

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 18 Выпуск 2/2023
Vol. 18 Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

Том 18. Выпуск 2
2023

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

Сквозной номер 171

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

Volume 18. Issue 2
2023

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 23-93
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	22.02.2023.
Подписан в свет	28.02.2023.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 18,36. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 80

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Станислав Емлоло, д-р техн. наук, проф., зав. каф. сопротивления материалов, теории упругости и пластичности,

Варшавский технологический университет, инженерно-строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Дизайн и верстка: *Ольга Григорьевна Горюнова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рашид Абдуллович Мангушев, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего обра-

зования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	22.02.2023

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2023

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, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

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

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Д.Е. Ушаков, Д.В. Карелин

Оценка влияния распределения плотности функций на формирование пассажиропотока метрополитена 165

В.М. Чекмарёв

Этапы эволюции подмосковной усадьбы Глинки Я.В. Брюса по материалам историко-архитектурных и натуральных исследований 178

А.Б. Бодэ, И.В. Воеводин, Т.В. Жигальцова

Деревянные клетские храмы Нижегородского Заволжья. Новые типологические исследования 192

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

А.Р. Туснин, М.П. Бергер

Зависимость коэффициента динамичности от жесткости ферм при разных видах локальных разрушений 202

А.Л. Невзоров, Г.Ю. Ивахнова

Воздействие на ход вторичной консолидации торфа путем его дегидратации с помощью высокодисперсной глины 218

В.В. Тур, А.П. Воробей

Сопротивление срезу самонапряженных элементов без поперечного армирования с продольными стержнями из полимерных композитов. Верификация предложенной расчетной модели 230

О.А. Туснина

Расчетное сопровождение реконструкции каркасов действующих металлургических цехов 241

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.В. Довыденко, А.А. Лунёв

Использование фосфогипса в сфере дорожного строительства: потенциал и проблемы 254

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Н. Ларионов, А.В. Приходько

Развитие внедрения технологий информационного моделирования при реализации жилищных инвестиционно-строительных проектов. 270

Д.В. Топчий

Организационно-технические решения по обеспечению качества строительно-монтажных работ на различных этапах жизненного цикла объекта строительства 283

А.К. Орлов, В.А. Болгов

Прогноз стоимости основных строительных материалов в условиях неопределенности: методика и практика 293

Требования к оформлению научной статьи 304

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Dmitriy E. Ushakov, Dmitriy V. Karelin

Evaluating the impact of function density distribution on metro passenger flows. 165

Vladimir M. Chekmaryov

Stages of evolution of the Glinka manor near Moscow, developed by Ya.V. Bruce on the basis of historical, architectural and field studies 178

Andrey B. Bode, Ilya V. Voevodin, Tatiana V. Zhigaltsova

Square-shaped wooden churches in Zavolzhsky District of the Nizhny Novgorod Region. New typological studies. 192

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

Alexander R. Tusnin, Maria P. Berger

Dependence of the dynamic coefficient on rigidity of trusses in case of versatile local failures. 202

Alexander L. Nevzorov, Galina Yu. Ivakhnova

Effect of clay with high water adsorption capacity on process of secondary consolidation of peat. 218

Viktar V. Tur, Aliaksandr P. Varabei

Shear resistance of self-stressed elements without web reinforcement and with longitudinal bars made of polymer composites. Experimental studies. Verification of the proposed design model 230

Olga A. Tusnina

Analysis of frames of operating metallurgical shops under reconstruction 241

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Anastasiya V. Dovydenko, Aleksandr A. Lunev

Using phosphogypsum in roadbuilding: the potential and problems. 254

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Arkady N. Larionov, Anton V. Prikhodko

Further introduction of information modelling technologies in the course of implementation of investment projects in the field of housing construction 270

Dmitry V. Topchiy

Managerial and engineering solutions made to ensure the quality of construction and installation work at various stages of the life cycle of a construction facility 283

Alexandr K. Orlov, Vladimir A. Bolgov

Forecasting prices for the main building materials in a context of uncertainty: method and practice. 293

Requirements for research paper design 304

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 656.072:519.237.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.165-177

Оценка влияния распределения плотности функций на формирование пассажиропотока метрополитена

Дмитрий Евгеньевич Ушаков, Дмитрий Викторович Карелин

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин);
г. Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается распределение плотности жилой и деловой функций относительно пешей доступности станций метрополитена для определения их взаимосвязи с годовым пассажиропотоком метрополитена. Цель исследования — выявить общие зависимости, характерные для региональных городов: Новосибирск, Екатеринбург, Казань, Нижний Новгород, Самара. Понимание зависимостей, формирующих пассажиропоток метрополитена, позволит установить оптимальные стратегии развития внеуличного транспорта в региональных городах.

Материалы и методы. Используются данные из открытых источников. Сведения по годовому пассажиропотоку метрополитенов получены от организаций, эксплуатирующих метрополитен, а также Международной ассоциации «Метро». Для оценки взаимосвязи применялся метод регрессионного анализа. Подготовка и визуализация информации выполнялась при помощи QGIS и Python.

Результаты. Выявлена положительная корреляция плотности жилой площади и годового пассажиропотока метрополитена при суммарной оценке всех городов. При оценке деловой функции установлено, что наибольшая концентрация числа организаций в городах соответствует их административным центрам, что можно считать центральным деловым районом. Определена отрицательная корреляция среднего расстояния от всех станций метрополитена до административного центра города (АЦГ) и железнодорожного (ж/д) вокзала от годового пассажиропотока метрополитена. Мультирегрессионный анализ показал, что годовой пассажиропоток метрополитена для всех городов определяется плотностью жилой площади в пешей доступности станций метрополитена и средним расстоянием от станций метрополитена до АЦГ и ж/д вокзала на 69–90 %. При этом независимые переменные между собой не мультиколлинеарны.

Выводы. Получена значимая зависимость годового пассажиропотока метрополитена от жилой и деловой функций. Данные результаты описывают зависимость, характерную для всех региональных городов, имеющих метрополитен. Сведения могут быть применены для оценки перспективы развития внеуличного транспорта в региональных городах России при актуализации генеральных планов. Направлением дальнейшего исследования является оценка величины вклада жилой функции в формирование пассажиропотока метрополитена отдельно по каждому радиусу пешей доступности станций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метрополитен, пассажиропоток, регрессионный анализ, жилая функция, деловая функция, корреляция, пешеходная доступность, региональные города

Благодарности. Авторы выражают благодарность Международной ассоциации «Метро», ЕМУП «Екатеринбургский метрополитен», МУП «Новосибирский метрополитен» и МП г. о. Самара «Самарский метрополитен» за предоставление исходных данных; М.А. Пономареву за сбор данных по организациям городов; а также рецензентам за проделанную работу по улучшению качества материала.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ушаков Д.Е., Карелин Д.В. Оценка влияния распределения плотности функций на формирование пассажиропотока метрополитена // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 165–177. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.165-177

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Евгеньевич Ушаков, u_dmitrii@mail.ru.

Evaluating the impact of function density distribution on metro passenger flows

Dmitriy E. Ushakov, Dmitriy V. Karelin

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin); Novosibirsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The distribution of residential and business functions density in relation to walking distances to metro stations was considered to determine their relationship with annual metro passenger flows. The aim of the study was to identify common dependencies typical for regional cities, including Novosibirsk, Ekaterinburg, Kazan, Nizhny Novgorod, and Samara.

Understanding dependencies that determine metro passenger flows will help to identify optimal strategies for development of offstreet transport in regional cities.

Materials and methods. Open source data were used. Data on annual passenger metro traffic were provided by metro operators and the International Metro Association. The method of regression analysis was used to evaluate the relationship. The information was prepared and visualized using QGIS and Python.

Results. A positive correlation was identified between the density of residential areas and annual metro passenger flows as a result of the total evaluation of all cities. When evaluating the business function, the authors found that the greatest concentration of the number of corporate entities in the cities was focused in their administrative centres, or central business districts. A negative correlation between the average distance from all metro stations to administrative centres of cities (ACC), railway stations and annual metro passenger traffic was identified. Multiregression analysis showed that in all cities annual metro passenger flows were 69–90 % determined by the density of residential areas within walking distance of metro stations and the average distance from metro stations to ACC and the railway station. Independent variables are not multicollinear with each other.

Conclusions. A strong dependence between annual metro passenger flows and residential or business functions was obtained. These results describe the dependence characteristic of all regional cities that have metros. This information can be used to evaluate the prospects for the development of offstreet transport in regional cities of Russia in the process of updating their master plans. The direction for further research is to evaluate the contribution of the residential function to metro passenger flows separately for each radius of walking distance of stations.

KEYWORDS: metro, passenger flow, regression analysis, residential function, business function, correlation, walkability, regional cities

Acknowledgements. The authors would like to thank Metro International Association, Ekaterinburg Metro, Novosibirsk Metro and Samara Metro for providing source data, and M.A. Ponomarev for collecting data on urban companies, as well as reviewers for the work performed to improve the draft article.

FOR CITATION: Ushakov D.E., Karelin D.V. Evaluating the impact of function density distribution on metro passenger flows. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):165-177. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.165-177 (rus.).

Corresponding author: Dmitriy E. Ushakov, u_dmitrii@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие внеуличного транспорта имеет важное значение для формирования транспортной системы города. Данный тип транспорта обладает преимуществами по сравнению с транспортом, не имеющим выделенной полосы движения [1]. Это дает возможность передвигаться с высокой по меркам города скоростью. Рассмотрены метрополитены в региональных городах России.

Метрополитен сохраняется в генеральных планах городов как один из видов транспорта. В ряде городов при актуализации генерального плана происходит перенос сроков реализации метрополитена, но не его исключение. В условиях ограниченности ресурсов и наличия интереса региональных городов к развитию системы метрополитена существует необходимость оценки факторов, которые обеспечивают востребованность пассажирами метрополитена, а также их количественное выражение. Это знание позволит лучше прогнозировать результат вложения денег, направленных на совершенствование метрополитена.

В отечественной практике схемы развития городского транспорта и метрополитена, в частности, выполняются по заказу местных органов власти. Полученные результаты, как правило, не публикуются, что осложняет проведение исследований. Органи-

зации, осуществляющие данные схемы, по своему усмотрению могут делиться полученными результатами^{1,2}. Основным методом исследования являются «матрицы корреспонденции». Для подачи заявки на инфраструктурные кредиты городами Самара и Нижний Новгород выполнялись технико-экономические обоснования. По материалам для г. Самары развитие метрополитена предполагается посредством строительства новых станций в центре города и тем самым включения его в область пешей доступности метрополитена, а также уплотнения жилой застройки вблизи существующих станций метрополитена через механизм комплексного развития территорий. Отечественными исследователями проводились работы по комплексной оценке транспорта [2–6].

В зарубежной литературе при оценке формирования пассажиропотока метрополитена выделяют ряд влияющих факторов: жилая, коммерческая функции [7–9], пешеходная доступность городской среды [10], увеличение длины линии метрополитена [11], расстояние пешей доступности станции [12] и т.д. Влияние каждого из факторов и их состав отличаются от исследования к исследованию. Некоторые авторы рассматривают возможность применения концепции развития, ориентированного на общественный транспорт (Transit-oriented development — TOD) [7, 13, 9, 14]. В зарубежных публикациях отмечается, что на спрос внеуличного транспорта

¹ Лаборатория градопланирования им. М.Л. Петровича, Расчет пассажирских потоков по станциям второй линии метрополитена в г. Екатеринбурге. URL: <https://labgrad.ru/projects/ekbmetro2020>

² Лаборатория градопланирования им. М.Л. Петровича, Расчет пассажирских потоков по станциям первой линии метрополитена в г. Красноярске. URL: <https://labgrad.ru/projects/krasnoyarskmetro2020>

в большей степени влияет близость станции к месту работы, чем жилья [15]. Большинство исследований оценивают «срез» данных на временном промежутке от недели до месяца, без ретроспективной оценки зависимостей формирования пассажиропотока метрополитена.

Авторами ранее проведено исследование по оценке формирования пассажиропотока метрополитенов в региональных городах. Для Самары и Нижнего Новгорода не установлена связь пассажиропотока метрополитена с жилой функцией в области пешей доступности станций всей системы метрополитена. При этом для городов Новосибирск, Екатеринбург и Казань такая зависимость существует [16].

В результате изучения зарубежных и отечественных трудов определена проблема отсутствия единого перечня факторов, образующих пассажиропоток метрополитена, которые характерны для всех городов, имеющих систему метрополитена.

Цель исследования — выявить характерный перечень функций территории, а также распределение их плотности, которые формируют пассажиропоток метрополитена в региональных городах России.

Под плотностью функции территории понимается величина концентрации данной функции в пределах рассматриваемой территории. Понимание зависимостей, создающих пассажиропоток метрополитена, позволит определить оптимальные стратегии развития внеуличного транспорта в региональных городах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ проведен для региональных городов России, в которых эксплуатируется метрополитен: Новосибирск, Екатеринбург, Казань, Нижний Новгород, Самара.

Объект исследования — система метрополитена в целом, т.е. все станции метрополитена, действующие в рассматриваемый период времени, а также область вокруг станций, находящаяся в радиусе пешей доступности.

В качестве методов оценки наличия взаимосвязи между величинами использованы парный и мультирегрессионный анализы [17, 18]. Регрессионный метод оценки взаимосвязи между величинами широко применяется зарубежными авторами [8, 9, 11, 12, 19, 20]. Регрессионный анализ устанавливает только наличие или отсутствие взаимосвязи между величинами, но не причинно-следственную связь между ними. На основе рассмотренных отечественных и зарубежных исследований можно сделать вывод, что наличие причинно-следственной связи между территорией города и формированием пассажиропотока общественного транспорта, который ее обслуживает, является установленным фактом и не подвергается сомнению.

Источники данных: сведения по жилой функции получены из открытого источника³. Информация по организациям взята из открытого источника Rusprofile⁴. Геопозиционирование объектов выполнено с помощью языка программирования Python, библиотека geopandas, функция geocode. Координаты размещения станций и линий метрополитенов получены из открытого источника OpenStreetMap⁵ через программный комплекс QGIS.

В работе приняты следующие радиусы шаговой доступности от станций метрополитена: 0–400, 0–800, 0–1200, 400–800, 800–1200 м.

Годовой пассажиропоток метрополитена рассматривался для всей линии метрополитена в целом за год. Хронологический промежуток с 2005 по 2019 гг., 2020 и 2021 гг. не рассматривались в связи с тем, что в этот период осуществлялись мероприятия по ограничению распространения COVID-19, что повлияет на достоверность результатов.

В работе выполнена оценка влияния на пассажиропоток (зависимая переменная) следующих независимых переменных:

1. Жилая функция в радиусе пешей доступности станций метрополитена.

Оценка проводилась на основе плотности жилой застройки, м²/га, в радиусе пешей доступности станций метрополитена. Плотность определялась как количество квадратных метров жилой площади всех зданий в радиусе пешей доступности всех станций метрополитена, работающих в рассматриваемый период времени, поделенное на площадь территории в рассматриваемом радиусе пешей доступности всех станций метрополитена на текущий год.

2. Деловая функция.

Деловая функция оценивалась через количество организаций, размещенное на исследуемой территории. При этом не учитывались индивидуальные предприниматели в связи с тем, что место официальной регистрации соответствует адресу проживания физического лица, а не фактическому месту размещения организации в городе. Деловая функция анализировалась в виде следующих независимых переменных:

- количество организаций, которое приходится на территорию в радиусах пешей доступности всех станций метрополитена, шт./га;
- среднее расстояние от каждой станции метрополитена до административных центров городов и железнодорожных вокзалов. Данный параметр вытекает из оценки плотности размещения организаций для территории города в целом. Подробное объяснение появления и использования этого параметра для оценки пассажиропотока метрополитена объясняется в разделе «Результаты исследования».

³ Фонд развития территорий. URL: <https://www.reformagkh.ru/>

⁴ URL: <https://www.rusprofile.ru/>

⁵ OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org/>

При оценке влияния на пассажиропоток каждой независимой переменной в отдельности использовался парный регрессионный анализ. Для совместной оценки влияния независимых переменных применялся мультирегрессионный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка плотности жилой функции указывает на наличие линейной зависимости по отдельным

городам, а также при их совместном рассмотрении (рис. 1).

