исследования.

Важным аспектом служит возможность применения ГЧП для реализации инновационных проектов по восстановлению ОКН, использование которых зачастую ограничено текущими финансовыми возможностями и заранее согласованными долгосрочными стратегиями и бюджетами.

Продолжением исследования будет обоснование предлагаемого к реализации механизма ГЧП на примере конкретного объекта, требующего реновации, а также ОКН, требующего реконструкции.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Akhmetshina E.R., Mustafin A.N.* Public-private partnership as a tool for development of innovative economy // *Procedia Economics and Finance*. 2015. Vol. 24. Pp. 35–40. DOI: 10.1016/s2212-5671(15)00609-7
2. *Tkachenko M.V., Shamanina E.A.* IT–new horizons in application of PPP mechanisms in Russia // *Competitive Government: Public Private Partnerships*. 2020. Pp. 249–270. DOI: 10.1007/978-3-030-56352-3\_14
3. *Marinin V.A., Shamanina E.A.* PPP mechanisms in the transport infrastructure of Russia // *Competitive Government: Public Private Partnerships*. 2020. Pp. 205–219. DOI: 10.1007/978-3-030-56352-3\_11
4. *Зусман Е.В.* Профессиональный стандарт в ГЧП: новые правила игры для участников рынка // *Хозяйство и право*. 2021. № 9 (536). С. 122–128.
5. *Подольский А.Г., Красникова А.С.* К вопросу о контрактах жизненного цикла: российский и зарубежный опыт // *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2022. Т. 2. № 2 (122). С. 102–111. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2022.02.02.012
6. *Tselikhina I.V.* The foreign experience of public-private implementation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 650. Issue 1. P. 012043. DOI: 10.1088/1755-1315/650/1/012043
7. *Козаков Р.Р.* Эффективность применения государственно-частного партнерства в сфере строительства как механизма систематического решения социально-экономических проблем // *Экономика и управление: тенденции и перспективы* : мат. II Межвузовской ежегодной науч.-практ. конф. 2021. С. 309–314.
8. *Yin C., Mohamed O., Ye K.M.* A systematic review of Public-private partnership in construction industry from 1998 to 2021 // *Central Asia and the Caucasus*. 2022. Vol. 22. Issue 5. Pp. 385–403. DOI: 10.37178/ca-c.21.5.034
9. *Yinghong S., Kunyuan Z., Fang W.* Research on the influence of private enterprises' cooperative willingness in PPP mode: Chain intermediary model based on opportunistic perception and cooperative risk perception // *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*. 2021. Vol. 35. Issue 6. Pp. 140–149. DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2021.06.012
10. *Chi X., Liu L.* Exploration of PPP investment and financing model for infrastructure: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region // *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2021. Vol. 2021. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2021/8162840
11. *Akhmadi M.H., Himawan A.R.* Determination of financial feasibility of Indonesia's new capital road construction project using scenario analysis // *Planning Malaysia*. 2021. Vol. 19. Issue 17. DOI: 10.21837/pm.v19i17.998
12. *Akomea-Frimpong I., Jin X., Osei-Kyei R.* Developing a financial risk maturity model for public-private partnership projects // *Proceedings of the 37th Annual ARCOM Conference, ARCOM 2021*. 2021. Pp. 412–421.
13. *Wan L., Yu X.* Research on the operation and management mechanism of the ppp mode of the smart city construction projects in the era of big data // *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Management Science and Engineering Management*. 2021. Pp. 399–412. DOI: 10.1007/978-3-030-79206-0\_30
14. *Tepeli E., Taillandier F., Breysse D.* Multidimensional modelling of complex and strategic construction projects for a more effective risk management // *International Journal of Construction Management*. 2019. Vol. 21. Issue 12. Pp. 1218–1239. DOI: 10.1080/15623599.2019.1606493
15. *Owusu-Manu D.-G., Kukah A.S., Boateng F., Asumadu G., Edwards D.J.* Exploring strategies to reduce moral hazard and adverse selection of Ghanaian public-private partnership (PPP) construction projects // *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2021. Vol. 19. Issue 2. Pp. 358–372. DOI: 10.1108/JEDT-05-2020-0195
16. *Yang J., You J.* Application innovation of PPP models in smart city projects // *Conference Proceedings of the 7th International Symposium on Project Management, ISPM 2019*. 2019. Pp. 107–113.
17. *Cheng M., Liu G., Xu Y.* Can joint-contract functions promote PPP project sustainability performance? A moderated mediation model //

Engineering, Construction and Architectural Management. 2021. Vol. 28. Issue 9. Pp. 2667–2689. DOI: 10.1108/ECAM-06-2020-0419

18. *Appelt V.* Savings Potential in Highway Planning, Construction and Maintenance Using BIM — German Experience with PPP // *Sustainable Civil Infrastructures*. 2022. Pp. 365–378. DOI: 10.1007/978-3-030-79801-7\_26

19. *Shalbolova U.Zh., Chikibayeva Z., Kenzhegaliev Z., Kim E.* Public-private partnership in

the housing and communal services and university housing infrastructure of Kazakhstan // *Public Policy and Administration*. 2022. Vol. 20. Issue 5. Pp. 585–597. DOI: 10.13165/VPA-21-20-5-03

20. *Yaling D., Tongtong Z.* Research on the impact of face concerns on behavior of business model innovation in PPP projects: The moderating effects of project access // *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*. 2022. Vol. 36. Issue 2. Pp. 195–203. DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2022.02.017

Поступила в редакцию 4 июня 2022 г.

Принята в доработанном виде 22 июня 2022 г.

Одобрена для публикации 22 июня 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Татьяна Сергеевна Мещерякова** — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 636518, Scopus: 56800721300, ResearcherID: N-8915-2016, ORCID: 0000-0002-1792-0562; MeshcheryakovaTS@mgsu.ru;

**Елена Сергеевна Зуева** — директор Департамента капитального строительства; **Главное производственно-коммерческое управление по обслуживанию дипломатического корпуса при Министерстве иностранных дел Российской Федерации (ГлавУпДК)**; 119034, г. Москва, ул. Пречистенка, д. 20; EZueva@updk.ru.