Плотность жилой функции отложена по оси абсцисс и преимущественно возрастает — годы, указывающие соответствующую плотность, смещаются вправо (рис. 1). Отдельные точки смещаются влево (годы идут не по порядку), что говорит о понижении плотности. Данные точки соответствуют годам ввода новых станций. В связи с вводом новых станций увеличивается пешая область охвата всей системы

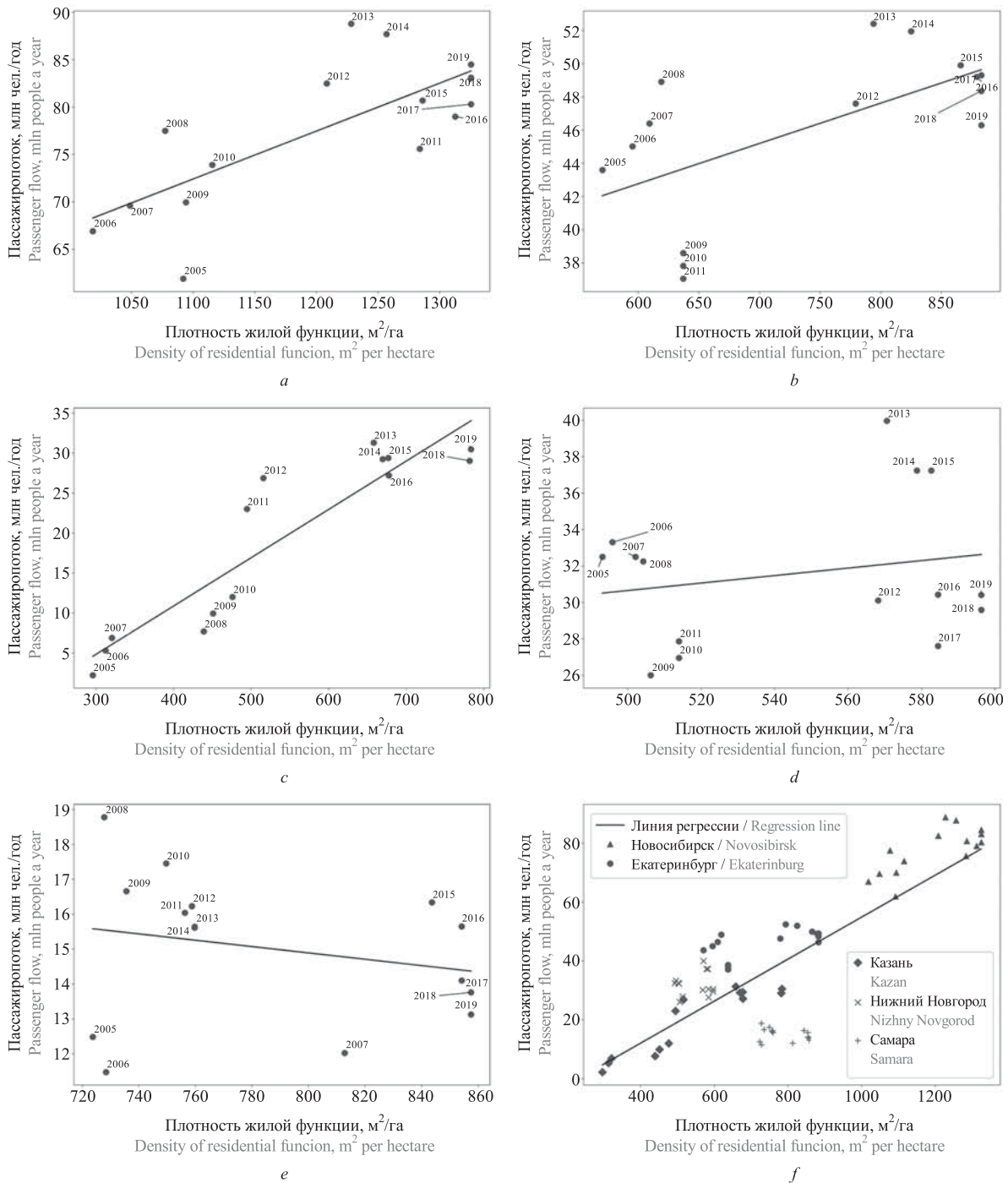


Рис. 1. График линейной регрессии с диаграммой рассеяния для радиуса шаговой доступности от станций метрополитена 0–800 м по городам: Новосибирск (а); Екатеринбург (б); Казань (с); Нижний Новгород (д); Самара (е); общий тренд (ф)
 Fig. 1. A linear regression diagram with a scatter diagram for the 0–800 m walkability radius of stations by cities: Novosibirsk (a); Ekaterinburg (b); Kazan (c); Nizhny Novgorod (d); Samara (e); general trend (f)

метрополитена, что изменяет плотность жилой функции. Уменьшение плотности жилой функции указывает на ее низкую величину в области пешей доступности новой станции метрополитена.

По полученным коэффициентам (табл. 1) формируется уравнение линейной регрессии:

$$y(x) = b_0 + b_1x, \quad (1)$$

где b_0 — коэффициент регрессионной модели, не имеет физического смысла; b_1 — коэффициент уравнения, показывающий изменение среднего значения пассажиропотока при изменении жилой площади зданий на 1 м^2 , в соответствующем радиусе охвата станций метрополитена.

Коэффициент детерминации R^2 демонстрирует, насколько пассажиропоток метрополитена опреде-

ляется жилой площадью зданий в радиусах пешей доступности.

Отсутствие зависимости для городов Нижний Новгород и Самара соответствует ранее проведенному исследованию авторов [16]. Однако совместная оценка региональных городов показывает, что плотность жилой функции формирует общий тренд (рис. 1). Данные по Самаре выглядят аномально, но при этом уравнение регрессии и коэффициенты являются значимыми, а величина полученного коэффициента корреляции указывает на наличие взаимосвязи. С целью компенсировать недостатки учета только плотности жилой функции далее рассматривается влияние деловой функции. Количество организаций в пешей доступности от станций метрополитена представлено в табл. 2.

Табл. 1. Результаты регрессионного анализа по плотности жилой функции

Table 1. Results of regression analysis based on residential function density

Коэффициент Coefficient	Радиус пешей доступности от станций метрополитена, м Walkability radius of stations, m				
	0–400	0–800	0–1200	400–800	800–1200
<i>г. Новосибирск / Novosibirsk</i>					
r	0,74	0,73	0,74	0,72	0,75
R^2	0,54	0,54	0,55	0,52	0,56
b_0	$1,4 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^7$
$P > t b_0$	0,404	0,302	0,168	0,222	0,056
b_1	$5,8 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^4$	$4,9 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^4$
$P > t b_1$	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001
<i>г. Екатеринбург / Ekaterinburg</i>					
r	0,65	0,62	0,65	0,61	0,68
R^2	0,42	0,39	0,42	0,38	0,46
b_0	$2,0 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$	$3,0 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$
$P > t b_0$	0,038	0,001	0,003	0,000	0,013
b_1	$3,7 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$
$P > t b_1$	0,009	0,013	0,009	0,015	0,006
<i>г. Казань / Kazan</i>					
r	0,88	0,92	0,91	0,94	0,84
R^2	0,78	0,85	0,83	0,88	0,71
b_0	$-1,7 \cdot 10^6$	$-1,3 \cdot 10^7$	$-2,8 \cdot 10^7$	$-1,9 \cdot 10^7$	$-4,0 \cdot 10^7$
$P > t b_0$	0,623	0,006	0,000	0,001	0,002
b_1	$5,3 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$	$8,0 \cdot 10^4$
$P > t b_1$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>г. Нижний Новгород / Nizhny Novgorod</i>					
r	0,36	0,21	0,20	0,16	0,18
R^2	0,13	0,04	0,04	0,03	0,03
b_0	$2,3 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$
$P > t b_0$	0,914	0,183	0,085	0,063	0,030
b_1	$4,9 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^4$
$P > t b_1$	0,187	0,452	0,485	0,566	0,515
<i>г. Самара / Samara</i>					
r	-0,66	-0,23	-0,10	-0,12	0,05
R^2	0,44	0,05	0,01	0,01	0,003
b_0	$4,4 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$

Коэффициент Coefficient	Радиус пешей доступности от станций метрополитена, м Walkability radius of stations, m				
	0–400	0–800	0–1200	400–800	800–1200
$P > t b_0$	0,000	0,019	0,042	0,026	0,070
b_1	$-3,4 \cdot 10^4$	$-0,9 \cdot 10^4$	$0,4 \cdot 10^4$	$-0,4 \cdot 10^4$	$0,2 \cdot 10^4$
$P > t b_1$	0,007	0,403	0,727	0,674	0,852
<i>Общий тренд / General trend</i>					
r	0,72	0,80	0,85	0,80	0,82
R^2	0,51	0,64	0,73	0,65	0,67
b_0	$-1,1 \cdot 10^7$	$-1,6 \cdot 10^7$	$-2,8 \cdot 10^7$	$-1,5 \cdot 10^7$	$-2,8 \cdot 10^7$
$P > t b_0$	0,074	0,002	0,000	0,003	0,000
b_1	$6,7 \cdot 10^4$	$7,1 \cdot 10^4$	$8,5 \cdot 10^4$	$6,8 \cdot 10^4$	$8,2 \cdot 10^4$
$P > t b_1$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Табл. 2. Количество организаций в пешей доступности от станций метрополитена в 2019 г.

Table 2. Number of companies within walking distance from metro stations in 2019

Город City	Радиус пешей доступности от станций метрополитена, м Walkability radius of stations, m		
	0–400	400–800	800–1200
Новосибирск / Novosibirsk	2670	5229	5251
Екатеринбург / Ekaterinburg	836	2222	3078
Казань / Kazan	1210	3259	3606
Нижний Новгород / Nizhny Novgorod	1052	2415	2309
Самара / Samara	593	1617	2053

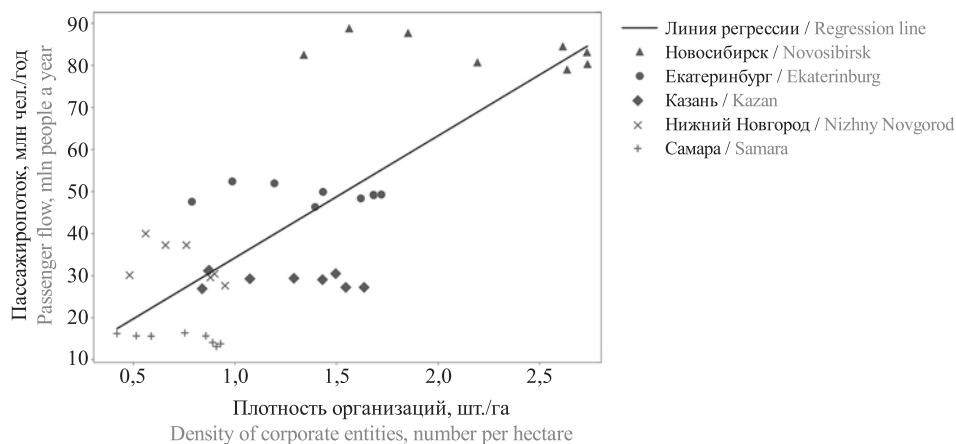


Рис. 2. График линейной регрессии с диаграммой рассеяния для радиуса 800 м за период с 2012 по 2019 гг.

Fig. 2. A linear regression diagram with a scatter diagram for the 800 m radius from 2012 to 2019

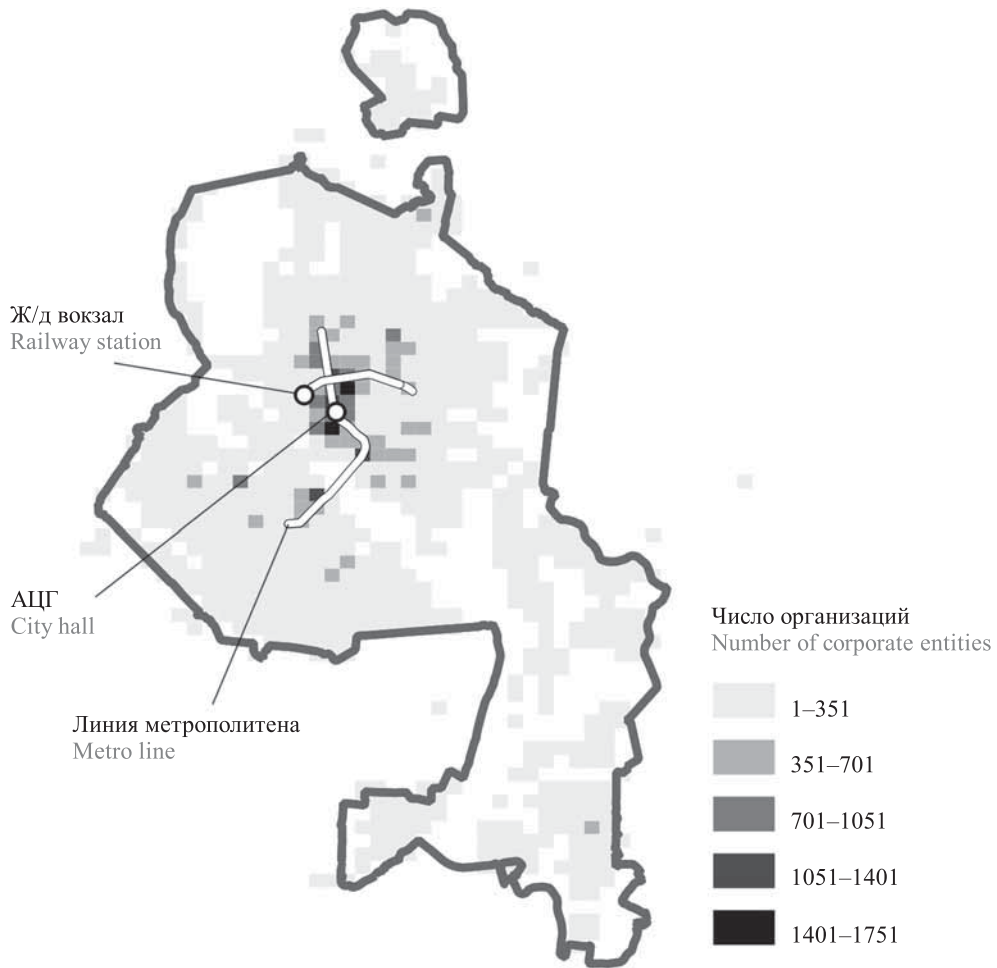
Оценка по городам взаимосвязи плотности всех организаций от пассажиропотока показывает наличие значимой зависимости с 2010 г. На графике рассеяния прослеживается различие от города к городу (рис. 2).

По каждому городу в отдельности не прослеживается наличие зависимости плотности организаций от пассажиропотока метрополитена. При этом полу-

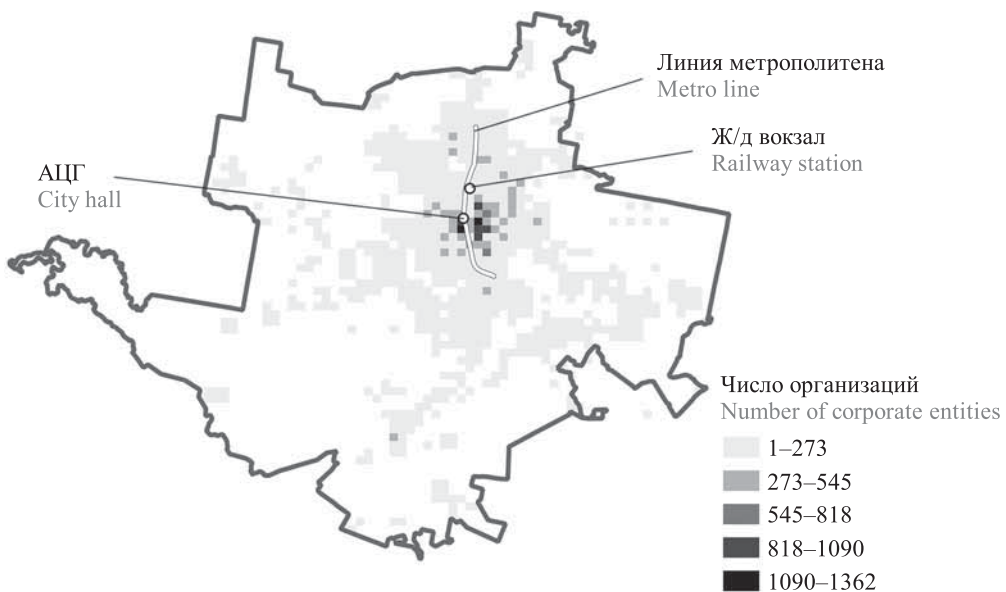
ченный тренд имеет значительный разброс значений и не объясняет имеющиеся различия по городам. Одна и та же плотность числа организаций может соответствовать пассажиропотоку 15 и 52 млн человек. Отсутствие зависимости плотности деловой функции в радиусе пешей доступности метрополитена по городам в отдельности может быть следствием неполноты данных по организациям. Чтобы из-

бежать ошибки в связи с возможным отсутствием данных в ретроспективе выполнена оценка плотности размещения организаций в городе на 2019 г. Для оценки плотности размещения организаций терри-

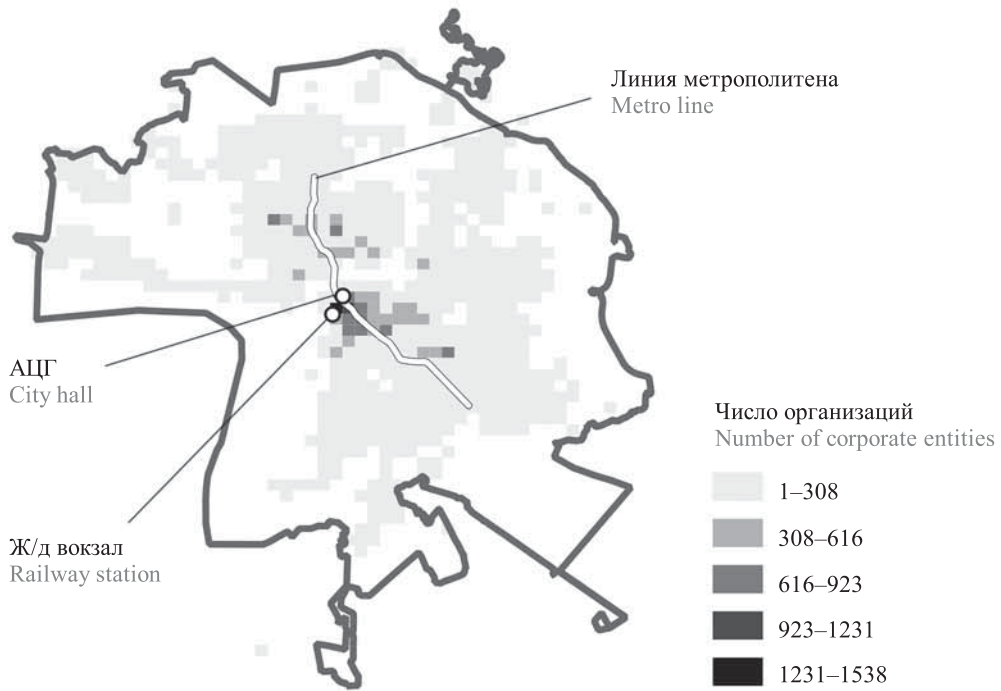
тория каждого города была поделена на квадраты со стороной 650,0 м. Далее проведена оценка количества организаций, соответствующая каждому квадрату (рис. 3).



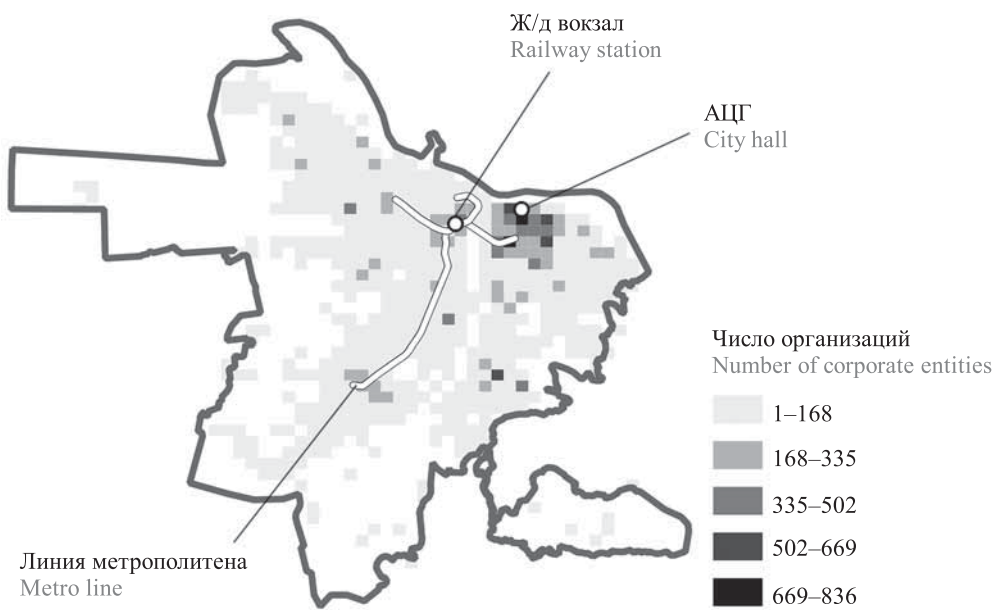
a



b



c



d

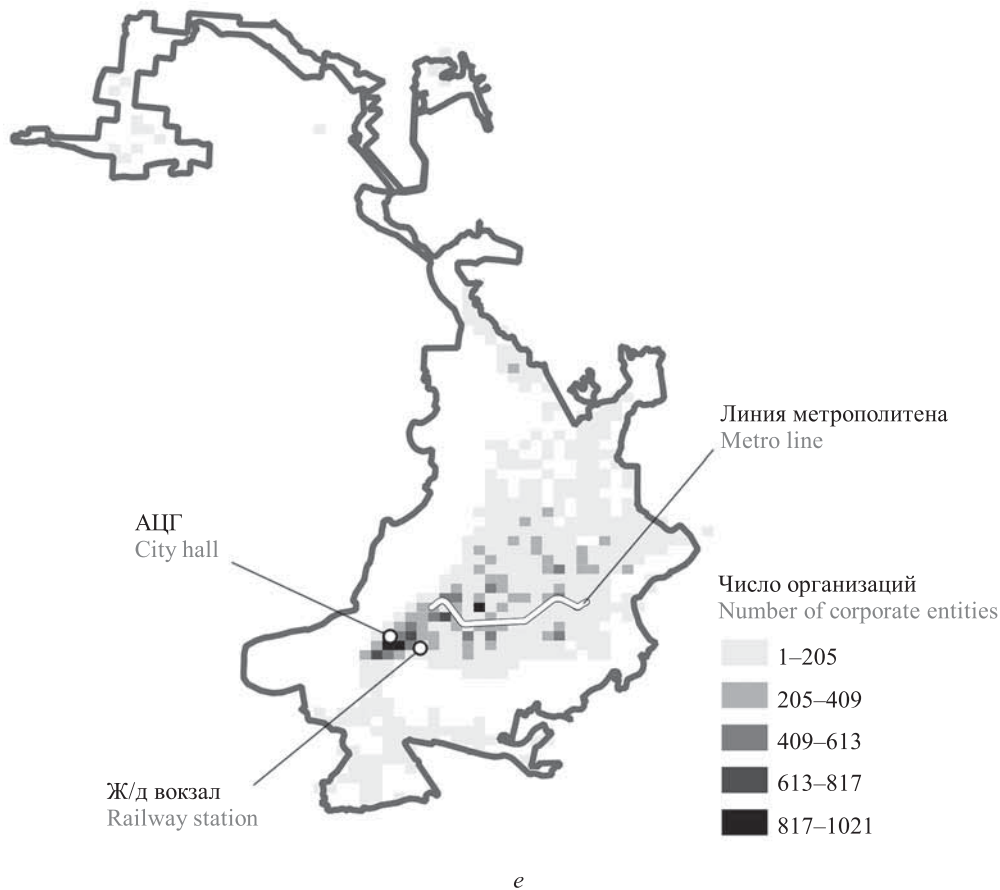


Рис. 3. Карта плотности размещения организаций на 2019 г. по городам: Новосибирск (а); Екатеринбург (b); Казань (с); Нижний Новгород (d); Самара (e)

Fig. 3. Density map of corporate entities in 2019 in Novosibirsk (a); Ekaterinburg (b); Kazan (c); Nizhny Novgorod (d); Samara (e)

Оценка плотности размещения организаций показывает, что их наибольшая концентрация приближена к положению административных центров городов (АЦГ). В качестве параметра, который характеризует влияние деловой функции, принято среднее расстояние от каждой станции до АЦГ и железнодорожных (ж/д) вокзалов как основных точек притяжения. Для данного параметра прослеживается линейная зависимость (рис. 4).

Оценка регрессионной зависимости по городам по удаленности АЦГ и ж/д вокзала является значимой на отрезке с 2007 по 2019 гг. (коэффициент корреляции — 0,75). Коэффициенты и уравнение парной линейной регрессии также значимы. Данная независимая переменная не коррелирует с плотностью жилой застройки, коэффициент корреляции менее 0,75. В связи с отсутствием мультиколлинеарности эти переменные можно использовать в одном уравнении.

Совместный учет влияния жилой функции (для различных радиусов пешей доступности) и среднего расстояния от каждой станции метрополитена до АЦГ и ж/д вокзала показывает, что полученные уравнения мультирегрессии, а также их коэффициенты являются значимыми (табл. 3).

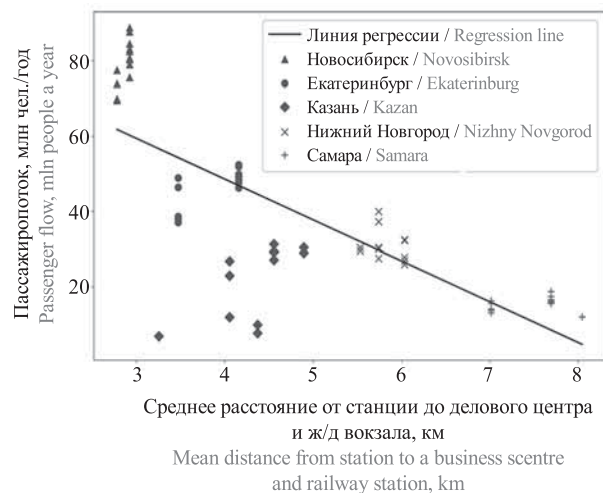


Рис. 4. Диаграмма рассеяния и график линейной регрессии среднего расстояния от каждой станции до административных центров и железнодорожных вокзалов для периода с 2007 по 2019 гг.

Fig. 4. Linear regression diagram a scatter diagram of the mean distance from each metro station to office centres and railway stations in 2007 to 2019

Табл. 3. Результаты мультирегрессионного анализа по городам: Новосибирск, Екатеринбург, Казань, Нижний Новгород, Самара для независимых переменных: среднее расстояние от каждой станции метрополитена до АЦГ и ж/д вокзала; плотность жилой площади

Table 3. Regression analysis for independents variables in Novosibirsk, Ekaterinburg, Kazan, Nizhny Novgorod, Samara. Mean distance from all metro stations to railway stations and the office building, and density of residential areas

Коэффициент Coefficient	Радиус пешей доступности от станций метрополитена, м Walkability radius of stations, m				
	0–400	0–800	0–1200	400–800	800–1200
R^2	0,90	0,84	0,80	0,80	0,69
b_0	$3,6 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^7$	$7,9 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^6$
$P > t b_0$	0,000	0,000	0,330	0,000	0,862
b_1	$6,0 \cdot 10^4$	$5,6 \cdot 10^4$	$6,7 \cdot 10^4$	$5,2 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^4$
$P > t b_1$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
b_2	$-8,7 \cdot 10^6$	$-6,6 \cdot 10^6$	$-4,6 \cdot 10^6$	$-6,0 \cdot 10^6$	$-3,3 \cdot 10^6$
$P > t b_2$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012

Полученная зависимость выражается уравнением мультирегрессии:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2, \quad (2)$$

где b_0 — коэффициент регрессионной модели, не имеет физического смысла; b_1 — коэффициент уравнения, показывающий изменение среднего значения пассажиропотока метрополитена при изменении жилой площади зданий на 1 м², в соответствующем радиусе пешей доступности; b_2 — коэффициент уравнения, показывающий изменение среднего значения пассажиропотока при изменении среднего расстояния от всех станций метрополитена до административного центра и ж/д станций на 1 км в соответствующем радиусе пешей доступности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнена оценка распределения плотности жилой и деловой функций относительно пешей доступности станций метрополитена для определения их взаимосвязи с годовым пассажиропотоком метрополитена. Исследование было направлено на выявление характерного для региональных городов России перечня функций территории, а также распределение их плотности, которые формируют пассажиропоток метрополитена. Для городов Самары и Нижнего Новгорода присуще снижение пассажиропотока в отличие от других региональных городов России, имеющих систему метрополитена.

Оценка формирования пассажиропотока метрополитена через плотность жилой функции в пешей доступности станций показывает, что плотность жилой функции является:

- значимой для городов Новосибирск, Екатеринбург, Казань;
- незначимой для городов Нижний Новгород и Самара;

- значимой при совместном рассмотрении региональных городов России, имеющих метрополитен.

Наличие общего тренда является показателем значимости жилой функции при формировании пассажиропотока метрополитена. При этом величина плотности жилой функции для Самары имеет низкую величину пассажиропотока по сравнению с другими городами (рис. 1). Это, а также незначимость жилой функции по городам Нижний Новгород и Самара указывает на недостаточность рассмотрения формирования пассажиропотока метрополитена только от жилой функции.

Среднее расстояние от каждой станции до АЦГ и ж/д вокзала, принятое в качестве показателя, описывающего распределение мест деловой активности, имеет близкие значения для городов Екатеринбург и Казань, но при этом различаются пассажиропотоки (рис. 4). Авторы предлагают следующее объяснение. Среднее расстояние характеризует двунаправленный процесс: удлинение сети с одной стороны увеличивает число пассажиров за счет включения в обслуживание новых территорий, а с другой — число новых пассажиров, приходящих с новых станций, уменьшается с увеличением затрат времени в пути до городского центра. В связи с тем, что метрополитен г. Казань был введен в эксплуатацию в 2005 г., расширение сети приводит преимущественно к увеличению пассажиров за счет включения большей территории города при небольшой удаленности от делового центра. Прочие города меньше подвержены колебанию данного параметра, так как они имеют устоявшийся пассажиропоток. В целом график характеризует различие от города к городу в фоновом пассажиропотоке (рис. 4). В зарубежных исследованиях станции, расположенные в центральных деловых районах, часто не включают в расчет, чтобы избежать искажения данных и учесть только влияние жилья и т.д. В случае с региональными городами

России центральный деловой район может быть одним из немногих крупных аттракторов в городе.

В результате оценки формирования пассажиропотока метрополитена по городам Новосибирск, Екатеринбург, Казань, Нижний Новгород и Самара получено, что годовой пассажиропоток определяется средним расстоянием от каждой станции до АЦГ и ж/д вокзала и плотностью жилой площади зданий в соответствующих радиусах пешей доступности на 69–90 %. Это говорит о том, что АЦГ и ж/д вокзал являются основными центрами притяжения, формирующими постоянный спрос в городах. Данные выводы объясняют падение пассажиропотока в городах Самара и Нижний Новгород: для Самары — АЦГ и ж/д вокзал, а для Нижнего Новгорода АЦГ находится вне радиуса пешей доступности станций метрополитена (1200 м). Также можно сделать вывод, что наличие сети метрополитена не приводит к естественной концентрации основных мест притяжения в радиусах пешей доступности станций. Прочие факторы, такие как подвоз наземным транспортом, удобство пешеходной среды и т.д., неучтенные в регрессионном управлении, составляют ошибку математической модели. Поскольку уравнение мульт-

тирегрессии и его коэффициенты значимы, влияние данных факторов является несущественным.

В результате исследования решается проблема отсутствия перечня факторов, формирующих пассажиропоток метрополитена, которые характерны для региональных городов России. Выявленные параметры планировочной структуры, характерные для региональных городов, имеющих метрополитен, описывают формирование годового пассажиропотока.

В настоящее время в городах Самара и Нижний Новгород планируется строительство станций метрополитена в центральной части города. В соответствии с результатами исследования это приведет к увеличению пассажиропотока метрополитенов в связи с уменьшением среднего расстояния от каждой станции метрополитена до АЦГ и ж/д вокзала.

Направлением дальнейшего исследования является оценка величины вклада жилой функции в формирование пассажиропотока метрополитена отдельно по каждому радиусу пешей доступности станций метрополитена при их суммарном рассмотрении. Планируется выполнить оценку на основе анализа главных компонент (РСА — principal component analysis).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вучик В.Р. Транспорт в городах, удобных для жизни / пер. с англ. А. Калинина под науч. ред. М. Блинкина. М. : Территория будущего, 2011. 574 с.
2. Бунеев В.М., Новоселов В.И. Пассажирский транспорт Новосибирска: Проблемы повышения эффективности и развития. Новосибирск : НГАВТ, 1999. 268 с.
3. Александр К.Э. Скоростной рельсовый транспорт в градостроительстве. М. : Стройиздат, 1985. 139 с.
4. Козлов П.И., Власов Д.Н. Оценка параметров качества обслуживания пассажиров в транспортно-пересадочных узлах // Вестник МГСУ. Т. 12. № 5 (104). С. 529–536. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.529-536
5. Смирнова Е.А. Метрополитен в структуре российских городов // Архитектура и строительство России. 2010. № 6. С. 16–25.
6. Смолова М.В. Типологическое многообразие сетей метрополитена как отражение пространственно-планировочной структуры города // Известия КГАСУ. 2017. № 3 (41). С. 75–86.
7. Nyunt T.K., Wongchavalidkul N. Evaluation of relationships between ridership demand and Transit-Oriented Development (TOD) indicators focused on land use density, diversity, and accessibility: A case study of existing metro stations in Bangkok // Urban Rail Transit. 2020. Vol. 6. Issue 1. Pp. 56–70. DOI: 10.1007/s40864-019-00122-2
8. Lin C., Wang K., Wu D., Gong B. Passenger flow prediction based on land use around metro stations: A case study // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 17. P. 6844. DOI: 10.3390/su12176844
9. An D., Tong X., Liu K., Chan E. Understanding the impact of built environment on metro ridership using open source in Shanghai // Cities. 2019. Vol. 93. Pp. 177–187. DOI: 10.1016/j.cities.2019.05.013
10. Nawrocki J., Nakagawa D., Matsunaka R., Oba T. Measuring walkability and its effect on light rail usage: A comparative study of the USA and Japan // WIT Transactions on The Built Environment. 2014. DOI: 10.2495/UT140261
11. Liu S., Yao E., Li B. Exploring urban rail transit station-level ridership growth with network expansion // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2019. Vol. 73. Pp. 391–402. DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.006
12. Gutierrez J., Cardozo O.D., Garcia-Palomes J.C. Transit ridership forecasting at station level: an approach based on distance-decay weighted regression // Journal of Transport Geography. 2011. Vol. 19. Issue 6. Pp. 1081–1092. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2011.05.004
13. Lee S., Yi C., Hong S. Urban structural hierarchy and the relationship between the ridership of the Seoul Metropolitan Subway and the land-use pattern of the station areas // Cities. 2013. Vol. 35. Pp. 69–77. DOI: 10.1016/j.cities.2013.06.010
14. Berawi M.A., Saroji G., Iskandar F.A., Ibrahim B.E., Miraj P., Sari M. optimizing land use allocation of Transit-Oriented Development (TOD) to

generate maximum ridership // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 9. P. 3798. DOI: 10.3390/su12093798

15. Liu S., Yao E., Yamamoto T. Does urban rail transit discourage people from owning and using cars? Evidence from Beijing, China // Journal of Advanced Transportation. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–11. DOI: 10.1155/2018/1835241

16. Ушаков Д.Е., Карелин Д.В. Оценка востребованности метрополитенов жителями в пешеходной доступности от станций // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. № 1. С. 1. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.1

17. Воскобойников Ю.Е. Эконометрика в Excel: парные и множественные регрессионные модели : учебное пособие. СПб. : Лань, 2016. 260 с.

18. Воскобойников Ю.Е. Построение регрессионных моделей в пакете MathCAD : учебное пособие. Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2009. 220 с.

19. Ozgur-Cevher O., Altintasi O., Tuydes-Yaman H. Evaluating the relation between station area design parameters and transit usage for urban rail systems in Ankara, Turkey // International Journal of Civil Engineering. 2020. Vol. 18. Issue 8. Pp. 951–966. DOI: 10.1007/s40999-020-00506-7

20. Zhang Q., Zhang Y.-J., Ding X., Wang Q.-P. Correlations between distribution of producer services and urban built environment in metro station areas: A case of Xi'an, China // Advances in Civil Engineering. 2022. Vol. 2022. Pp. 1–11. DOI: 10.1155/2022/6165563

Поступила в редакцию 20 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 31 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2023 г.

О Б АВТОРАХ: **Дмитрий Евгеньевич Ушаков** — аспирант кафедры градостроительства и городского хозяйства; **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**; 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; РИНЦ ID: 877619, Scopus: 57195469078; u_dmitrii@mail.ru;

Дмитрий Викторович Карелин — кандидат архитектуры, доцент, заведующий кафедрой градостроительства и городского хозяйства; **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**; 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; РИНЦ ID: 212418, Scopus: 57195479145; ggh@sibstrin.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vuchic V.R. *Transportation for livable cities*. Moscow, Territory of the Future, 2011; 574. (rus.).

2. Buneev V.M., Novoselov V.I. *Passenger transport in Novosibirsk: Problems of efficiency and development*. Novosibirsk, NGAVT Publ., 1999; 268. (rus.).

3. Alexander K.E. *High-speed rail in urban planning*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985; 139. (rus.).

4. Kozlov P.I., Vlasov D.N. Passenger service quality parameters assessment at transport interchange hubs. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(5):529-536. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.529-536 (rus.).

5. Smirnova E.A. Subway in the structure of Russian cities. *Architecture and Construction of Russia*. 2010; 6:16-25. (rus.).

6. Smolova M.V. Typological diversity of subway networks as a reflection of the spatial and planning structure of the city. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2017; 3(41): 75-86. (rus.).