## REFERENCES

1. Akhmetshina E.R., Mustafin A.N. Public-private partnership as a tool for development of innovative economy. *Procedia Economics and Finance*. 2015; 24:35-40. DOI: 10.1016/s2212-5671(15)00609-7

2. Tkachenko M.V., Shamanina E.A. IT—new horizons in application of PPP mechanisms in Russia. *Competitive Government: Public Private Partnerships*. 2020; 249-270. DOI: 10.1007/978-3-030-56352-3\_14

3. Marinin V.A., Shamanina E.A. PPP mechanisms in the transport infrastructure of Russia. *Competitive Government: Public Private Partnerships*. 2020; 205-219. DOI: 10.1007/978-3-030-56352-3\_11

4. Zusman E.V. Professional standard in PPP: new rules of the game for market participants. *Economy and Law*. 2021; 9(536):122-128. (rus.).

5. Podolsky A.G., Krasnikova A.S. On the issue of life cycle contracts: Russian and foreign experience. *Economics and Management: Problems, Solutions*. 2022; 2:2(122):102-111. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2022.02.02.012 (rus.).

6. Tselikhina I.V. The foreign experience of public-private implementation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 650(1):012043. DOI: 10.1088/1755-1315/650/1/012043

7. Kozakov R.R. Effectiveness of public-private partnership in the construction sector as a mechanism for systematic solution of socio-economic problems. *Economy and management: trends and prospects: materials of the II Interuniversity annual scientific-practical conference*. 2021; 309-314. (rus.).

8. Yin C., Mohamed O., Ye K.M. A systematic review of Public-private partnership in construction industry from 1998 to 2021. *Central Asia and the Caucasus*. 2022; 22(5):385-403. DOI: 10.37178/ca-c.21.5.034

9. Yinghong S., Kunyuan Z., Fang W. Research on the influence of private enterprises' cooperative willingness in PPP mode: Chain intermediary model based on opportunistic perception and cooperative risk perception. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*. 2021; 35(6):140-149. DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2021.06.012

10. Chi X., Liu L. Exploration of PPP investment and financing model for infrastructure: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2021; 2021:1-8. DOI: 10.1155/2021/8162840

11. Akhmadi M.H., Himawan A.R. Determination of financial feasibility of Indonesia's new capital road construction project using scenario analysis. *Planning Malaysia*. 2021; 19(17). DOI: 10.21837/pm.v19i17.998

12. Akomea-Frimpong I., Jin X., Osei-Kyei R. Developing a financial risk maturity model for public-private partnership projects. *Proceedings of the 37th Annual ARCOM Conference, ARCOM 2021*. 2021; 412-421.

13. Wan L., Yu X. Research on the operation and management mechanism of the PPP mode of the smart city construction projects in the era of big data. *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Management Science and Engineering Management*. 2021; 399-412. DOI: 10.1007/978-3-030-79206-0\_30

14. Tepeli E., Taillandier F., Breysse D. Multidimensional modelling of complex and strategic construction projects for a more effective risk management. *International Journal of Construction Management*. 2019; 21(12):1218-1239. DOI: 10.1080/15623599.2019.1606493
15. Owusu-Manu D.-G., Kukah A.S., Boateng F., Asumadu G., Edwards D.J. Exploring strategies to reduce moral hazard and adverse selection of Ghanaian public-private partnership (PPP) construction projects. *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2021; 19(2):358-372. DOI: 10.1108/JEDT-05-2020-0195
16. Yang J., You J. Application innovation of PPP models in smart city projects. *Conference Proceedings of the 7th International Symposium on Project Management, ISPM 2019*. 2019; 107-113.
17. Cheng M., Liu G., Xu Y. Can joint-contract functions promote PPP project sustainability performance? A moderated mediation model. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2021; 28(9):2667-2689. DOI: 10.1108/ECAM-06-2020-0419
18. Appelt V. Savings Potential in Highway Planning, Construction and Maintenance Using BIM — German Experience with PPP. *Sustainable Civil Infrastructures*. 2022; 365-378. DOI: 10.1007/978-3-030-79801-7\_26
19. Shalbolova U.Zh., Chikibayeva Z., Kenzhegalieva Z., Kim E. Public-private partnership in the housing and communal services and university housing infrastructure of Kazakhstan. *Public Policy and Administration*. 2022; 20(5):585-597. DOI: 10.13165/VPA-21-20-5-03
20. Yaling D., Tongtong Z. Research on the impact of face concerns on behavior of business model innovation in PPP projects: The moderating effects of project access. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*. 2022; 36(2):195-203. DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2022.02.017

Received June 4, 2022.

Adopted in revised form on June 22, 2022.

Approved for publication on June 22, 2022.

**B I O N O T E S :** **Tatyana S. Meshcheryakova** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 636518, Scopus: 56800721300, ResearcherID: N-8915-2016, ORCID: 0000-0002-1792-0562; MeshcheryakovaTS@mgsu.ru;

**Elena S. Zueva** — Director of the Capital Construction Department; **Main Administration for Service to the Diplomatic Corps (GlavUpDK)**; 20 Prechistenka st., Moscow; 119034, Russian Federation; EZueva@updk.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.057.7

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.813-822

## Внедрение инновационных технологий в управление строительной и специальной техникой

**Юрий Октавьевич Бакрунов, Елена Юрьевна Васильева***Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассматриваются тенденции и перспективы применения инноваций в управлении строительной и специальной техникой в процессе строительства. Актуальность данной темы обусловлена общей ориентацией отечественной экономики на инновационное развитие, без которого невозможно дальнейшее повышение качества продукции, повышение производительности труда, снижение затрат строительного производства, сокращение экологического вреда, аварийности, ущерба здоровью работников и улучшение условий труда.

**Материалы и методы.** Использованы системный подход, методы структурного анализа, методы классификации и группировок, сравнительный и статистический анализ и прогнозирование, методы экспертных оценок. Материалом для исследования послужили работы отечественных и зарубежных авторов, опыт строительных компаний, статистика Росстата, информация Агентства инноваций Москвы, материалы деловых программ специализированных выставок.

**Результаты.** Систематизированы существующие инновационные технологии управления строительной и специальной техникой на этапе строительства. Указанные технологии разделены на две основные группы: средства телематики и средства достижения автономности техники и транспорта. Выявлены преимущества от использования этих технологий и возможные негативные последствия. В развитие методики оценки эффективности инноваций предложена система показателей эффективности внедрения и использования инновационных технологий управления спецтехникой и строительной техникой.

**Выводы.** Проведенный анализ доказывает эффективность и целесообразность инновационных технологий в управлении техникой и транспортом в процессе строительства. Для развития этого инновационного направления требуются определенные условия, прежде всего: активное производство специальных приборов и программ; снижение их цены, что приведет к большей доступности; совершенствование нормативно-правового регулирования; повышение квалификации кадров.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** беспилотная техника, автономная техника, уровни автономии техники, телематика, инновации в строительной и специальной технике, эффективность инноваций, оценка инноваций

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность организаторам круглого стола «Телематика» (деловая программа CTT FORUM 2022) за предоставленный материал и возможность участвовать в обсуждении темы исследования.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Бакрунов Ю. О., Васильева Е. Ю. Внедрение инновационных технологий в управление строительной и специальной техникой // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 813–822. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.813-822

**Автор, ответственный за переписку:** Елена Юрьевна Васильева, elena.chibisova\_metr@mail.ru.

## Implementation of innovative technologies in control of the construction and special equipment

**Yuri O. Bakrunov, Elena Yu. Vasilyeva***Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** Trends and prospects of the application of innovations in control of the construction and special equipment in construction process are considered in the article. The relevance of this subject is explained by the general orientation of domestic economy toward the innovative development without which any further improvement of the products quality, an increase in labour productivity, cost reduction of construction production, decrease in the environmental damage, accident rate, damage to workers' health and improvement of the conditions of their work is impossible.

**Materials and methods.** The system approach, methods of the structural analysis, methods of classification and groups, the comparative and statistical analysis and forecasting, methods of expert estimates were used during the research. Works, published by domestic and foreign authors, experience of construction companies, statistics of Rosstat, materials of the Agency of innovations of the city of Moscow, materials of business programmes of specialized exhibitions were used as the material for the research.

**Results.** The authors systematized the existing innovative technologies of control of the construction and special equipment at the construction stage. These technologies are divided into two main groups: means of telematics and means of achievement of autonomy of equipment and transport. Some advantages of the use of these technologies, as well as some possible negative consequences are identified. The system of indicators of efficiency of introduction and use of innovative technologies of control of special and construction equipment is proposed for the development of an innovations efficiency assessment technique.

**Conclusions.** The analysis proves the efficiency and expediency of innovative technologies in control of the equipment and transport during the construction process. Certain conditions are required for the development of this innovative area, first of all, intensive production of special devices and programmes, a decrease in their price and higher availability, legal regulation improvement, professional development of the construction companies' staff.

**KEYWORDS:** pilotless equipment, levels of equipment autonomy, innovations in construction and special equipment, efficiency of innovations, assessment of innovations.

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to the organizers of the round table "Telematics" (The business programme of CTT FORUM 2022) for the provided material and the opportunity to participate in the discussion of the subject of research.

**FOR CITATION:** Bakrunov Yu.O., Vasilyeva E.Yu. Implementation of innovative technologies in control of the construction and special equipment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):813-822. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.813-822 (rus.).

*Corresponding author:* Elena Yu. Vasilyeva, elena.chibisova\_metr@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе приоритетом развития всех отраслей отечественной экономики является ориентация на инновации, что задекларировано прежде всего в Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года<sup>1</sup> и Стратегии инновационного развития строительной отрасли Российской Федерации на период до 2030 года<sup>2</sup>. Инновации охватывают все сферы деятельности, становясь основным драйвером, обеспечивающим рост производительности, конкурен-

тоспособности, финансовой эффективности, экологичности [1, 2].

Приходится признать, что строительная отрасль консервативна и, хотя тенденции к внедрению инновационных технологий развиваются и в этой сфере, строительство и девелопмент отличаются более низким уровнем инновационности, чем другие отрасли. В мире почти 60 % строительных компаний находится на начальных этапах цифровой трансформации (рис. 1)<sup>3</sup>.

Инновации в строительной сфере включают технологии для автоматизации и повышения эффектив-

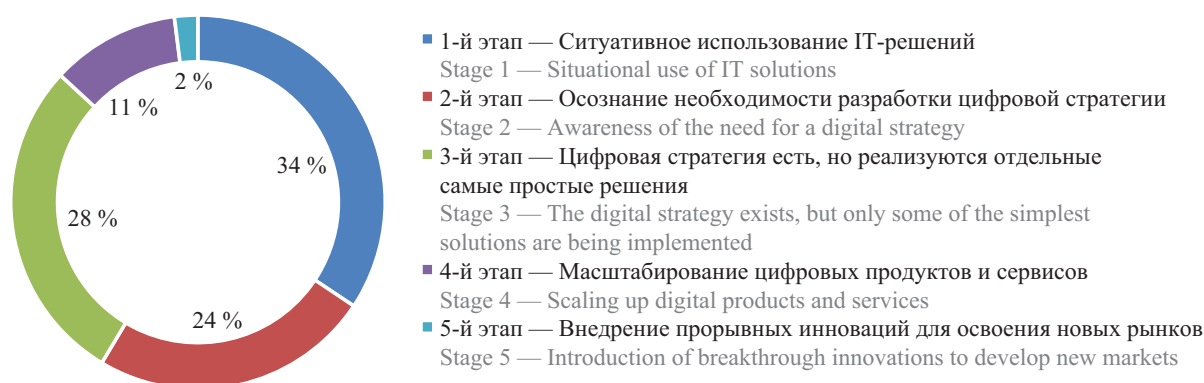


Рис. 1. Распределение компаний строительной отрасли по этапам цифровой зрелости в мире<sup>4</sup> (рисунок авторов)

Fig. 1. Breakdown of construction industry companies by stages of digital maturity in the world<sup>4</sup> (drawn by the authors)

<sup>1</sup> Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года : Распоряжение Правительства РФ от 08.12.2011 № 2227-р (ред. от 18.10.2018). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_123444/2f806c88991ebbad43cdaa1c63c2501dc94c14af/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_123444/2f806c88991ebbad43cdaa1c63c2501dc94c14af/)

<sup>2</sup> Стратегия инновационного развития строительной отрасли Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/11870/>

<sup>3</sup> Агентство инноваций города Москвы. Инновации в строительстве: мировые тренды и особенности развития в Москве. Октябрь 2021. URL: <https://ict.moscow/research/innovatsii-v-stroitelstve-mirovye-trendy-i-osobennosti-razvitiia-v-moskve/>

<sup>4</sup> The state of digital transformation in construction across the globe across the globe. An IDC InfoBrief. March 2020. URL: [http://constructioncloud.autodesk.com/rs/572-JSV-775/images/Autodesk-IDC-Digital%20Transformation\\_The-Future-of-Connected-Construction.pdf](http://constructioncloud.autodesk.com/rs/572-JSV-775/images/Autodesk-IDC-Digital%20Transformation_The-Future-of-Connected-Construction.pdf)

ности не только строительных работ, но всей производственной цепочки: от городского планирования и проектирования до управления и эксплуатации построенным объектом. Однако в рамках настоящего исследования внимание авторов было сконцентрировано именно на этапе строительства объектов, а конкретно — на управлении техникой.