7. Nyunt T.K., Wongchavalidkul N. Evaluation of relationships between ridership demand and Transit-Oriented Development (TOD) indicators focused on land

use density, diversity, and accessibility: A case study of existing metro stations in Bangkok. *Urban Rail Transit*. 2020; 6(1):56-70. DOI: 10.1007/s40864-019-00122-2

8. Lin C., Wang K., Wu D., Gong B. Passenger flow prediction based on land use around metro stations: A case study. *Sustainability*. 2020; 12(17):6844. DOI: 10.3390/su12176844

9. An D., Tong X., Liu K., Chan E. Understanding the impact of built environment on metro ridership using open source in Shanghai. *Cities*. 2019; 93:177-187. DOI: 10.1016/j.cities.2019.05.013

10. Nawrocki J., Nakagawa D., Matsunaka R., Oba T. Measuring walkability and its effect on light rail usage: A comparative study of the USA and Japan. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2014. DOI: 10.2495/UT140261

11. Liu S., Yao E., Li B. Exploring urban rail transit station-level ridership growth with network expansion. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2019; 73:391-402. DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.006

12. Gutierrez J., Cardozo O.D., García-Palomes J.C. Transit ridership forecasting at station

level: an approach based on distance-decay weighted regression. *Journal of Transport Geography*. 2011; 19(6):1081-1092. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2011.05.004

13. Lee S., Yi C., Hong S. Urban structural hierarchy and the relationship between the ridership of the Seoul Metropolitan Subway and the land-use pattern of the station areas. *Cities*. 2013; 35:69-77. DOI: 10.1016/j.cities.2013.06.010

14. Berawi M.A., Saroji G., Iskandar F.A., Ibrahim B.E., Miraj P., Sari M. Optimizing land use allocation of Transit-Oriented Development (TOD) to generate maximum ridership. *Sustainability*. 2020; 12(9):3798. DOI: 10.3390/su12093798

15. Liu S., Yao E., Yamamoto T. Does urban rail transit discourage people from owning and using cars? Evidence from Beijing, China. *Journal of Advanced Transportation*. 2018; 2018:1-11. DOI: 10.1155/2018/1835241

16. Ushakov D.E., Karelin D.V. The evaluation of the resident demand for underground railways within

walking distance of stations. *Construction: Science and Education*. 2022; 12(1):1. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.1.1 (rus.).

17. Voskoboynikov Y.E. *Econometrics in Excel: Paired and Multiple Regression Models : textbook*. St. Petersburg, Lan', 2016; 260. (rus.).

18. Voskoboynikov Y.E. *Building regression models in MathCAD : textbook*. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin), 2009; 220. (rus.).

19. Ozgur-Cevher O., Altintasi O., Tuydes-Yaman H. Evaluating the relation between station area design parameters and transit usage for urban rail systems in Ankara, Turkey. *International Journal of Civil Engineering*. 2020; 18(8):951-966. DOI: 10.1007/s40999-020-00506-7

20. Zhang Q., Zhang Y.-J., Ding X., Wang Q.-P. Correlations between distribution of producer services and urban built environment in metro station areas: A case of Xi'an, China. *Advances in Civil Engineering*. 2022; 2022:1-11. DOI: 10.1155/2022/6165563

Received September 20, 2022.

Adopted in revised form on October 31, 2022.

Approved for publication on February 6, 2023.

B I O N O T E S : **Dmitriy E. Ushakov** — postgraduate student of the Department of Urban Planning and Urban Economy; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; ID RSCI: 877619, Scopus: 57195469078; u_dmitrii@mail.ru;

Dmitriy V. Karelin — PhD in Architecture, Associate Professor, Head of the Department of Urban Planning and Urban Economy; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; ID RSCI: 212418, Scopus: 57195479145; ggh@sibstrin.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Этапы эволюции подмосковной усадьбы Глинки Я.В. Брюса по материалам историко-архитектурных и натуральных исследований

Владимир Михайлович Чекмарёв^{1,2}

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

² *Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства — филиал Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (НИИТИАГ — филиал ЦНИИП Минстроя России); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается поэтапная эволюция уникального усадебного комплекса Подмосковья, сформированного Я.В. Брюсом — известным государственным и научным деятелем Петровской эпохи. Комплекс расположен в 42 км от Москвы в ближайших окрестностях г. Лосино-Петровского, к северо-востоку от него и несколько севернее деревни Корпуса и речной излучины Воря. Являясь объектом культурного наследия федерального значения, это имение к настоящему времени претерпело ряд структурных изменений, что отразилось и на трансформации первоначальной его планировки, и на объемно-пространственной структуре. Цель исследования — прояснить историю создания усадьбы и проследить основные этапы ее трансформации от середины XVIII в. до настоящего времени. Особенно важно уточнить исходную (базовую) структуру ее планировки и застройки, непосредственно восходящую к творческому замыслу заказчика Я.В. Брюса. Описан первоначальный архитектурный облик главного элемента усадебной застройки — господского дома, который из-за многократных реконструкций к данному моменту полностью утратил исходную объемно-пространственную структуру, планировочную организацию, оформление интерьеров и лишь сохраняет отдельные элементы декора на фасадах.

Материалы и методы. Изучение формирования и последующего существования усадебного комплекса основано на методе комплексного источниковедения, включающего поиск и анализ архивных и библиографических источников. Натурные исследования сопровождались детальным ознакомлением с территорией памятника, характерными для нее рельефом, водными составляющими и озеленением, а также с архитектурными особенностями всех ее построек.

Результаты. Выявлена строительная периодизация памятника, уточнена датировка находящихся на территории объемов, включая поздние перестройки. Это дало возможность определить основные этапы формирования усадебного комплекса, что позволяет с еще большей детализацией разработать проект его комплексной научной реставрации.

Выводы. Рассмотрение эволюции усадебного комплекса обусловило уточнение первоначального облика с учетом структурных изменений элементов его застройки, что не только дополнит имеющиеся в научной литературе сведения об усадебной культуре первой половины XVIII в., но и позволит прояснить конкретные намерения заказчика Я.В. Брюса — неординарной личности Петровской эпохи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: усадебные комплексы, архитектура Подмосковья, поместье Брюса, барокко, ансамблевая застройка, Петровская эпоха

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чекмарёв В.М. Этапы эволюции подмосковной усадьбы Глинки Я.В. Брюса по материалам историко-архитектурных и натуральных исследований // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 178–191. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.178-191

Автор, ответственный за переписку: Владимир Михайлович Чекмарёв, wchekmarev@yandex.ru.

Stages of evolution of the Glinka manor near Moscow, developed by Ya.V. Bruce on the basis of historical, architectural and field studies

Vladimir M. Chekmaryov^{1,2}

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

² *Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning —
branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing
and Communal Services of the Russian Federation (NIITIAG); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The purpose of this article is to consider the gradual evolution of a unique manor in the Moscow region, consolidated by Ya.V. Bruce, a famous statesman and scientist of the Peter the Great era. It is located 42 km from Moscow in the immediate vicinity of Losino-Petrovsky, north of the village of Corpus and the Vorya river. Being an item of cultural heritage of federal significance, this manor underwent a number of structural changes, which affected both its original layout and spatial structure. The purpose of the study is to clarify the history of the manor and to trace the main stages of its transformation from the middle of the 18th century to the present time. In this regard, it was particularly important to clarify the initial (basic) structure of its layout by tracing the original idea of Ya.V. Bruce, the customer. The issue of original architectural solution is also fundamental.

Materials and methods. The study of the establishment and further transformation of the manor is based on the method of consolidated studies of the sources, which includes a search for and analysis of archived and bibliographic sources. Field studies were accompanied by the in-depth study of the entire territory of the monument, its topography, water bodies and landscaping, as well as the architectural features of its buildings.

Results. The construction periodization of the monument was identified; dates of construction of buildings in this territory, including their late reconstruction, were clarified to identify the main stages in the manor development to draft a detailed project of its consolidated research-based restoration.

Conclusions. Analysis of the evolution of the manor led to the clarification of its original look, taking into account structural changes in the elements of its development, to complement the information about the manor culture of the 1st half of the 18th century. It also clarifies the intentions of the customer, an extraordinary person of the Peter the Great era.

KEYWORDS: manors, architecture of the Moscow region, Bruce manor, baroque, ensemble building, Peter the Great era

FOR CITATION: Chekmaryov V.M. Stages of evolution of the Glinka manor near Moscow, developed by Ya.V. Bruce on the basis of historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):178-191. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.178-191 (rus.).

Corresponding author: Vladimir M. Chekmarev, wchekmarev@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вся территория бывшей усадьбы входит в городской округ Лосино-Петровский, расположенный в северо-восточном секторе Московской области в 24 км от Москвы. Она расположена рядом с главными древнейшими путями в непосредственной близости от р. Клязьмы и ее притока р. Воря, а также Стромынского тракта, соответствующего нынешнему направлению Москва – Черноголовка. Помимо фактически единственного в данной округе г. Лосино-Петровский, окрестная местность представляет собой несколько старинных населенных мест — Осево, Митянино, Корпуса, Орловку, Савинки. К новым поселениям округа следует причислить: Лесные Поляны и поселок сотрудников санатория «Монино».

На исследуемой территории находятся самое крупное сельскохозяйственное предприятие района — Щелковская птицефабрика, а также 17 садоводческих товариществ с 1700 дачными участками.

С помощью архивных и библиографических источников, а также прибегая к всестороннему натурному обследованию памятника, автор стремился прояснить общую картину поэтапного развития уникального усадебного комплекса Подмосковья Глинки. Следует подчеркнуть, что вплоть до настоящего времени исследуемая тема не являлась предметом целенаправленного изучения ни в зарубежной, ни в отечественной специальной литературе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование усадебного комплекса проведено с использованием методов, нацеленных на изучение данного объекта культурного наследия федерального

значения, его истории, этапов формирования и строительной периодизации. Главное внимание при этом уделено выявлению объемно-пространственных и стилистических особенностей его застройки. Материалами для исследования послужили архивные и библиографические источники, а также натурное обследование рассматриваемой местности и элементов ее застройки.

В рамках комплексного подхода выполнены:

1. Выявление и анализ архивно-библиографических свидетельств как о самой усадьбе, так и о ее структурных элементах.
2. Натурные исследования, сопровождавшиеся детальным изучением рассматриваемой местности и элементов ее застройки.
3. Выявление и изучение основополагающего (базового) этапа формирования усадебного комплекса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

I период

Первые сведения о расположенной в 42 верстах к востоку от Москвы у впадения р. Вори в Клязьму «деревне Глинкове, что на устье Вори» находим в земельных описаниях 1670-х гг. В этом документе, фиксировавшем практически все дворцовые владения Черноголовской волости, было сказано, что в «Глинкове, помимо трех крестьянских дворов, находится “государев двор в заборе, а на дворе хоромы ветхи”» [1]. Там же уточнялось, что межа Глинкова проходит недалеко от места впадения в р. Вору ее притока Шестенки [2]. Следовательно, рассматриваемая усадьба принадлежала в то время дворцовому ведомству и имела вполне сложившуюся структуру

застройки, включая как жилые, так и хозяйственные строения.

Происходящий из дел тайного приказа и датированный 1670–1680 гг. довольно схематичный «План местности по р. Клязьме около впадения р. Вори» в целом обозначил межи земель смежных с Глинково владельцев, сразу исключавших между ними возможные споры. На этом плане изображена р. Клязьма, р. Воря, а также четыре близлежащих населенных пункта — Глинково, Набережное, Тимомино и Ситьково. Они обозначены своеобразными домиками, а пунктир зафиксировал фрагмент трассировки древней дороги, соединяющей Глинково и Ситьково и уходящей далее [3]. В 1680–1681 гг. была сделана подворная опись д. Глинково уже с поименным перечислением всех на тот момент ее жителей и с указанием количества земли, занятой собственно крестьянскими дворами, огородами, гуменниками и выпасами. Здесь же приводились сведения и о лесных, пашенных и сенокосных угодьях [4].

Деревня Глинково оставалась в дворцовом ведомстве вплоть до марта 1710 г., когда по специальному именному Указу Петра I перешла в собственность английскому промышленнику и негоднику Андрею Стельсу, как особо уточнялось, «для работ и иных нужд» [5]. Знакомство царя с английским коммерсантом А.Р. Стельсом (Andrew Stales — ? (прим. авт.), 1712) состоится в самом конце января 1698 г. во время Великого посольства в Англию и посещения его усадьбы в окрестностях Лондона: «В 31 день были у Андрея Стельса и у него кушали и приехали домой веселы» [6]. Этот Стельс, как выясняется, был поначалу владельцем располагавшейся поблизости от Глинок пороховой мануфактуры на р. Клязьме [7]. Ему же государь обеспечит монопольное право на производство пороха. Именно тогда при перестройке уже ряда существующих строений Стельс и выстроит в Глинках целый ряд дополнительных корпусов, что позволит оставить позади всех своих конкурентов. При переходе имения к Стельсу была составлена передаточная ведомость под названием «Отказные книги сельца Глинкова» [8]. Отсюда следует, что на располагавшемся здесь «Государевом дворе» в то время находились: «две светлицы нижних, поверх них светлица да сушило». Помимо основного строения, двор включал «хоромы, в которых жили порохового дела мастеровые и работные люди», «шесть изб», амбары для хранения пороха и других припасов, три сарая для хранения угля, а также селитерную. Все эти жилые и нежилые строения были огорожены забором, включавшим двое проездных ворот. В границах двора располагался и единственный колодец. А на самой р. Воре уже была устроена земляная плотина с тремя мельничными амбарами, «где толчен порох». Следовательно, все еще сохранявшийся при д. Глинково исключительно в ветхом состоянии упомянутый «Государев двор» именно при

Стельсе претерпел в 1711–1712 гг. радикальную реконструкцию. В результате из всех жилых, производственных и хозяйственных объемов был создан достаточно развитый производственный комплекс. Впрочем, само предприятие просуществовало здесь недолго: попытки вдовы Стельса восстановить производство так и не увенчались успехом, в результате она была вынуждена возвратиться с детьми в Англию. Ее брат в 1717 г. продал имение Глинково с окрестными землями и деревнями князю А.Г. Долгорукову (? — прим. авт., 1734), владельцу подмосковной усадьбы Горенки.

II период (основной)

В 1727 г. Долгоруков продаст Глинково одному из ближайших сподвижников Петра I графу Якову Вилимовичу Брюсу (1669–19(30) апреля 1735) за 4500 рублей серебром [9]. Существенное понижение при этом стоимости самой покупки объяснялось прежде всего тем, что не до конца верным оказалось оформлением им купчей в 1717 г. Собственно, тогда имение включало: «вотчинный двор с хоромным и гуменным строением и с домовым заводом да дворы скотский, мельница на р. Воре в Глинкове и Пашукове» [10]. При этом уточнялось, что вся земля непосредственно «под помещиковым двором» составляла «полдесятины» (полгектара).

Вскоре после смерти Петра I Я.В. Брюс из Санкт-Петербурга переехал в Москву, где и поселился поблизости от Сухаревой башни. Некоторое время спустя, 24 апреля 1727 г., он приобрел Глинки для создания именно здесь собственного усадебного комплекса. Вполне вероятно, что первоочередные работы были начаты той же весной и продолжались до глубокой осени. Прежде всего была заново распланирована территория бывшего вотчинного двора, произведен снос целого ряда аварийных его строений и определены общие пространственные габариты для устройства довольно обширного регулярного сада в четком соответствии со стилевыми особенностями «петровского барокко». В этой связи следует особо подчеркнуть, что Брюс на профессиональном уровне разбирался в вопросах архитектуры и устройства садов. Так, в 1710-е гг. он исполнял целый ряд поручений Петра I, в том числе и по «садовой части», при формировании дворцового комплекса в Стрельне [11]. Следует полагать, что формирование планировочной структуры глинковской усадьбы в духе нового времени, а также возведение господского дома и близлежащих к нему флигелей осуществлялось в четком соответствии с проектным замыслом самого Я.В. Брюса. И.Э. Грабарь особо подчеркивал в данной связи, что этот ближайший сподвижник царя «был очень сведущ в делах архитектуры. В его библиотеке много разных архитектурных увражей и очень возможно, что тот прелестный дом, который он выстроил себе в деревне, сочинен им самим» [12]. Стоит также отметить, что в личной библиотеке Брю-

са, превосходившей по общему количеству книг даже библиотечное собрание самого Петра I, были широко представлены и издания по архитектуре, в том числе и сочинения классиков (Витрувий, Палладио, Бароцци де Виньола) [13].

При активном участии владельца обустройство усадьбы могло занять не более двух-трех лет в промежутке с конца апреля 1727 г. и вплоть до середины апреля 1735 г. В результате были возведены: одноэтажный с мезонином объем главного дома, а южнее — три одноэтажных хозяйственных флигеля, симметричная постройка которых определила пространственные габариты просторного парадного двора. Восточнее был сформирован из разновеликих одноэтажных хозяйственных строений близкий в плане к квадрату хозяйственный двор. Одновременно к северу от господского дома последовала разбивка обширного регулярного парка, примкнувшего с запада к одному из двух разновеликих прудов, созданных на речной запруде, видимо, еще до Я.В. Брюса, но существенно им выровненных и расширенных. Шедшая из Москвы старинная дорога (по оси запад-восток) разделяла эти пруды, обеспечивая непосредственный подъезд к главному входу усадебного дома со стороны его южного фасада.

Объемно-пространственная структура господского дома учитывала наличие одноэтажного, несколько вытянутого с запада на восток основного прямоугольного в плане объема, над которым возвышался, подобно мезонину, прямоугольный в плане центральный зал, вероятно, использовавшийся в качестве обсерватории. Видимо, еще при Я.В. Брюсе объем здания дополнялся контрастно возвышавшейся над кровлей верхнего зала украшенной часами башенкой. В боковых своих частях первый этаж завершался, по-видимому, трехскатными кровлями, характер завершения верхнего объема прояснить не удалось. Соединявшая оба этажа широкая трехчастная лестница располагалась в центральной части восточного крыла. Она освещалась располагавшимся на восточном фасаде единственным оконным проемом. Следовательно, проход в зал 2-го этажа частично осуществлялся через чердачное пространство. Именно такое расположение лестницы потребовало создания на глухой западной стене зала своеобразного архитектурного акцента, а потому в ее центре была помещена (симметрично лестнице) широкая полукруглая ниша. При натуральных исследованиях 1970-х гг. были также обнаружены: венчающий карниз, проходящий по периметру фасадов верхнего зала, следы примыкания к обоим торцам верхнего зала высокой двухскатной крыши, следы срубленных пилястр и белокаменного декора на углах торцов верхнего зала, а также отсутствие на торцах штукатурки. Очевидно, изначально здание не было оштукатурено, а потому весь белокаменный декор на его фасадах наиболее эффектно воспринимался на фоне краснокирпичных стен.