Тема внедрения инновационных технологий в строительный процесс изучалась многими авторами. Так, работы, посвященные инновационным технологиям в строительстве, касаются применения:

- BIM-технологий на стадии проектирования, строительства и эксплуатации зданий [3, 4];
- 3D-принтеров [5];
- строительных дронов и роботов [5];
- беспилотной спецтехники и транспорта [6];
- телематики на транспорте и спецтехнике [7].

Но, как правило, авторы не рассматривают инновационные технологии управления строительной, специальной техникой и транспортом системно, а исследуют отдельно взятые аспекты.

Кроме того, представляется важным предложить методику анализа эффективности внедрения и применения инновационных технологий управления техникой. Очевидно, что разработка, приобретение, внедрение и эксплуатация этих технологий требуют инвестиций, а значит, появляется потребность в методически грамотном обосновании их целесообразности и отборе из альтернативных вариантов. Методы оценки эффективности инноваций уже существуют, совершенствуются и развиваются различными авторами. Но остается необходимость в адаптации имеющихся методик по отношению к оценке эффективности внедрения инновационных технологий управления транспортом, строительной и специальной техникой.

Объект данного исследования — инновационные технологии в управлении строительной и специальной техникой в строительном производстве.

Предметом исследования является внедрение инновационных технологий в реальных современных условиях.

Цель исследования — систематизация существующих инновационных технологий управления техникой, выявление возможностей и ограничений их использования в строительном производстве и разработка рекомендаций по оценке эффективности их использования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При подготовке статьи авторы использовали системный подход, методы структурного анализа, методы классификации и группировок, сравнительный и статистический анализ и прогнозирование, методы экспертных оценок.

Материалами исследования стали работы отечественных и зарубежных авторов по теме инновационных технологий в строительстве; опыт

строительных компаний, освещенный ими в открытом доступе в сети Интернет; статистика Росстата; информация Агентства инноваций Москвы; материалы деловой программы выставки инструментов и оборудования МІТЕХ-2021, Российской строительной недели-2021, выставки СТТ FORUM 2022.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ существующей практики применения инновационных технологий в управлении строительной и специальной техникой на стройплощадке позволил авторам предложить следующую классификацию (рис. 2).

Первое направление инноваций в управлении техникой — средства телематики. Оно больше ассоциируется с автомобильным транспортом, но может использоваться как в перевозках строительных материалов, так и на стройплощадке — при работе спецтехники [7].

Тахографы позволяют контролировать режим оператора спецтехники или работу водителя, совершаемые им остановки. При подключении к системе навигации (такой как ГЛОНАСС) возможно непрерывно фиксировать сведения о маршруте и скорости движения. Результатом применения тахометрии становится снижение времени простоев техники, ее схода с маршрута и нецелевого использования. Как результат, растет экономическая эффективность эксплуатации.

Средства контроля состояния оператора спецтехники или водителя дают возможность исключить засыпание, потерю внимания, опасное вождение, аварийные ситуации, а также небрежное отношение к технике, что вызывает поломки и преждевременный износ. В случае выхода транспорта или спецтехники на дороги общего пользования контроль за водителем позволяет предотвратить нарушение ПДД и начисление штрафов. Все это означает снижение затрат строительной компании (на ремонт, штрафы, компенсацию ущерба имуществу и здоровью). Ценно и то, что показания оборудования в большинстве случаев обрабатываются самим оператором и в случае его адекватной реакции не требуют привлечения диспетчера.

Система контроля расхода топлива (система СКРТ) — это прежде всего датчик контроля расхода топлива, который устанавливается в бак автомобиля, передает информацию об уровне топлива и его расходе в систему мониторинга транспорта, в случае контроля топлива по CAN-шине информация о расходе и уровне топлива передается в систему спутникового мониторинга от бортового компьютера автомобиля по CAN-шине. В компьютер топливные данные поступают со штатного датчика, размещенного в баке производителем. Не всегда врезной датчик уровня топлива (ДУТ) или счетчик топлива можно установить из-за конструктивных особенностей; также не всегда целесообразно по стоимости уста-



**Рис. 2.** Классификация инноваций в управлении специальной, строительной техникой и транспортом в строительстве (рисунок авторов)

**Fig. 2.** Classification of innovations in operating of special, construction equipment and means of transport in the construction sector (drawn by the authors)

навливать отдельные датчики для контроля расхода. В таких случаях можно подключаться к штатным ДУТ.

Обобщение информации датчиков дает возможность не только спрогнозировать и точно рассчитать топливные затраты, режим эксплуатации автотранспорта, но и сократить случаи нецелевого использования техники, наладить учет топлива<sup>5</sup>.

Второе направление инноваций в управлении строительной, специальной техникой и транспортом — переход к их автономности.

Существует 6 уровней автономности транспорта и спецтехники.

**Уровень 0 — Только водитель/оператор.** Оператор или водитель постоянно контролирует «продольное» и «боковое» движение. Нет никаких автоматических систем.

**Уровень 1 — Помощники.** Оператор или водитель постоянно контролирует «продольное» и «боковое» движение. Электроника помогает оператору или водителю в процессе управления.

**Уровень 2 — Частичная автоматизация.** Оператор или водитель обязан постоянно следить за процессом управления. В некоторых условиях техника движется самостоятельно. Система выполняет «продольное» и «боковое» движение. В некоторых случаях — под контролем оператора или водителя.

**Уровень 3 — Условная автоматизация.** Оператор или водитель не должен контролировать технику все время. Система выполняет «продольное» и «боковое» движение в автоматическом режиме при определенных условиях.

**Уровень 4 — Высокая автоматизация.** Оператор или водитель при определенных условиях не требуется. Система способна взять управление на себя.

**Уровень 5 — Полная автоматизация.** Оператор или водитель не требуется. Система контролирует процесс управления на всех дорогах или площадках и при всех условиях.

В настоящее время практически все авторитетные производители и новаторские компании активно представляют прототипы беспилотной техники будущего. Секторы строительный и техники тоже стараются не отставать от инновационных технологий, хотя здесь работы и ведутся менее активно. Фактически, самые прогрессивные их разработки находятся на 3 или 4 уровне автономности. Примеров полной автоматизации известно мало [8].

Наибольшей степенью автономности обладают строительные роботы и дроны.

Использование роботов в строительстве пока ограничено — в 100 раз меньше, чем, например, в промышленности, но ожидается рост уровня их распространения. Основные типы роботов, распространенных в строительстве:

- стационарные механизмы, применяемые для повторяющихся задач (например, шарнирные роботы) — наиболее распространенный тип роботов;
- коллаборативные роботы (коботы), которые работают совместно с человеком для решения задач, которые нельзя полностью автоматизировать (например, робот-каменщик для кладки кирпича);
- экзоскелеты, которые помогают увеличить производительность труда (минимум на 20 %) и снизить нагрузку на рабочих [9];

- автономные управляемые транспортные средства (ТС) и автономные мобильные роботы.

Наиболее освоенным видом строительных беспилотников стали беспилотные летательные аппараты — дроны. Они активно используются в строительстве, преимущественно по модели «дрон-как-услуга». Среднегодовой прирост уровня применения дронов составляет 239 %<sup>3</sup>. Дроны предоставляют доступ к внушительному набору опциональных возможностей практически на каждом из этапов строительства. Основные направления использования дронов в строительстве (на этапе строительства):

- инженерная съемка, картирование местности;
- инспекция зданий и сооружений в ходе строительства [10];
- мониторинг строительства и контроль безопасности на строительной площадке [3];
- охрана строительной площадки.

Одним из наиболее интересных и перспективных направлений является внедрение автономной (беспилотной) специальной и строительной техники, а также транспорта, применяемого в процессе строительства.

Далее приведены самые известные успешные примеры автономной строительной спецтехники.

Японская компания Komatsu, которая специализируется на производстве строительной техники, совместно с брендом из США Skycatch разработали экскаваторы, способные работать без оператора (рис. 3).



**Рис. 3.** Беспилотный экскаватор Komatsu/Skycatch (источник: Equipment World)

**Fig. 3.** Pilotless Komatsu/Skycatch excavator (the drawing is taken from the source: Equipment World)

Пока инновационная техника эксплуатируется в режиме полуавтомат (4-й уровень автономности), но в ближайшем будущем инженеры обещают полностью беспилотное управление и 100 % отдых для человека. Машины-строители работают в тесном тандеме с бортовыми компьютерами. Сенсоры и датчики передают собранную информацию, на основе которой моделируется трехмерная карта строительной площадки и алгоритм действий на ней. В результате робот-экскаватор может самостоятельно вырыть траншею с заданными параметрами глубины и ши-

рины; беспилотный бульдозер перевезет определенные объемы грунта с одного места площадки на другое. Этот американо-японский проект имеет все шансы стать флагманом направления роботизированной стройки.

Эксперты считают закономерностью появление первых строймашин-беспилотников именно в Японии. Страна испытывает острую нехватку рабочих рук (особенно обострившуюся в период коронавирусной пандемии), кроме того, имеет успешный опыт работы с искусственным интеллектом.

Стартап из США Built Robotics представил экскаватор-беспилотник, взяв за основу погрузчик Bobcat и оснастив его датчиками, сенсорами и компьютером (рис. 4).



**Рис. 4.** Беспилотный экскаватор Built Robotics (снимок экрана видео на YouTube-канале Built Robotics)

**Fig. 4.** Pilotless Built Robotics excavator (screenshot from the video on Built Robotics YouTube channel)

Инновационное оборудование на борту призвано обеспечить автопилотирование и выполнение всех необходимых на стройке функций. Особенностью прототипа беспилотного экскаватора является усиленная конструкция лидара, который специально рассчитан для работы в экстремальных условиях и способен выдерживать сильные вибрации, удары и физические нагрузки. Функционал беспилотного «строителя» достаточно широк: он может ориентироваться в пространстве и отслеживать свое место расположения (разработчики заявляют о точности до сантиметра). Экскаватор самостоятельно следит за наполнением ковша и при этом избегает столкновения с окружающими препятствиями и людьми на строительной площадке.

В настоящее время для нужд строительства применяется и беспилотный транспорт: грузовики для доставки строительных материалов к стройплощадке (по дорогам общего пользования, в открытых логистических зонах), либо для перемещения внутри стройплощадки (в закрытой логистической зоне). Первый тип транспорта пока распространен значительно меньше [11, 12]. Для нахождения нужного маршрута, безопасного передвижения и взаимодействия с другими участниками движения транспорт

оборудуется специальным оборудованием: камерами, сенсорами, радаром, лидарами.

Использование инновационных технологий и постепенный переход к более автономной специальной и строительной технике и транспорту дает целый ряд преимуществ: уменьшаются затраты строительных компаний за счет автоматизации строительных процессов, снижения аварийности (а следовательно — простоев, расходов на ремонт, компенсации ущерба), сокращения перерывов на отдых, возможности круглосуточной работы. Благодаря инновационным технологиям управления техника может работать в опасных и вредных для человека условиях, что позволяет активно использовать их при возникновении чрезвычайных ситуаций и стихийных бедствий без какого-либо риска для жизни [13].

Эффективность инновационных технологий управления специальной и строительной техникой предполагает сравнение затрат на их внедрение и использование и выгод от их применения [14–16].

Финансовые затраты, необходимые для внедрения и применения инновационных технологий в управлении спецтехникой, строительной техникой и транспортом, представляют собой совокупность следующих затрат:

- затраты на приобретение оборудования и программного обеспечения (СП);
- стоимость производства строительных работ с применением инноваций;
- затраты на транспортировку оборудования (если требуется);
- оплата труда сотрудников.

Стоимость производства работ с использованием инновационного оборудования можно рассчитать, зная стоимость рабочего часа оборудования и необходимое рабочее время:

$$CP = t_{\text{раб}} P_{\text{рч}}, \quad (1)$$

где  $CP$  — стоимость производства работ;  $t_{\text{раб}}$  — необходимое рабочее время;  $P_{\text{рч}}$  — стоимость рабочего часа.

Затраты на перевозку техники важны, если она не может самостоятельно передвигаться по дорогам общего пользования и нуждается в транспортировке. Затраты этой группы зависят от:

- стоимости автомобиля;
- стоимости горючего;
- расстояния.