При неоднократном капитальном ремонте главного усадебного дома (1900, 1930-е, 1970-е гг.) были вскрыты фрагменты первоначальной и поздней кирпичной кладки, что подтверждает наличие двух основных строительных периодов. При этом первоначальный одноэтажный объем с возвышающимся над ним обширным залом 2-го этажа был выстроен из кирпича на известковом растворе с широким швом, обработанным подрезкой.

В целом сохранившиеся до нашего времени наличники оконных проемов 1-го этажа были рустованы и декорированы своеобразными белокаменными масками в перемышках и импостах. Маски украшают также аркаду и перемышки балконных дверей. К тому же эти многочисленные весьма выразительные маскароны почти не повторяют друг друга. Из белого камня были также вырезаны: базы и капители пилястр и колонн, профилированные карнизы, подоконники, украшения из акантовых листьев, помещенных в филенки. А под оконными проемами 1-го этажа — волюты балконных дверей.

Все это изысканное декоративное убранство главного усадебного дома, основанное на сочетании кирпича и резного белого камня, в полной мере отвечало стилистическим особенностям петровского барокко. Изначально его главным фасадом мог служить западный, непосредственно сориентированный к прудам, старинной подъездной дороге и к весьма обширному пространству заливных лугов. Тем более, что именно западный торец здания фланкировался с двух сторон несколькими приближенными к прудам парными флигелями. Более скромно решенный восточный фасад был сориентирован на юго-восточную часть парка. Протяженные его фасады обладали в целом схожей композицией. При этом северный граничил с юго-западной оконечностью регулярного парка, упираясь в одну из протяженных (по оси юг-север) его аллей. А южный фасад закреплял северную границу довольно просторного дворового пространства, образованного симметричной постановкой трех каменных одноэтажных служебных флигелей.

Относительно первоначальной планировки и использования главного усадебного дома, за исключением двух располагающихся друг над другом идентичных просторных залов, документально подтвержденную информацию выявить не удалось. А.Н. Греч, ознакомившийся с его интерьерами в 1920-х гг., отметил следующее: «В центральном нижнем зале остался еще громадный голландского типа очаг, в котором, казалось бы, можно зажарить целого кабана, очаг в типе тех, что находятся в Монплезире, Марли и Петровском домике в Летнем саду» [14].

III период

Согласно завещанию, владельцем Глинок с конца апреля 1735 г. становится племянник Я.В. Брюса Александр Романович Брюс, являвшийся сыном его родного брата Романа Вилимовича Брюса. Помимо

обширных окрестных земельных наделов и самого сельца с крестьянскими дворами, ему в собственность тогда же отошел и «двор помещиков с садом и всяким дворовым и хоромным строением и с прудами» [15].

Следовательно, Я.В. Брюс в последние восемь лет жизни успел сформировать развитый усадебный комплекс, включавший как жилые, так и хозяйственные строения, а также весьма значительный по пространственным габаритам регулярный парк, основанный на структурном взаимодействии поперечных и продольных аллей. В частности, располагавшийся в непосредственной близости берегового откоса Верхнего пруда объем господского дома фиксировал одну из главных протяженных его осей.

В 1753 г. А.Р. Брюс подал прошение в Московскую духовную консисторию, в котором просил разрешить перенести церковь из принадлежащего ему сельца Мизинова в сельцо Глинково ввиду того, что там она «разселась» и «поправлять ее опасно» так как она стоит на ненадежном месте, подверженному постоянному разливу из-за близкого выхода ключей» [16].

Соответственно в Глинкове участок под размещение будущего храма был избран на некотором возвышении, несколько севернее регулярного парка и в непосредственной близости от крестьянских дворов — «там удобное к построению место имеется». Для осуществления строительства из консистории была выслана подробнейшая инструкция, что позволяет предположить, что в основу проектного замысла глинковской церкви мог быть положен типовой проект. В результате храм в Мизино был разобран, а все еще пригодный для нового строительства его кирпич доставлен в Глинково. И в августе 1757 г.

А.Р. Брюс доложит в Московскую духовную консисторию, что строительство храма полностью завершено. Соответственно, теперь «сельцо» Глинково стало именоваться «селом». Сам же объем церкви был в то время сравнительно небольшим. Так, алтарная его часть представляла собой четверик площадью 100 м² с алтарной апсидой. А имевшая деревянное перекрытие двухэтажная трапезная была гораздо уже основного четверика и составляла в длину 9, а в ширину 7,5 м. На втором ее ярусе размещался теплый придел св. князя Александра Невского. Со стороны колокольни сюда попадали с помощью лестницы, которая также размещалась в трапезной. Теплый придел использовался только в зимнее время.

Два-три года спустя в непосредственной близости от апсид храма в пространстве церковного погоста был выстроен сравнительно небольшой объем фамильного склепа, где и были захоронены сначала А.Р. Брюс (1760), а семнадцать лет спустя (1777) и его супруга Наталья Федоровна (урожденная Кольчева) [17]. Именно с ее инициативой и связывают появление этого склепа, который изначально рассматривался как фамильная усыпальница, однако кроме их двоих в ней уже более никого не хоронили.

К относящейся к 1750 гг. широкомасштабной реконструкции усадебного комплекса А.Р. Брюса, помимо возведения церковного объема, следует отнести и надстройку господского дома, который в результате приобрел архитектурный облик, характерный уже для елизаветинского барокко (рис. 1).

Одновременно и фасады всех трех фиксированных красные линии парадного двора флигелей также были оштукатурены и приобрели композиции, в целом отвечающие все той же стилистике (рис. 2).



Рис. 1. Глинки. Южный фасад господского дома. Фото начала XX в. (архив санатория)

Fig. 1. Glinka. Southern facade of the manor house. Photo made in the early 20th century (archived by the convalescence home)



Рис. 2. Глинки. Южный и восточный фасады Флигеля. Фото 1930-х гг. (архив санатория)

Fig. 2. Glinka. Southern and eastern facades of the Wing. Photo made in the 1930s (archived by the convalescence home)

Датированный 1772 г. межевой план зафиксировал устойчиво сохранявшиеся с рубежа XVII–XVIII вв. планировочные границы имения [18]. Так, на западе к ним подступала р. Клязьма, с северной стороны — земли с. Савинского, а с востока — села Ямкино и Воскресенское. К югу и юго-востоку находилась земля с. Балабаново, а также земли сельца Ельне и д. Стуловой. Этот план дополнялся «Полевыми записками», представлявшими собой рабочие записи землемеров [19]. Относительно Глинок в них упоминалось: наличие плотины, находившейся между прудами с мельницей и дорогой через нее; церкви с погостом; сада, расположенного на берегу пруда господского дома; залива р. Вори, гуменика, «галдареи», «прошпекта» и «амбара». Следовательно, фактически были перечислены все главные составляющие усадебного комплекса, возникшие в промежутке между 1727 и 1772 гг. Ко времени проведения «Генерального межевания» относятся и датированные 1770–1780 гг. «Экономические примечания» [20]. Касательно Глинок, здесь отмечалось следующее: «Село на правом берегу Вори, церковь каменная, дом господский каменный, при нем сад с плодovitыми деревьями, в саду ранжерея каменная, конный завод, мучная мельница на реке Воре». Следовательно, и само создание упомянутого конного завода следует связывать также с Я.А. Брюсом.

IV период

В 1815 г. графиня Е.Я. Брюс продает за 300 тысяч рублей усадьбу Глинково с более чем 8000 десятинами земли калужскому купцу Ивану Тихоновичу Усачеву совместно с «господским домом каменным». А в 1836 г. был создан «Геометрический специальный план Московской губернии Московского что ныне

Богородского уезда села Глинково с принадлежащими к нему всеми землями, которое во владении состоит московского 2-й гильдии купца Ивана Иванова сына Усачева» (рис. 3) [21]. На нем впервые из обнаруженных была уже детально представлена сложившаяся к этому времени планировочная структура и самого имения Глинки, и относящихся к нему земель. Так, основное пространство усадебного комплекса было занято регулярным парком, существенно вытянутым по продольной оси с юга на север. Очевидно, изначально несколько сужающееся к северу его пространство разделяли сразу шесть продольных аллей. Впрочем, план фиксирует наличие только четырех ввиду ликвидации к этому времени двух остальных в западной части парка, непосредственно подступавшей к прудам, и сложившихся в исходных своих габаритах, скорее всего, в конце 1720-х – начале 1730-х гг. еще при Я.В. Брюсе.

При этом все семь поперечных аллей сохранились полностью, но без западных своих оконечностей. В северной половине парка ближе к Верхнему пруду показано размещение в межаллейном пространстве небольшого пруда прямоугольного очертания. А в центре парка рядом с пересечением аллей расположен несколько вытянутый с запада на восток одноэтажный каменный объем, упоминавшийся ранее как «Оранжерея». Также несохранившийся до настоящего времени квадратный в плане еще один одноэтажный каменный объем находился у северо-восточного угла Верхнего пруда. Южнее к береговой его черте подступали нынешние садовый флигель и торцевым (западным) своим фасадом главный дом, которые одновременно были сориентированы и к пространству парка. Южный его фасад по-прежнему фиксировал усадебную дорожку,

связанную с уходившей к Москве древней дорогой и восточной оконечностью садового вала. Южнее этого господского дома показано структурное расположение в пространстве прямоугольного двора еще трех выстроенных Я.В. Брюсом одноэтажных флигелей различного функционального назначения. А к востоку от них находилось еще пять разновеликих одноэтажных хозяйственных каменных строений в пространственных габаритах прямоугольного хозяйственного двора, видимо, существовавшего здесь еще на рубеже XVII–XVIII вв. Восточнее показаны два разновеликих весьма обширных озелененных пространства, где размещалось в линейном порядке несколько одноэтажных каменных жилых строений.



Рис. 3. Глинка. Фрагмент «Геометрического специального плана Московской губернии Московского что ныне Богородского уезда села Глинкова с принадлежащими к нему всеми землями, которое во владении состоит московского 2-й гильдии купца Ивана Иванова сына Усачева». 1836 г. РГАДА Ф. 1354. Оп. 246. Д. Г-36

Fig. 3. Glinka. Extract from the “Special geometric plan of the Moscow province of the Moscow district, now known as Bogorodsky dostrict of the village of Glinkova with all lands belonging to it, owned by the Moscow 2nd guild merchant Ivan Ivanov, son of Usachev”. 1836. Russian state archive of ancient documents. Fund 1354. L. 246. Bogorodsky uyezd. G-36.

Примечательно, что именно здесь устроенная проезжая часть переходила в протяженную, очевидно, липовую аллею, которая от самой усадьбы далеко уходила в восточном направлении и обрывалась

у обширной заболоченной местности. Ее прокладка (по оси запад-восток) в полной мере соответствовала общей трассировке упомянутой древней трассы, которая посредством плотины разделяла находившиеся в западной части усадьбы прямоугольные Верхний и Нижний пруды. Расположение трехчастного каменного церковного объема, четко сориентированного своими апсидами на восток, показано на включавшем в себя и погост прямоугольном огороженном участке, который с юга подступал к самой северной продольной аллее регулярного парка. А севернее храма план зафиксировал компактное расположение крестьянских дворов сельца Глинкова. Его главная улица по оси север-юг подводила к северному фасаду колокольни храма. На южных подступах к усадьбе в непосредственной близости от акватории р. Вори зафиксировано асимметричное расположение целой группы мелкокомасштабных строений хозяйственного назначения, в том числе и напрямую связанных с фабричным производством.

У период

В 1854 г. владельцами усадьбы Глинково становятся московские 1-й гильдии купцы — Семен Петрович и Семен Александрович Алексеевы, приобретшие ее у В.И. Усачева: «Купили мы... в даче, именуемой Глинка, 348 дес. с разными на той земле построенными каменными и деревянными, жилыми и нежилыми и фабричными строениями, и заведениями» [22]. В той же купчей на продажу говорилось и о наличии в усадьбе «каменного дома с флигелями».

Обозначившаяся в начале XIX в. тенденция использования усадьбы исключительно в производственных целях достигнет своего апогея к рубежу XIX–XX вв. [23]. Именно тогда решительно все сохранявшиеся усадебные и вновь возведенные постройки безраздельно отвечали потребностям фабричного производства. Так, в 1899 г. полностью выгорел 2-этажный объем господского дома, неизменно использовавшийся под склад пряжи. Позднейшая фабрично-бытовая застройка Глинок, представлявшая собой разновеликие исключительно одноэтажные деревянные строения, была выстроена, как удалось установить, по проектам одного из основателей Московского архитектурного общества, выпускника Московского дворцового архитектурного училища Н.А. Тютюнова (1833–1916).

К 1883 г. восходит и реконструкция глинковской церкви, приведшая к радикальному увеличению ее первоначального объема вследствие резкого роста численности окрестного населения, напрямую связанного с многократно возросшей хозяйственной деятельностью (рис. 4).

В 1903 г. был составлен «План владения торгового дома братьев Я. и Е. Лопатиных, состоящий в Московской губернии, Богородского уезда, близ деревни Глинка» (рис. 5) [24]. Под № 4 на нем значился объем главного дома, относительно которого

сообщалось: «Флигель каменный, крытый железом в один этаж, штукатурен, комнаты оклеены обоями, печи голландские и русские с плитами. К нему при-мыкает под лит. а кухня деревянная, крытая железом,

в один этаж, штукатурен, печь русская с плитой, окна, рамы, двери окрашены, полы сосновые». Как уточняется, в это время здание использовалось под склад для хранения хлопка [17].



Рис. 4. Глинки. Церковь. Фото начала XX в. (архив санатория)

Fig. 4. Glinka. Church. Photo made in the early 20th century (archived by the convalescence home)

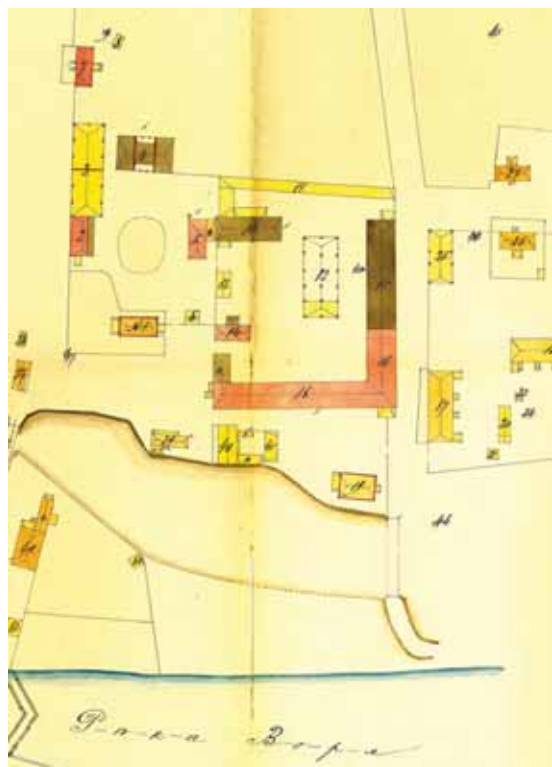


Рис. 5. Глинки. Фрагмент «Плана владения торгового дома братьев Я. и Е. Лопатиных, состоящий в Московской губернии, Богородского уезда, близ деревни Глинки». 1903 г. ЦИАМ. Ф. 303. Оп. 1. Д. 68. Л. 6

Fig. 5. Glinka. Extract from the “Ownership plan of the trading house owned by the Ya. and E. Lopatin brothers, in the Moscow province, Bogorodsky district, near the village of Glinka”. 1903. Moscow Central State Archive. Fund 303. L. 1. File 68. Sheet 6

VI период

В 1918 г. бывший усадебный комплекс национализирован и в нем разместились два детских дома для детей-сирот в соответствии с решением Щелковского волостного и Богородского уездного отделов образования. А все его исторические элементы перешли в ведение отдела по делам музеев Главнауки Наркомпроса. Несмотря на это, их деградация из-за отсутствия капитальных ремонтов продолжилась. Потому неслучайно в 1923 г. появится проект специального договора об отдаче Глинок и близлежащего Лосинового завода «в концессионное содержание на 49 лет иностранцу Ф.К. Кригеру» [25]. Именно он брал на себя обязательства реставрации как бывшего главного усадебного дома, так и всех его флигелей.

В 1930 г. Наркомат пищевой промышленности взял бывший усадебный комплекс в длительную аренду для устройства своего Дома отдыха.

К этому времени северная лоджия господского дома полностью утратила деревянные перекрытия и в значительной мере декоративное убранство на уровне 2-го этажа, создававшееся по аналогии с южным фасадом также в середине XVIII в. Он не эксплуатировался и стоял без оконных рам и с закладкой ряда первоначальных оконных и дверных проемов. Только в результате последовавшей в первой половине 1930-х гг. смены арендатора исторические элементы застройки, включая бывший господский дом, капитально отремонтировали и приспособили к нуждам того же ведомственного Дома отдыха. Одновременно создана принципиально иная планировочная структура парка, для чего потребовалось

не только вычистить первоначальный пруд, но и открыть в качестве логического его продолжения еще один, также параллельно всей западной оконечности парка. Объем глинковской церкви был разобран и включен в состав вновь выстроенного 4-этажного кирпичного здания в качестве главного санаторского корпуса (рис. 6).

При этом полностью ликвидировали и подступавший к апсидам храма церковный погост, а также снесли находившуюся здесь фамильную усыпальницу Брюсов.

По заданию ВЦСПС и Центрального совета по управлению курортами профсоюзов архитектурно-проектная мастерская в 1960-е гг. разработала проект комплексной перепланировки бывшего главного усадебного дома, который теперь значился как «Спальный корпус № 1». Эти проектные планы 1-го и 2-го этажей из архива санатория «Монино» учитывали радикальную его реконструкцию с увеличением общей численности комнат, предназначенных для отдыхающих. Так, зальное пространство на уровне 1-го этажа было разделено перегородками, что позволяло создать несколько служебных помещений для обслуживающего персонала. В боковых частях этажа также с помощью перегородок образована сеть небольших стандартных спален, совмещенных с санузлами. На втором этаже первоначальное пространство зала сохранено, но в боковых его частях вновь созданная планировка практически полностью отвечала планировке первого этажа. Связывающая оба этажа двухчастная лестница теперь размещалась

в пространстве северной лоджии, а обращенный к парку просторный балкон был устроен в центральной части северного фасада. Очередная реконструкция неэксплуатируемого с 1978 г. бывшего главного дома произведена в 1981 г. и также без архнадзора и без учета требований научной реставрации. Именно тогда межэтажные деревянные перекрытия заменят на железобетонные, что привело к необходимости устройства в зальном пространстве первого этажа четырех несущих кирпичных колонн. Также полностью заменено на современное и кровельное покрытие. В очередной раз подверглась изменениям и планировка обоих этажей здания с размещением стандартных спален с санузлами. Эта реконструкция привела к закладке ряда первоначальных оконных и дверных проемов. А на уровне первого яруса восточного фасада пробито два дополнительных оконных проема. От дореволюционной отделки интерьера уцелела лишь гипсовая раковина с картушем, украшающая конху полукруглой ниши верхнего зала (по аналогии с фасадом близлежащего паркового флигеля). А в следующем году была уничтожена и фресковая роспись стен верхнего зала, созданная в первой половине XX в. в подражание рокайльному стилю 1730–1740-х гг.