Тогда затраты на транспортные расходы  $TC$  будут рассчитываться по формуле:

$$TC = 2s \left( \frac{P_a - P_{6/y}}{P_{\text{ес}}} + P_{\text{топ}} \right), \quad (2)$$

где  $s$  — расстояние от места базирования до места эксплуатации техники;  $P_a$  — стоимость нового автомобиля;  $P_{6/y}$  — стоимость подержанного автомобиля;  $P_{\text{ес}}$  — экономически выгодный ресурс эксплуатации;  $P_{\text{топ}}$  — цена за топливо на 1 км хода.

Затраты на оплату труда сотрудников  $CC$  рассчитываются по формуле:

$$CC = (t_{\text{путь}} + t_{\text{раб}}) \frac{НВ}{160} Ч, \quad (3)$$

где  $t_{\text{путь}}$  — время, затраченное на путь от места базирования до места эксплуатации, если оно происходит в рабочее оплачиваемое время;  $t_{\text{раб}}$  — собственное время на производство работ сотрудником;  $НВ$  — норма выработки на человека в месяц; 160 — нормальная длительность рабочего времени в месяц при сорокачасовой рабочей неделе;  $Ч$  — количество человек в бригаде.

Общие затраты на внедрение и применение инновационных технологий управления строительной и специальной техникой рассчитываются как:

$$C = CP + CR + CT + CC. \quad (4)$$

Для того чтобы признать внедрение и применение инновационной технологии эффективными, требуется, чтобы дополнительные доходы ( $D$ ) и экономия ( $\mathcal{E}$ ), достигнутые благодаря им, превышали указанные затраты ( $C$ ):

$$D + \mathcal{E} > C. \quad (5)$$

Состав доходов и экономии зависит от того, какой тип инновации применяется. Примеры доходов и экономии были рассмотрены выше.

В реальности эксплуатация техники растягивается на длительный период и параметры ее эффективности подвержены влиянию многих факторов. Соответственно, вступает в дело временная стоимость затрат и доходов (экономии) и для более корректной оценки применяется дисконтирование показателей [17, 18]. Тогда неравенство (5) преобразуется следующим образом:

$$\frac{D}{(1+i)^n} + \frac{\mathcal{E}}{(1+i)^n} > CP + \frac{CR}{(1+i)^n} + \frac{CT}{(1+i)^n} + \frac{CC}{(1+i)^n}, \quad (6)$$

где  $1/(1+i)^n$  — коэффициент дисконтирования;  $i$  — стоимость капитала на финансовом рынке;  $n$  — номер периода с начала проекта внедрения инновации.

Кроме того, нужно понимать, что, помимо чисто экономического эффекта, благодаря инновационным технологиям управления техникой достигаются экологический (снижение вредных выбросов в атмосферу и т.д.) и социальные эффекты (улучшение условий труда, освобождения человека от работы во вредных, опасных и некомфортных условиях, снижение риска травматизма и профессиональных заболеваний, повышение престижности оператора современной техники по сравнению с традиционным трудом на стройплощадке и при транспортировке, появление новых профессий, повышение квалификации рабочих) [19–24]. Таким образом, социальные и экологические эффекты также должны оказывать влияние на принятие решения об эффективности и целесообразности инноваций [25].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Перспективы у средств телематики и автономной строительной техники широкие. Прогнозы доходят до предположений, что беспилотная строй- и спецтехника сможет заменить человека на стройплощадке. Пока полностью «избавиться» от оператора-человека не получается — он обязательно должен присутствовать на стройплощадке, чтобы в случае экстренной ситуации взять управление под свой контроль. Но совершенствование технологий в будущем позволит свести участие человека в строительном процессе к минимуму. Это принесет ряд положительных результатов:

- рост производительности труда;
- более интенсивное использование техники, увеличение суточного пробега, исключение простоев, рост фондоотдачи техники;
- повышение безопасности выполнения строительных работ, добычи и транспортировки стройматериалов, снижение количества аварий за счет неукоснительного соблюдения инновационной техникой техники безопасности и правил ПДД, соответственно — снижение затрат на ремонт, компенсацию ущерба, убытков от простоев техники и срывов графика работ;
- предотвращение хищений, поломок вследствие неправильного или недобросовестного обращения с техникой, преждевременного износа (что также означает снижение затрат на ремонт), исключение перерасхода топлива или его нецелевого расхода;
- сокращение экологического вреда (например, за счет уменьшения нецелесообразного перемещения техники, простоев заведенной техники);

- снижение вреда здоровью работников из-за вредных и опасных условий труда.

Экономический эффект от внедрения инноваций в управление спецтехникой и транспортом могут быть оценены с помощью показателей, предложенных в рамках данного исследования.

С другой стороны, есть и минусы у применения средств телематики и обеспечения автономности техники:

- высказываются опасения, что человеку через некоторое время запретят управлять транспортом и спецтехникой;
- активное применение средств телематики, камер, радаров усиливает контроль над работниками, ускоряет переход к тоталитарному, полностью контролируемому обществу;
- главное негативное последствие, которое можно предсказать, — это глобальные изменения в мировой экономике, из-за которых многие люди потеряют работу, а возможно, и некоторые компании прекратят свое существование, не найдя нишу в современных реалиях.

Тем не менее эффективность инновационных технологий в управлении спецтехникой и транспортом очевидна. В свою очередь для активизации их внедрения требуются определенные условия:

- активное производство специальных приборов и программ, снижение их цены, что приведет к большей доступности;
- совершенствование нормативно-правового регулирования;
- повышение квалификации кадров.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бакрунов Ю.О., Васильева Е.Ю., Верстина Н.Г., Глазкова В.В., Каракозова И.В., Кулаков К.Ю. и др. Инновации в современных условиях: теоретические вопросы и практика реализации : монография. М. : Издательский дом ГУУ, 2022. 141 с.
2. Масленников М.И. Технологические инновации и их влияние на экономику // Экономика региона. 2017. Т. 13. № 4. С. 1221–1235. DOI: 10.17059/2017-4-20
3. Бакрунов Ю.О., Васильева Е.Ю. Инновационные тенденции в девелоперской деятельности // Управленческий учет. 2022. № 4–3. С. 529–536. DOI: 10.25806/uu4-32022529-536
4. Monnot J.M., Williams R.C. Construction equipment telematics // Journal of Construction Engineering and Management. 2011. Vol. 137. Issue 10. Pp. 793–796. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000281
5. Комарова К.С., Комарова Н.Д. Мультикоптеры в мониторинге строительных площадок // Университетская наука. 2016. № 1 (1). С. 70–73.
6. Юрченко Р.А., Топоров А.В., Иванов В.Е., Кропотова Н.А. Разработка решений авиационного и наземного беспилотного мониторинга в целях предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций // Пожарная и аварийная безопасность. 2018. № 2 (9). С. 121–132.
7. Kumarapu K., Shashi M., Keesara V.R. UAV in construction site monitoring and concrete strength estimation // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2021. Vol. 49. Issue 3. Pp. 619–627. DOI: 10.1007/s12524-020-01246-w
8. Aydin B., Yeon J., Oh E. A pilot study of UAVs in the construction sector: Knowledge, attitudes, and practice // Proceedings of the 2019 IISE Annual Conference. 2019.
9. Xu Y., Turkan Y., Karakhan A.A., Liu D. Exploratory study of potential negative safety outcomes

associated with UAV-assisted construction management // Construction Research Congress 2020. 2020. DOI: 10.1061/9780784482865.129