Вплоть до начала 2010-х гг. бывший объем главного усадебного дома неизменно сохранял свое использование в качестве одного из спальных корпусов санатория в рамках окончательно сложившейся в 1980 г. общей планировочной его организации.



Рис. 6. Глинки. Перестроенный в санаторный корпус церковный объем. Фото 1950-х гг. (архив санатория)

Fig. 6. Glinka. The church rebuilt into the convalescence home building. Photo made in the 1950s (archived by the convalescence home)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Глинки — один из старейших усадебных памятников Подмосковья, сформированный в два основных строительных этапа (1727–1735, 1750-е гг.), исходная застройка которого на протяжении XIX –

начала XX вв. использовалась в производственных целях, а в 1930-х гг. была включена во вновь сформированный санаторный комплекс с возведением ряда новых объемов и комплексной реконструкцией всех его исторических элементов (рис. 7, 8).

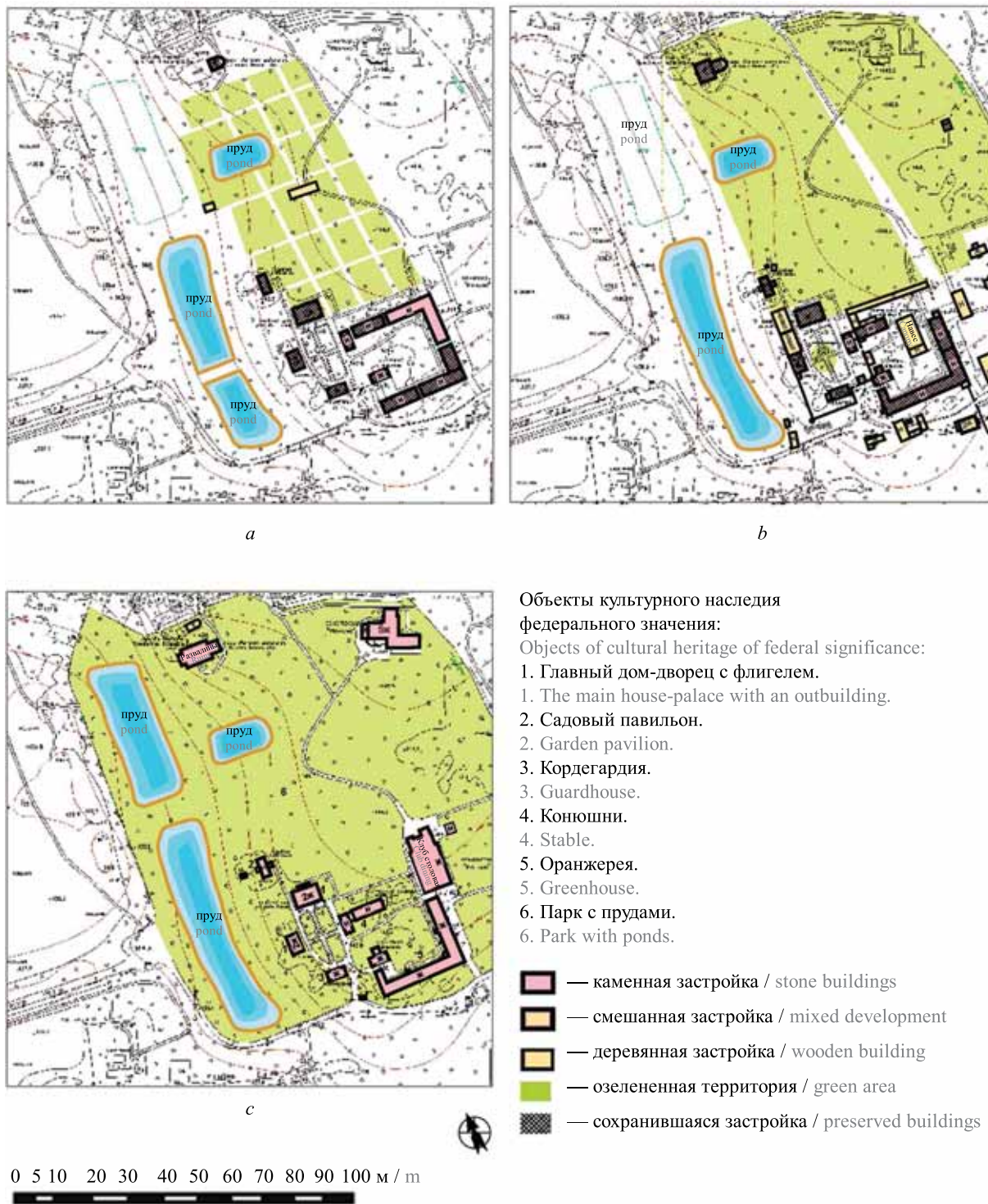


Рис. 7. Глинки. Эволюция объемно-пространственной структуры усадьбы: *a* — 1836 г.; *b* — 1903 г.; *c* — 2022 г.

Fig. 7. Glinka. The evolution of the 3D structure of the manor: *a* — 1836; *b* — 1903; *c* — 2022

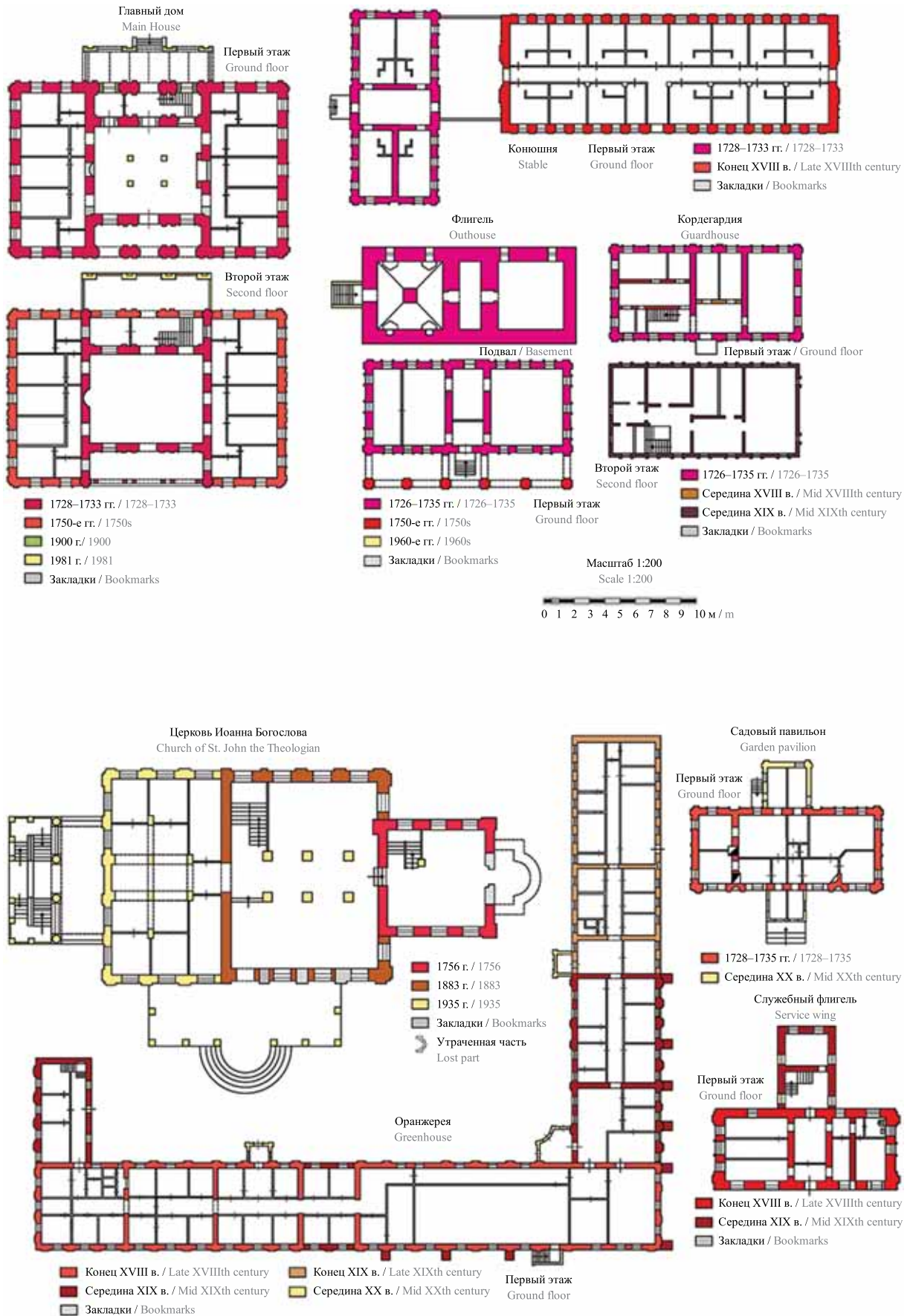
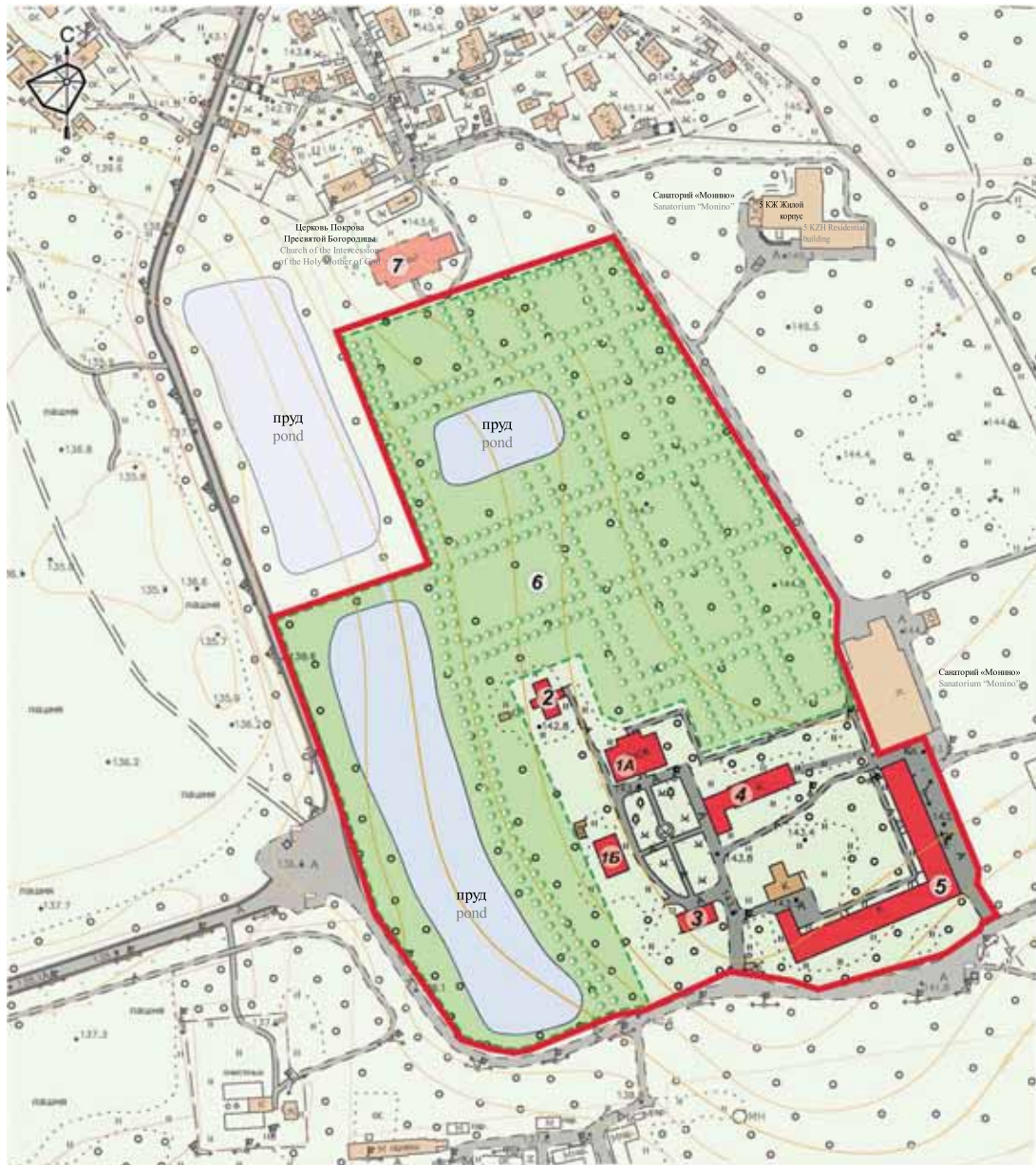


Рис. 8. Глинки. Планы элементов усадебной застройки
Fig. 8. Glinka. Layouts of elements of the manor development



Проект границ территории объекта культурного наследия федерального значения «Усадьба Глинки (Брюса)», 1728–1733 гг.
Московская область, г.о. Лосино-Петровский, санаторий «Монино»
The project of the boundaries of the territory of the object of cultural heritage of federal significance “The Estate of Glinka (Bruce)”, 1728–1733
Moscow region, Losino-Petrovsky, sanatorium “Monino”

Условные обозначения: / Symbols:

- граница территории объекта культурного наследия федерального значения: «Усадьба Глинки (Брюса)», 1728–1733 гг.
the border of the territory of the object of cultural heritage of federal significance: “The estate of Glinka (Bruce)”, 1728–1733
- объекты культурного наследия федерального значения в составе «Усадьбы Глинки (Брюса)», 1728–1733 гг.:
object of cultural heritage of federal significance as part of the “Glinka (Bruce) Estate”, 1728–1733:
- 1. Главный дом-дворец с флигелем: / The main house is a palace with an unbuiding:
- 1а. Главный дом-дворец. / The main house is the palace.
- 1б. Флигель. / Wing.
- 2. Садовый павильон. / Garden pavilion.
- 3. Кордегардия. / Guardhouse.
- 4. Конюшни. / Stable.
- 5. Оранжерея. / Greenhouse.
- 6. Парк с прудами. / Park with ponds.
- выявленный объект культурного наследия: / identified object of cultural heritage:
- 7. Церковь апостола Иоанна Богослова / The Church of the Apostle John the Theologian
- парк с прудами / park with ponds
- парковые дорожки / park paths

Рис. 9. Глинки. Проект границ территории памятника

Fig. 9. Glinka. Monument boundaries

При этом и сохранившиеся усадебные постройки, и фрагментарно уцелевшие элементы планировки обладают исключительной мемориальной значимостью, напрямую связанной с государственной и научно-практической деятельностью виднейших представителей семейства Брюсов. В рамках комплексного их сохранения следует, прежде всего, предусмотреть обсуждение предлагаемых границ охранной зоны памятника с последующей разработкой проектов комплексной научной реставрации всех структурных его элементов (рис. 9).

Обоснование и критерии для установления границ объекта культурного наследия базируются на результатах анализа историко-культурных, историко-градостроительных и ландшафтно-визуальных параметров, а также особенностей структуры застройки рассматриваемой территории, этапов ее формирования и развития. Учитывались историко-культурные особенности участка, его трансформации и утраты, существующее состояние. Принимались во внимание и современные условия регулирования имущественных и земельных отношений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. РГАДА. Ф. 1209. Оп. 2. Д. 9902. Л. 431.
2. РГАДА. Ф. 1209. Оп. 2. Д. 9902. Л. 436–448.
3. РГАДА. Ф. 27. Оп. 1. Д. 484. Ч. III. № 20. План местности по р. Клязьме около впадения р. Вори. XVII в.
4. Холмогоров В.И. Исторические материалы о церквях и селах XVI–XVIII столетий Московской епархии. М. : Тип. Л.Ф. Снегирева, 1887. Вып. VI. С. 53–57.
5. РГАДА. Ф. 396. Оп. 2. Д. 3664. Л. 96 об.
6. Лефорт Ф. Сборник материалов и документов / сост. Т.А. Лаптева, Т.Б. Соловьева. М. : Древлехранилище, 2006. С. 359.
7. Заозерский Е.И. Список мануфактур, возникших при Петре // Исторические записки. М. : Акад. Наук СССР, 1945. Т. 19.
8. РГАДА. Ф. 1209. Оп. 2. Д. 2902. Л. 454.
9. РГАДА. Ф. 1250. Оп. 1. Д. 3. Л. 38–41.
10. РГАДА. Ф. 1209. Оп. 2. Д. 9902. Л. 462 об.
11. Горбатенко С. Архитектура Стрельны. СПб. : Европейский дом, 2008. С. 27, 28, 32, 37, 150.
12. Грабарь И.Э. Архитекторы-иностранцы при Петре Великом // Старые годы. СПб. : Тип. «Сириус», 1911. С. 144.
13. Библиотека Я.В. Брюса. Каталог / сост. Е.А. Савельева. Л. : БАН СССР, 1989.
14. Греч А.Н. Венок усадьбам. Глинки // Памятники Отечества. М. : Советская Россия, 1994. Вып. 32. С. 138.
15. РГАДА. Ф. 1250. Оп. 1. Д. 3. Л. 59.
16. ЦГА Москвы. Ф. 203. Оп. 753. Д. 726.
17. Глинки // Среди коллекционеров. М. : Изд-во «Среди коллекционеров», 1924. № 7–8. С. 51.
18. РГАДА. Ф. 1354. Оп. 859. Богородский уезд. Г-с (Кр).
19. РГАДА. Ф. 1320. Оп. 1. Д. 664.
20. ЦГА Москвы. Ф. 49. Оп. 2. Д. 20. Л. 204–209.
21. РГАДА. Ф. 1354. Оп. 246. Богородский уезд. Г-36. (Син).
22. ЦГА Москвы. Ф. 210. Оп. 1. Д. 136. Л. 15–20.
23. ЦГА Москвы. Ф. 54. Оп. 180. Д. 121. Л. 30. 1888 г.
24. ЦГА Москвы. Ф. 303. Оп. 1. Д. 68. Л. 6–10.
25. ГА РФ. Ф. 2306. Оп. 1. Д. 2332.

Поступила в редакцию 24 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 18 января 2023 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Владимир Михайлович Чекмарёв — доктор искусствоведения, профессор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ведущий научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства — филиал Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (НИИТИАГ — филиал ЦНИИП Минстроя России);** 119331, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 29; timurahc@yandex.ru.

REFERENCES

1. *Russian state archive of ancient documents.* Fund 1209. L. 2. File 9902. Sheet 431. (rus.).
2. *Russian state archive of ancient documents.* Fund 1209. L. 2. File 9902. Sheet 436-448. (rus.).
3. *Russian state archive of ancient documents.* Fund 27. L. 1. File 484. Part III. Sheet 20. (rus.).
4. Kholmogorov V.I. *Historical materials about churches and villages of the XVI-XVIII centuries of*

the Moscow Diocese. Moscow, L. F. Snegireva Type, 1881; VI:53-57. (rus.).

5. *Russian state archive of ancient documents*. Fund 396. L. 2. File 3664. Sheet 96. (rus.).

6. Lefort F. *Collection of materials and documents*. Moscow, Drevlekhranishche, 2006; 359. (rus.).

7. Zaozersky E.I. List of manufactories that arose under Peter. *Historical notes*. Moscow, USSR Academy of Sciences, 1945; 19. (rus.).

8. *Russian state archive of ancient documents*. Fund 1209. L. 2. File 2902. Sheet 454. (rus.).

9. *Russian state archive of ancient documents*. Fund 1250. L. 1. File 3. Sheet 38-41. (rus.).

10. *Russian state archive of ancient documents*. Fund 1209. L. 2. File 9902. Sheet 462. (rus.).

11. Gorbatenko S. *Architecture of Strelna*. St. Petersburg, European House, 2008; 27,28,32,37,150. (rus.).

12. Grabar I.E. Foreign architects under Peter the Great. *Old Years*. St. Petersburg, Sirius, 1911; 144. (rus.).

13. Savelyeva E.A. *Library of Y.V. Bruce. Catalog*. Leningrad, Library of the Academy of Sciences of the USSR, 1989. (rus.).

14. Grech A.N. Wreath to manors. Glinka. *Monuments of the Fatherland*. Moscow, Soviet Russia, 1994; 32:138. (rus.).

15. *Russian state archive of ancient documents*. Fund 1250. L. 1. File 3. Sheet 59. (rus.).

16. *Moscow Central State Archive*. Fund 203. L. 753. File 726. (rus.).

17. *Glinka. Among collectors*. 1924; 7-8:51. (rus.).

18. *Russian state archive of ancient documents*. Fund 1354. File 859. Bogorodsky district. G-s (Kr). (rus.).

19. *Russian state archive of ancient documents*. Fund 1320. L. 1. File 664. (rus.).

20. *Moscow Central State Archive*. Fund 49. L. 2. File 20. Sheet 204-209. (rus.).

21. *Russian state archive of ancient documents*. Fund 1354. L. 246. Bogorodsky uyezd. G-36. (Syn). (rus.).

22. *Moscow Central State Archive*. Fund 210. L. 1. File 136. Sheet 15-20. (rus.).

23. *Moscow Central State Archive*. Fund 54. L. 1. 180. Sheet 121. Sheet 30. 1888. (rus.).

24. *Moscow Central State Archive*. Fund 303. L. 1. File 68. Sheet 6-10. (rus.).

25. *State Archive of the Russian Federation*. Fund 2306. L. 1. File 2332. (rus.).

Received November 24, 2022.

Adopted in revised form on January 18, 2023.

Approved for publication on February 6, 2023.

B I O N O T E S : Vladimir M. Chekmaryov — Doctor of Arts, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Leading Researcher; **Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning — branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (NIITIAG)**; 29 Vernadsky Avenue, Moscow, 119331, Russian Federation; timurahe@yandex.ru.

Деревянные клетские храмы Нижегородского Заволжья. Новые типологические исследования

Андрей Борисович Бодэ^{1,2}, Илья Владимирович Воеводин³,
Татьяна Валентиновна Жигальцова⁴

¹ Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства — филиал Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (НИИТИАГ — филиал ЦНИИП Минстроя России); г. Москва, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

³ Автономная некоммерческая организация «Исследование и реставрация памятников деревянного зодчества “Традиция”»; г. Москва, Россия;

⁴ Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ); г. Архангельск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Объектом исследования является типология деревянных клетских храмов, предметом — практически неизученные три деревянных храма XVII–XVIII вв., расположенные в заволжских районах Нижегородской области. Их изучение открывает новые неизвестные ранее архитектурные решения. Практическая значимость заключается в сохранении реставрации объектов культурного наследия. Цель исследования — рассмотрение архитектурно-строительных традиций, присущих деревянным церквям средней полосы России. В задачи входят натурное обследование объектов, архивно-библиографические исследования, выявление этапов строительной истории, сопоставление объектов с аналогами и в итоге определение особенностей, отличающих архитектуру среднерусских деревянных храмов.

Материалы и методы. Применен комплексный подход, сочетающий практические научно-реставрационные методы изучения памятников с научными методами сравнительно-типологического, исторического и эволюционного анализа. Сопоставление архитектурных решений с общим ходом развития деревянного зодчества позволяет выявить среднерусские архитектурные решения, приемы и формы, отличающие данный регион.

Результаты. Исследованы объекты — церковь Вознесения Господня 1703 г. (перестройка конца XIX в.) в с. Зарубино Городецкого района, церковь Троицы Живоначальной XVIII–XIX вв. в д. Худяково Городецкого района, Церковь Рождества Христова 1776 г. в д. Гари Сокольского района. Выявлены строительные этапы каждого объекта, первоначальное архитектурное решение. Определены назначение и архитектурные характеристики объектов. Это холодные (летние) клетские храмы, имевшие значительные по площади помещения, вмещавшие много прихожан. По формам эти постройки в целом соответствовали всем типологическим характеристикам клетских церквей, выделяясь размерами и отсутствием отопления.

Выводы. В типологической группе клетских деревянных храмов установлена подгруппа холодных клетских церквей, отличающихся большими размерами. С распространением теплых деревянных церквей формировались храмовые комплексы, включающие два однотипных здания — теплое и холодное.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: русское деревянное зодчество, строительная история, клетские деревянные храмы, типология

Благодарности. Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных научных исследований Российской академии архитектуры и строительных наук и Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на 2022 г., тема 1.1.2.1.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бодэ А.Б., Воеводин И.В., Жигальцова Т.В. Деревянные клетские храмы Нижегородского Заволжья. Новые типологические исследования // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 192–201. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.192-201

Автор, ответственный за переписку: Андрей Борисович Бодэ, bode-niitag@yandex.ru.

Square-shaped wooden churches in Zavolzhsky District of the Nizhny Novgorod Region. New typological studies

Andrey B. Bode^{1,2}, Ilya V. Voevodin³, Tatiana V. Zhigaltsova⁴

¹ *Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning — a branch of the Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation (NIITAG — a branch of TsNIP of the Ministry of Construction of Russia); Moscow, Russian Federation;*

² *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;*

³ *Autonomous non-profit organization Research and restoration of monuments of wooden architecture “Tradition”; Moscow, Russian Federation;*

⁴ *Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; Arkhangelsk, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The study focuses on typology of square-shaped wooden churches, namely, three virtually unexplored wooden churches that date back to the 17th–18th centuries. They are located in Zavolzhsky district of the Nizhny Novgorod region. This study discovers new, previously unknown architectural solutions. This work is valuable for the practical preservation and restoration of cultural heritage items. The goal of the study is to analyze architectural and construction traditions typical for wooden churches in Central Russia. The objectives of the study include field surveys of the church facilities, review of archived and literary sources, identification of construction periods, comparison of similar construction facilities, and consolidation of distinctive features of wooden churches in Central Russia.

Materials and methods. This work employs a comprehensive approach combining practical restoration methods and research methods of comparative topological, historical, and evolutionary analysis. By adding architectural solutions to the general timeline of wooden architecture, the authors identify architectural solutions, techniques and forms typical for Central Russia.

Results. The following church facilities were studied: Church of the Ascension of the Lord dated 1703 (late 19th century) in Zarubino, Gorodetsky district; Church of the Life-Giving Trinity dated 18th–19th century in Khudyakovo village, Gorodetsky district; Church of the Nativity dated 1776 in Gari village, Sokolsky district. Construction periods and original architectural design were identified. The function and architectural features of the church facilities were identified. These were cold (summer) square-shaped churches with spacious premises capable of accommodating considerable numbers of people. As to their forms, these structures generally demonstrate all the typological features of square-shaped churches, except for their size and absence of heating.

Conclusions. The subgroup of cold square-shaped churches, known for their large size, was identified within the typological group of square-shaped wooden churches. As heated wooden churches turned more frequent, church complexes having two same-type buildings — cold and warm — were constructed.

KEYWORDS: Russian wooden architecture, construction history, square-shaped wooden churches, typology

Acknowledgements. The study was conducted as part of the 2022 Fundamental Scientific Research Programme of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences and the Ministry of Construction, Housing and Utilities, topic 1.1.2.1.

FOR CITATION: Bode A.B., Voevodin I.V., Zhigaltsova T.V. Square-shaped wooden churches in Zavolzhsky District of the Nizhny Novgorod Region. New typological studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):192-201. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.192-201 (rus.).

Corresponding author: Andrey B. Bode, bode-niitag@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Деревянное зодчество устойчиво ассоциируется с Русским Севером. Несмотря на это, как показывают исследования, немало историко-архитектурных открытий можно сделать и в среднерусских областях [1]. Памятников деревянного зодчества в средней полосе России значительно меньше, чем на Севере, и здесь они в силу большей строительной активности за свою историю претерпели более значительные изменения или утраты.

Типология деревянных церквей в целом необычайно разнообразна [2]. Принципиально одинаковые решения планов сочетались с многообразием форм завершающих частей. Архитектура регионов всегда тяготела к местному своеобразию и отступлению от столичных образцов [3]. Огромные расстояния, удаленность, локальные предпочтения обуславли-

ли много разных решений. Кроме того, дерево, в отличие от камня, — более доступный и удобный для быстрого строительства материал, позволяющий легко интерпретировать образцы и получать новые вариации. В исторических источниках содержится немало информации по строительной истории объектов [4, 5].

Клетские храмы среди других типов деревянных церквей считаются самыми древними и наиболее широко распространенными [6]. Они имеют различия по пропорциям и формам завершений в зависимости от региональной принадлежности. Например, в северо-восточных областях встречаются клетские храмы с так называемыми клинчатыми с полицами покрытиями [7]. В северо-западных землях были распространены клетские церкви с каскадными крышами [8]. Ограниченное распространение имели клетские храмы с покрытием бочкой [9]. Для

среднерусских клетских храмов характерны простые прямоскатные крыши с уклоном от 40 до 60 градусов [10, с. 128–152].

Цель исследования — изучение архитектурно-строительных традиций, присущих деревянным церквям средней полосы России. В задачи работы входят натурное обследование объектов, архивно-библиографические исследования, выявление этапов строительной истории, сопоставление объектов с аналогами и в итоге — определение особенностей, отличающих архитектуру среднерусских деревянных храмов.

Предметом рассмотрения являются три деревянных храма XVII–XVIII вв., расположенные в заволжских районах Нижегородской области. Они практически не изучены и находятся в аварийном состоянии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применен комплексный подход, сочетающий практически научные реставрационные методы изучения памятников с научными методами сравнительно-типологического, исторического и эволюционного анализа. Совокупный анализ данных натурных обследований и архивно-библиографических сведений служит для выявления строительных этапов памятника. Сравнительно-типологический анализ объектов исследования, сопоставление архитектурных решений с общим ходом развития деревянного зодчества позволяет выявить среднерусские архитектурные решения, приемы и формы, отличающие данный регион. Объекты рассматриваются как целостная группа, объединенная единой строительной традицией.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемые объекты — церковь Вознесения Господня 1703 г. в с. Зарубино Городецкого района, церковь Троицы Живоначальной XVIII–XIX вв. в д. Худжово Городецкого района, Церковь Рождества Христова 1776 г. в д. Гари Сокольского района.

За свою историю они неоднократно перестраивались, в связи с чем их первоначальный внешний облик существенно изменился. Проведенное натурное обследование выявило следы первоначальных конструкций, что позволило отнести эти храмы к типу клетских храмов. В их архитектуре обнаруживаются общие черты, свидетельствующие об идентификации новой типологической подгруппы.

Церковь Вознесения Господня 1703 г. (перестройка конца XIX в.) в с. Зарубино состоит из базового четверика размером примерно 10 × 10 м. С востока к нему примыкает пятистенный алтарь, с запада — по ширине равная четверику протяженная трапезная (рис. 1). Основной объем покрыт бревенчатым сводом с небольшим световым барабаном, несущим центральную главу. Над углами четверика расположены еще четыре боковые главы на глухих барабанах. Алтарь покрыт сомкнутой прямоскатной крышей на пять граней. Трапезная покрыта двухскатной крышей. В облике церкви, особенно в завершающей части, явно просматриваются архитектурные мотивы классицизма. Стены покрыты обшивкой и обработаны декором в русском стиле.

При дальнейшем обследовании выяснилось, что эти стилистические формы и детали позднейшие. Церковь за свою историю сильно перестраивалась. Фасады были покрыты обшивкой, придавшей зданию новый художественный образ, характерный для конца XIX в. [11]. Основной четверик надстроен. Нижняя часть (две трети) сруба сложена из старых толстых бревен. Верхняя его часть срублена из более тонкого леса и состояние поверхности бревен более новое. Трапезная увеличена в длину почти вдвое. Первоначальная западная стена трапезной выпиlena, от нее остались только короткие перерубы. Кроме того, старые стены трапезной увеличены в высоту. Алтарь сейчас не имеет традиционного повала. Однако на бревнах основного четверика с восточной стороны обнаруживаются врубки от бревен, свидетельствующие, что небольшой повал был, но позднее верхние одно-два бревна удалены и стена увеличена в высоту. Соответственно и крыша алтаря повышена (рис. 2).

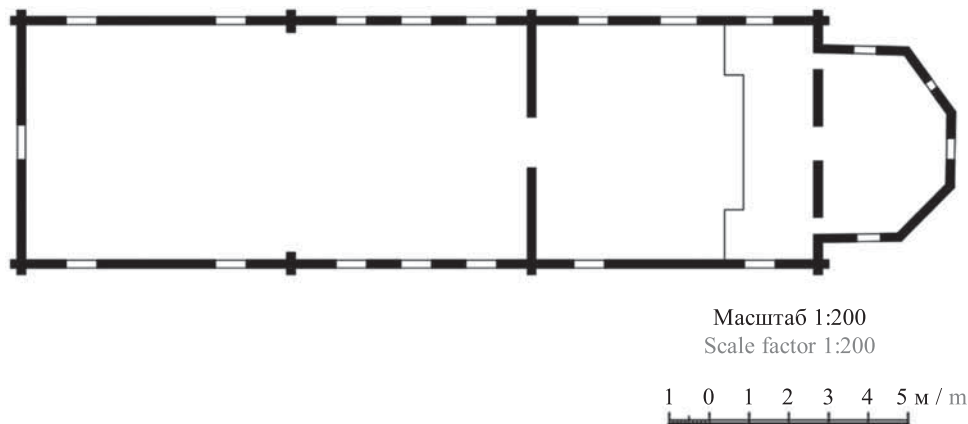


Рис. 1. План Церкви Вознесения Господня в с. Зарубино, 2022. Автор И.В. Воеводин

Fig. 1. Layout of the Church of the Ascension of the Lord in Zarubino, 2022. By I.V. Voevodin

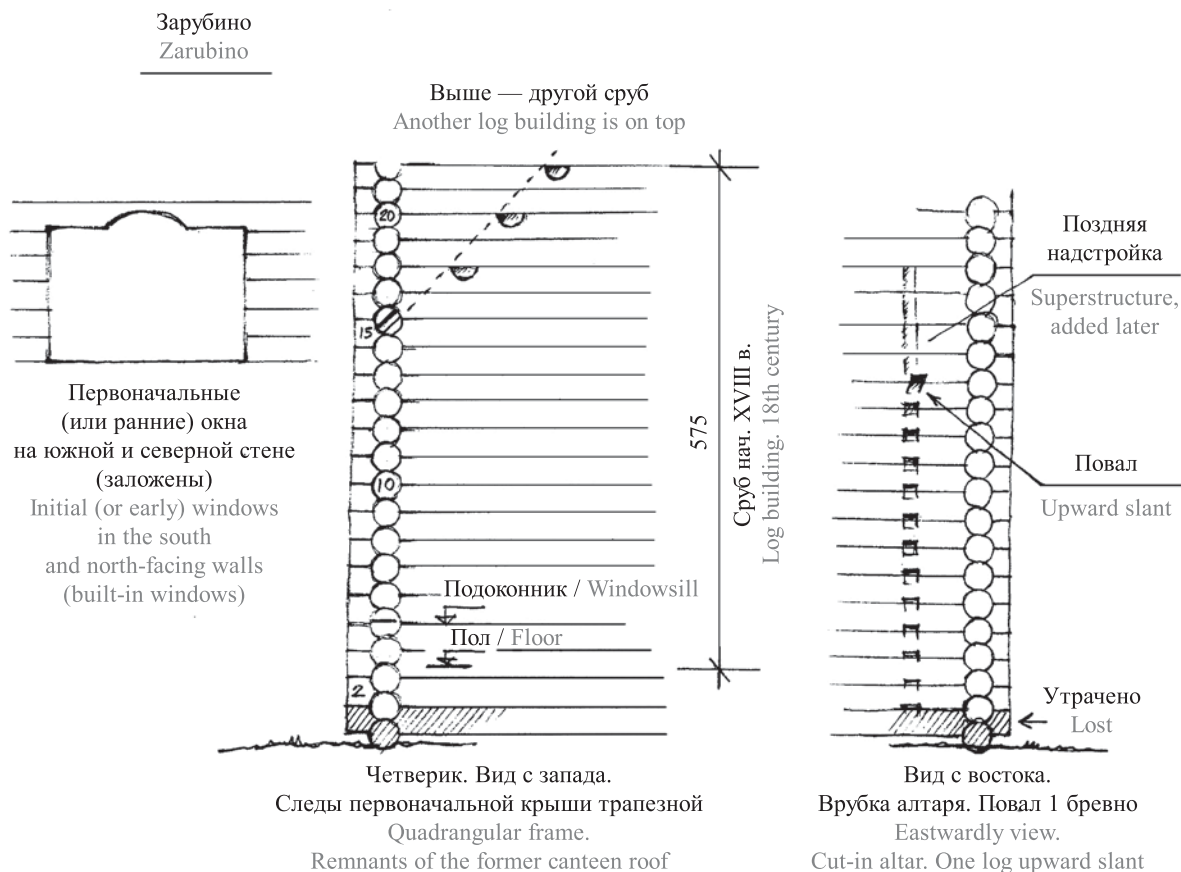


Рис. 2. Следы утраченного первоначального покрытия трапезной и повала алтарного прируба. Рисунок А.Б. Бодэ
Fig. 2. Traces of the original roof of the canteen lost and the upward slant of the wooden addition, the altar. Drawing by A.B. Bode

На западной стене основного четверика также имеются следы от первоначальной крыши трапезной. Стены ее были ниже существующих на четыре бревна, а уклон крыши — круче. От подкровельных слег остались следы. Они врублены в западную стену четверика через одно бревно. Крыша поднималась под углом около 45 градусов.