10. Лагутенков А., Жильцов А. Роботизация: конструктор «Ардуино», экзоскелеты и беспилотники // БИТ. Бизнес & Информационные технологии. 2018. № 4 (77). С. 8–10.

11. Плиев Р.О. Беспилотники как источник возможностей для логистики в будущем // Молодой ученый. 2016. № 13–1(117). С. 84–85.

12. Мельникова Т.Е., Адулина З.М., Степанова И.С. Перспективы развития автономных грузовых автотранспортных средств в России с учетом зарубежного опыта // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 73–2. С. 98–101. DOI: 10.18411/lj-05-2021-70

13. Богоносцев А.Л., Папкова М.Д. Оценка эффективности внедрения инноваций в строительстве // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ). Серия: Социально-экономические науки. 2012. № 5. С. 110–112.

14. Беляева С.В., Родионова Е.И. Методическая оценка эффективности инноваций в экостроительстве // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2017. № 7 (25). С. 160–164.

15. Куликова Н.Н. Оценка эффективности инноваций // Инновационное развитие экономики. 2012. № 2 (8). С. 144–147.

16. Васильева Е.Ю. Комплексный подход к оценке привлекательности инновационного проекта // Экономика и предпринимательство. 2019. № 11 (112). С. 698–703.

17. Васильева Е.Ю. Управление эффективностью инновационного проекта в условиях риска // Экономика и предпринимательство. 2019. № 12 (113). С. 628–634.

18. Vasilyeva E., Krupnov Y. Development of the methodological approach to the comprehensive assessment of the innovative project effectiveness // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 164. P. 10037. DOI: 10.1051/e3sconf/202016410037

19. Mezentseva E.S. Innovative effects of digital transformation of industrial enterprises // Regional Economics: Theory and Practice. 2022. Vol. 20. Issue 4. Pp. 659–677. DOI: 10.24891/re.20.4.659

20. Zhang X., Wang Y., Hao M., Wu L., Yin H. Effectiveness analysis of optimized UAV SWARM CONSTRUCTION BASED ON TASK // Proceedings of 2021 International Conference on Autonomous Unmanned Systems (ICAUS 2021). 2022. Pp. 1797–1804. DOI: 10.1007/978-981-16-9492-9\_177

21. Moud H.I., Shojaei A., Flood I. Monte Carlo based risk analysis of unmanned aerial vehicle flights over construction job sites // Proceedings of 8th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. 2018. DOI: 10.5220/0006868804510458

22. Hyun L.S., Wook L.D., Koo J.K., Lee T.S. Analysis of Economical Validity for Implementation of Telematics in Construction Fields // Journal of the Korean society for railway. 2005. Vol. 8. Issue 5.

23. Сидоров М.Н. Оценка влияния эффективности инноваций на производительность труда // Нормирование и оплата труда в промышленности. 2015. № 7. С. 15–22.

24. Maeda S., Ye Y. Study on effectiveness of social distancing equipment at construction sites // Ergonomics & Human Factors. 2021. 2021. URL: <https://eprints.soton.ac.uk/455998/>

25. Khalid M., Namian M., Behm M. Safety implications of using UAVs in construction: An ethical perspective // Proceedings of the Joint CIB W099 & W123 International Conference 2021. 2021.

Поступила в редакцию 4 июня 2022 г.

Принята в доработанном виде 19 июня 2022 г.

Одобрена для публикации 19 июня 2022 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Юрий Октавьевич Бакрунов — доктор экономических наук, профессор кафедры менеджмента и инноваций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 267556, ResearcherID: B-4075-2016, ORCID: 0000-0002-8288-7017; [ybakrunov@yandex.ru](mailto:ybakrunov@yandex.ru);

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](mailto:elena.chibisova_metr@mail.ru).

Вклад авторов:

Бакрунов Ю.О. — сбор материала, итоговые выводы, научное редактирование текста статьи.

Васильева Е.Ю. — идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Bakrunov Yu.O., Vasil'eva E.Yu., Verstina N.G., Glazkova V.V., Karakozova I.V., Kulakov K.Yu. et al. *Fists. Innovations in modern conditions: theoretical issues and practice of realization: monograph*. Moscow, GUU Publishing House, 2022; 142. (rus.).
2. Maslennikov M.I. The technological innovations and their impact on the economy. *Economy of Regions*. 2017; 13(4):1221-1235. DOI 10.17059/2017-4-20 (rus.).
3. Bakrunov Yu.O., Vasilyeva E.Yu. Innovative trends in the development activities. *Management Accounting*. 2022; 4-3:529-536. DOI: 10.25806/uu4-32022529-536 (rus.).
4. Monnot J.M., Williams R.C. Construction equipment telematics. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2011; 137(10):793-796. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000281
5. Komarova K.S., Komarova N.D. Multikoptera in monitoring of building sites. *University Science*. 2016; 1(1):70-73. (rus.).
6. Yurchenko R.A., Toporov A.V., Ivanov V.E., Kropotova N.A. Developing solutions for air and ground unmanned monitoring for the prevention and liquidation of emergency situations. *Fire and Emergency Safety*. 2018; 2(9):121-132. (rus.).
7. Kumarapu K., Shashi M., Keesara V.R. UAV in construction site monitoring and concrete strength estimation. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2021; 49(3):619-627. DOI: 10.1007/s12524-020-01246-w
8. Aydin B., Yeon J., Oh E. A pilot study of UAVs in the construction sector: knowledge, attitudes, and practice. *Proceedings of the 2019 IISE Annual Conference*. 2019
9. Xu Y., Turkan Y., Karakhan A.A., Liu D. Exploratory study of potential negative safety outcomes associated with UAV-assisted construction management. *Construction Research Congress 2020*. 2020. DOI: 10.1061/9780784482865.129
10. Lagutenkov A., Zhiltsov A. Roboforum: designer of Arduino, exoskeletons and UAVs. *BIT. Business & Information technologies*. 2018; 4(77):8-10. (rus.).
11. Pliyev R.O. UAVs as source of opportunities for logistics in the future. *Young Scientist*. 2016; 13-1(117):84-85. (rus.).
12. Melnikova T.E., Adullina Z.M., Stepanova I.S. Prospects of development of autonomous cargo vehicles in Russia taking into account foreign experience. *Trend of Development of Science and Education*. 2021; 73-2:98-101. DOI: 10.18411/lj-05-2021-70 (rus.).
13. Bogonostsev A.L., Papkova M.D. Assessment of efficiency of introduction of innovations in construction. *Bulletin of the Southern Russian State Technical University. Series: Social and Economic Sciences*. 2012; 5:110-112. (rus.).
14. Belyayev S.V., Rodionova E.I. Methodical assessment of innovations efficiency in ecoconstruction. *Innovative Economy: Prospects of Development and Improvement*. 2017; 7(25):160-164. (rus.).
15. Kulikova N.N. Assessment of innovations efficiency. *Innovative Development of Economy*. 2012; 2(8):144-147. (rus.).
16. Vasilyeva E.Yu. Comprehensive approach to the assessment of the innovative project attractiveness. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2019; 11(112):698-703. (rus.).
17. Vasilyeva E.Yu. Management of the innovative project efficiency in the conditions of risk. *Economy and Business*. 2019; 12(113):628-634. (rus.).
18. Vasilyeva E., Krupnov Y. Development of the methodological approach to the comprehensive assessment of the innovative project effectiveness. *E3S Web of Conferences*. 2020; 164:10037. DOI: 10.1051/e3sconf/202016410037
19. Mezentsева E.S. Innovative effects of digital transformation of industrial enterprises. *Regional Economics: Theory and Practice*. 2022; 20(4):659-677. DOI: 10.24891/re.20.4.659
20. Zhang X., Wang Y., Hao M., Wu L., Yin H. Effectiveness analysis of optimized uav swarm construction based on task. *Proceedings of 2021 International Conference on Autonomous Unmanned Systems (ICAUS 2021)*. 2022; 1797-1804. DOI: 10.1007/978-981-16-9492-9\_177
21. Moud H.I., Shojaei A., Flood I. Monte Carlo based risk analysis of unmanned aerial vehicle flights over construction job sites. *Proceedings of 8th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*. 2018. DOI: 10.5220/0006868804510458
22. Hyun L.S., Wook L.D., Koo J.K., Lee T.S. Analysis of economical validity for implementation of telematics in construction fields. *Journal of the Korean society for railway*. 2005; 8(5).
23. Sidorov M.N. Assessment of innovations efficiency over labour efficiency. *Rationing and Wages in Industry*. 2015; 7:15-22. (rus.).
24. Maeda S., Ye Y. Study on effectiveness of social distancing equipment at construction sites. *Ergonomics & Human Factors 2021*. 2021. URL: <https://eprints.soton.ac.uk/455998/>
25. Khalid M., Namian M., Behm M. Safety implications of using UAVs in construction: An ethical perspective. *Proceedings of the Joint CIB W099 & W123 International Conference 2021*. 2021.

*Received June 4, 2022.*

*Adopted in revised form on June 19, 2022.*

*Approved for publication on June 19, 2022.*

**B I O N O T E S :** **Yuri O. Bakrunov** — Doctor of Economic Sciences, Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 267556, ResearcherID: B-4075-2016, ORCID: 0000-0002-8288-7017; ybakrunov@yandex.ru;

**Elena Yu. Vasilyeva** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 702671, Scopus: 57192662530, ResearcherID: AAD-1693-2019, ORCID: 0000-0001-7797-1954; elena.chibisova\_metr@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Yuri O. Bakrunov — collecting of the material, general conclusions, scientific editing of the text of the article.*

*Elena Yu. Vasilyeva — idea, collecting of the material, material processing, writing of the article, total conclusions.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

# ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

## СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

**Имя Отчество Фамилия<sup>1</sup>, Имя Отчество Фамилия<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> Место работы второго автора; город, страна

\* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

## АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

**Благодарности.** Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

**Ключевые слова** – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

**Основной текст научной статьи**, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

## РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте). Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

### Образец:

**Рис. 1.** Пример рисунка в статье

**Figure 1.** Example of article image

**Табл. 1.** Пример таблицы в статье

**Table 1.** Example of table for article

## ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин ( $A$ ,  $F$ ,  $b$  и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ( $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

**Имя, Отчество, Фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

## СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

### **Образец:**

Вклад авторов:

**Фамилия И.О.** — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

**Фамилия И.О.** — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

**Фамилия И.О.** — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

**Фамилия И.О.** — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

# КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

## ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

**Введение** (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

**Материалы и методы** (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

**Результаты** (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

**Заключение** (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

## КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

### Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

### Образец:

#### Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

#### Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

**Книги до трех авторов:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель\*, Год издания; Общее количество страниц.

### Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

**Книги более трех авторов:** Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

**Статья в печатном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том\* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

### Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

**Статья в электронном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том\* (Выпуск): Страницы. URL.

### Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: [http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03\\_03\\_2017.pdf](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](http://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

## 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 Фамилия<sup>1</sup>, Имя Отчество Фамилия<sup>2</sup>...**

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> 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. Фамилия<sup>1</sup>, И.О. Фамилия<sup>2</sup>...** на английском языке

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

<sup>2</sup> Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

\* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

**Abstract** (200–250 слов)

**Introduction:** text, text, text.

**Materials and methods:** text, text, text.

**Results:** text, text, text.

**Conclusions:** text, text, text.

**Key words:** text, text, text.

**Acknowledgements:** text, text, text.

**Corresponding author:** Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

## ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

**Литературный обзор.** Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

**Оформляется на русском и английском языках.**

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

**Пример оформления:**

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

### REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Оформляются на русском и английском языках.**

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

*Пример:*

Артемова С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

*Пример:*

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Сведения об авторах* на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

**Bionotes:** **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

**Contribution of the authors:** Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

**ВНИМАНИЕ!** Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.