При таком устройстве крыш алтаря и трапезной покрытие основного четверика могло быть только двухскатным. Очевидно, что двухскатная крыша четверика, которая разобрана, начиналась от оставшихся старых боковых стен.

На обеих боковых стенах четверика имеются заложённые первоначальные оконные проемы, расположенные наверху на высоте около 4,5 м от земли, т.е. это окна второго света. Подобные окна указывают на наличие первоначальной утраченной галереи. Они располагались над крышей галереи. Обычно такие окна делали сдвоенными для того, чтобы в молитвенное помещение проникало побольше света. На церкви Вознесения в Зарубино окна прямоугольные горизонтальные, но посередине верхней перемычки вырезана небольшая арка. Судя по следам, это не сдвоенные, а тройные окна с аркой над центральной частью. Скорее всего, окна первоначально в начале XVIII в. сделали традиционные сдвоенные, но позже их переделали в тройные, соответствующие

вкусам XIX в. Вероятно, внизу на каждой стене находилось по одному окну около клиросов ближе к иконостасу. Боковые входы в основной четверик, очевидно, первоначально имелись. Галерея должна была соединяться с молитвенным помещением.

Таким образом, проведенное исследование выявило наличие двух главных строительных этапов Вознесенской церкви. После первоначальной постройки в 1703 г. в течение XVIII в. и, видимо, первой половины XIX в. это был больших размеров клетский храм. В ходе перестройки храма во второй половине XIX в. облик здания радикально изменился: он увеличился в размерах и получил новые формы крыши и завершения.

Церковь Троицы Живоначальной XVIII–XIX вв. в д. Худяково входит в комплекс, состоящий из двух церквей, окруженных кирпичной оградой с воротами. Церковь отличается большими размерами и состоит из основного четверика размером 8 × 8,5 м, пятистенного алтаря и трапезной, к которой отдельным срубом примыкает колокольня (рис. 3). Здание стоит на высоком подклете. Четверик несет восьмерик, сомкнутую крышу и главу. Стены снаружи покрыты обшивкой, внутри оштукатурены, местами сохранилась живопись.

Церковь датируется второй половиной XIX в. и поначалу действительно производит впечатление

поздней постройки. Она очень похожа на церковь Покрова Пресвятой Богородицы 1851 г. в с. Покровское Семеновского района и на типичные деревянные храмы XIX в. [12, с. 126–152]. Но при ближайшем рассмотрении некоторые детали явно свидетельствуют о древности постройки.

На открытой от обшивки западной стене основного сруба со стороны трапезной хорошо видно, что четверик более старый, а восьмерик построен из другого леса. В срубе восьмерика вторично использовано несколько бревен с характерными врубками

от слег покрытия от фронтона четверика. Это определенно указывает на то, что первоначально так же, как в Зарубино, четверик покрыт на два ската и к нему примыкала такая же двухскатная крыша трапезной (рис. 4).

На северной стене трапезной расположено волоковое окно. Это необычайно архаичная деталь. Подобные окошки зафиксированы на трапезных у церквей Никольской в д. Ковда конца XVI–XVII вв. [13, 18–28], Никольской на Троицком острове на Муезере 1602 г. [13, с. 29–40], Варваринской в д. Яндом-

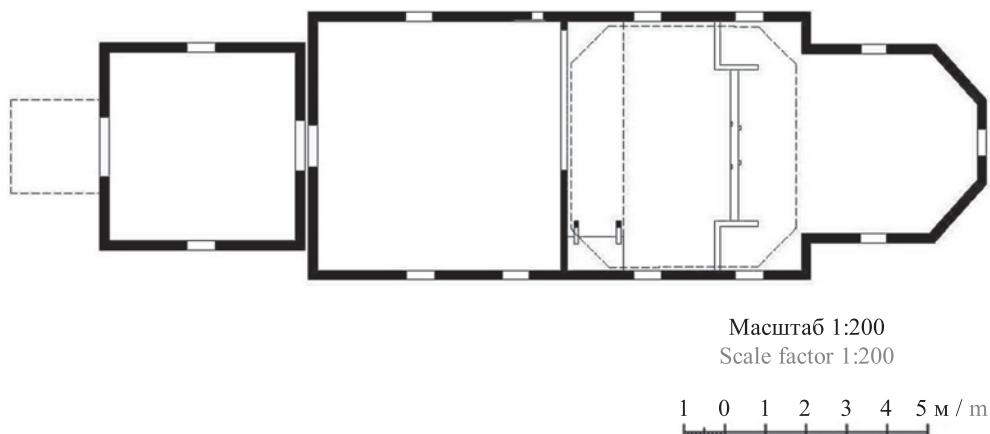


Рис. 3. План церкви Троицы Живоначальной в д. Худяково. Автор И.В. Воеводин

Fig. 3. Layout of the Church of the Life-Giving Trinity in Khudyakovo village. By I.V. Voevodin

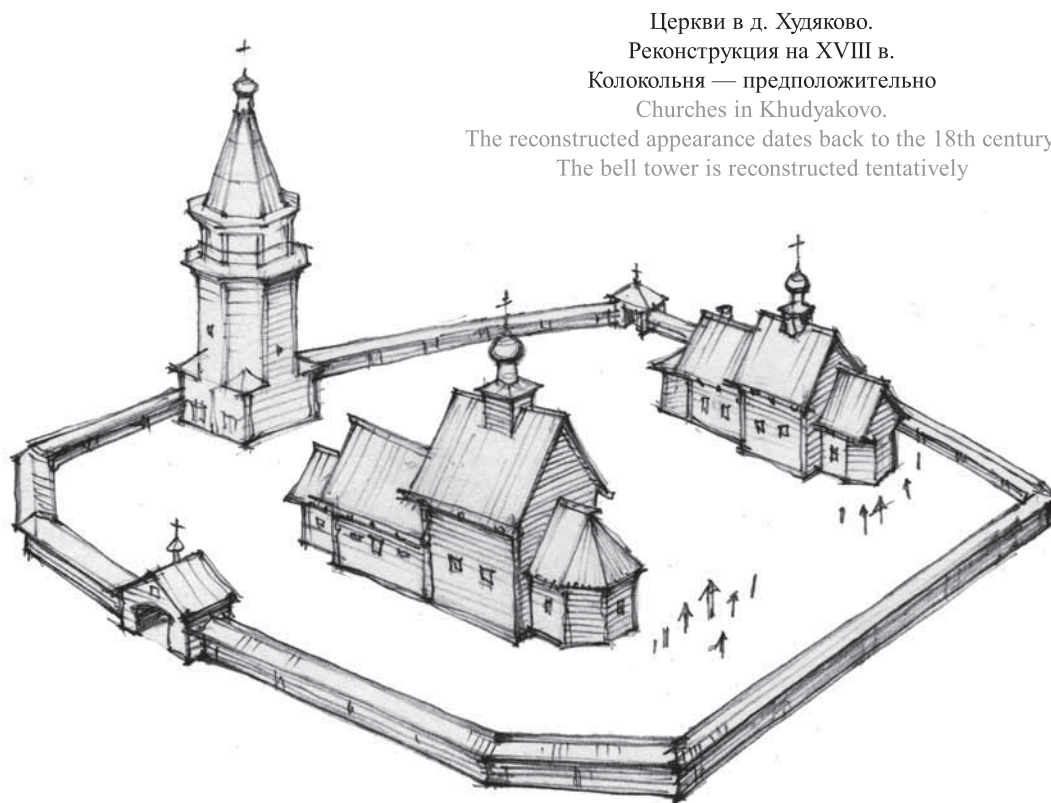


Рис. 4. Графическая реконструкция первоначального облика храмового комплекса в Худяково. Рисунок А.Б. Бодэ

Fig. 4. Graphically reconstructed original appearance of the church yard in Khudyakovo. Drawing by A.B. Bode

озеро 1652 г. [10, с. 39–49]. Местоположение окна в восточной части стены указывает на наличие печи в северо-западном углу.

В основном молитвенном помещении сохранились два клироса. Их устройство характерно для церквей XVII–XVIII вв. Аналогичные клиросы имеются в церкви Иоанна Богослова 1687 г. в д. Богослов под Ростовым, в Петропавловской церкви XVII–XVIII вв. в с. Вирма [14, с. 153, 254]. Немало примеров подобных конструкций, воспроизведенных в других предметах и изделиях, находим в исторических источниках [15, табл. 23. Вып. II. 1, 6; табл. 32. Вып. III. 2, 3, 5; табл. 51. Вып. IV. 5]. Клиросы в Троицком переделывались, отдельные элементы заменялись, но общая конструкция традиционна, рисунок резьбы подзоров соответствует аналогам XVII в.

Церковь в Троицком также имеет два ключевых строительных этапа. Первоначально четверик и трапезная имели высокие двухскатные крыши. Заметим отсутствие сеней, что вроде бы противоречит отапливаемой трапезной. То есть либо церковь была первоначально холодная, либо теплая трапезная могла быть и без сеней, учитывая, что это не жилое, а общественное здание. Судя по волоковому окну в трапезной и клиросам, церковь можно уверенно датировать XVIII в. и с большой долей вероятности — XVII столетием.

В XIX в. верхняя часть церкви перебрана, форма завершения изменена и вследствие этого изменился интерьер, окна растесаны, пристроена колокольня в виде отдельного сруба. Для XIX в. характерно подобное радикальное изменение форм при перестройках [16, с. 126–152]. Снаружи стены покрыты обшивкой, внутри — штукатуркой и расписаны.

Церковь Рождества Христова 1776 г. в д. Гари дошла до нашего времени с большими утратами, поэтому ее строительная история остается полностью не раскрытой. От храма остались стены основного четверика и пятистенного алтаря, рубленные из толстых бревен. На южной стене четверика отчетливо просматриваются следы перестройки. Стена включает часть более старого храма с новыми вставками на углах. Судя по состоянию поверхности бревен, южная стена вполне может быть частью храма XVII в. Размеры четверика при перестройке несколько увеличены. Алтарь тоже сохранился от предшествующего храма. Он, по сути, приставлен к существующему четверику с помощью сращивания бревен по длине. За счет этого немного увеличилась его длина (рис. 5).

Древняя южная стена сохранила первоначальные два одинарных окна и одно сдвоенное. Очень вероятно, что треугольные кокошники-фронтоны над окнами, вырубленные прямо в бревнах стены, относятся к первому строительному этапу. Этот прием редко встречается. За исключением Покровской церкви в Кижях, подобные вырубки под наличники на других объектах не встречаются. Возможно,

это особенность среднерусских деревянных построек (рис. 6).

В строительной истории этого памятника раскрываются три строительных этапа. Первоначально в XVII в. это был храм с основным четвериком размером около $9,5 \times 9,5$ м и пятистенным алтарем, чуть меньшим по длине, чем сохранившийся нынешний. Как выглядело утраченное завершение храма натурное обследование ответа не дает. Также не выявлены исторические фотографии или описания. Если завершение было ярусным, от него сохранились бы хоть какие-то следы. Вероятно, основной сруб церкви покрыт на два ската. Иное завершение представить затруднительно.

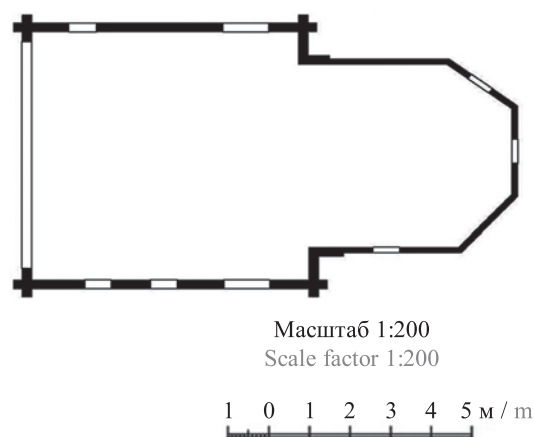


Рис. 5. План церкви Рождества Христова в д. Гари. Автор И.В. Воеводин

Fig. 5. Layout of the Church of the Nativity in Gari village. Author I.V. Voevodin

В 1776 г. здание перебрано и перестроено с использованием частей предшествующего древнего храма. Четверик увеличен до размера более чем 11×11 м с включением старой южной стены. Алтарный прируб использован от предшествующего храма. На южной стене четверика сохранились следы галереи и дверной проем. Данных об устройстве трапезной или оставшихся от нее каких-либо следов не имеется. Форму завершения на этом строительном этапе остается предполагать двухскатной, как и на первом этапе.

Далее во второй половине XIX в. стены здания покрываются обшивкой, устраиваются карнизы в духе классицизма, видимо, меняется деревянная кровля на металлическую. В силу происшедших утрат мы не можем получить более подробную информацию об устройстве храма. Судя по размерам и сохранившимся формам, церковь Рождества Христова в д. Гари в своем первоначальном виде аналогична храмам в Зарубино и Худяково.

Итак, перед нами ряд храмов клетского типа. Среднерусские клетские храмы, зафиксированные в Тверской, Московской, Владимирской, Костромской и Нижегородской областях, обладают определенными

типологическими признаками. Это относительно небольшие постройки, состоящие из основного четверика, пятистенного алтаря и трапезной [17, с. 68–76]. В их числе церковь Казанской иконы Божией Матери 1709 г. в д. Сурушино Тверской области, церковь Покрова Пресвятой Богородицы 1779 г., стоящая рядом с Троицким храмом, в д. Худяково Нижегородской области, церковь Рождества Христова 1782 г. в д. Рудня-Никитское Московской области. В их числе также церковь Казанской иконы Божией Матери 1742 г. в с. Богородское Нижегородской области, Никольская церковь конца XVII в. в д. Никольское Московской области [18, с. 36] и др. Храмы Владимирской области и отчасти Костромской отличаются наиболее

островерхими покрытиями, но в целом по объемной композиции среднерусские клетские храмы одинаковы.

Предметы настоящего исследования состоят из тех же форм, но они отличаются большими размерами основного четверика (от $8 \times 8,5$ до 11×11 м). Рассмотрим внимательнее аналоги. Из известных клетских храмов наибольшими размерами отличается Преображенская церковь 1712 г. с. Спас-Вежи [19, с. 74–75]. Размер ее четверика около 7×9 м, что роднит ее с рассматриваемым рядом объектов. Чуть меньшая, но тоже близкая по размерам — Троицкая церковь XVII–XVIII вв. в с. Троицкое на Ветлуге в Нижегородской области.

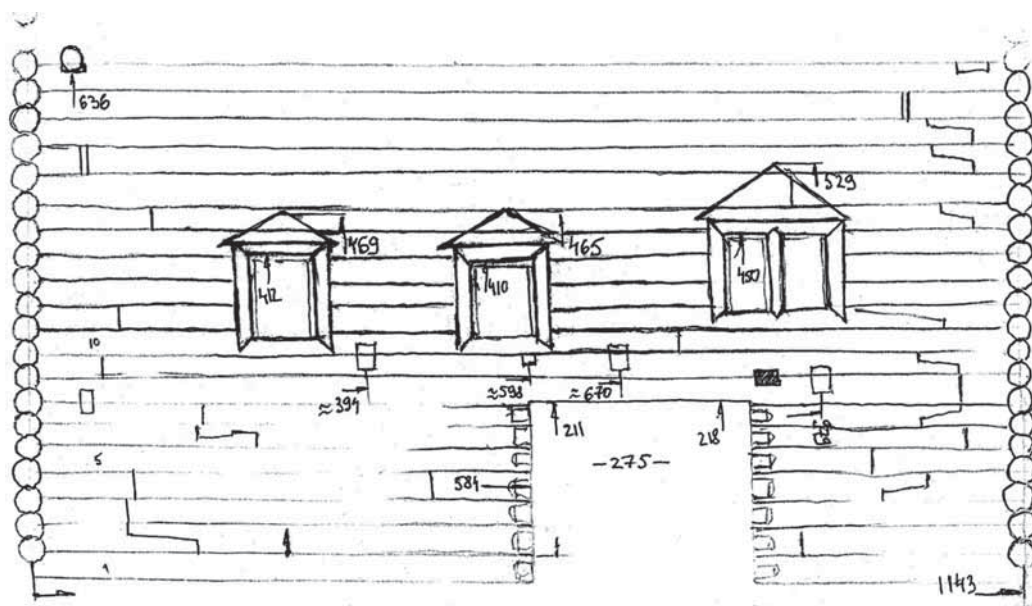


Рис. 6. Южная стена четверика. Рисунок Н.В. Дятликовой

Fig. 6. South-facing wall of the quadrangle. Drawing by N.V. Dyatlikova

Если небольшие клетские храмы преимущественно отапливаемые, в которых печь располагалась в трапезной, то исследуемые объекты скорее являются холодными церквями. Большие объемы основных молитвенных помещений вряд ли могли отапливаться из трапезной естественной циркуляцией воздуха, как это было в небольших храмах. Следов присутствия печей в церквях в Зарубино, Худяково, Гарях не обнаруживается. Теплая трапезная, скорее всего, имела в Зарубино, но неизвестно, отапливалась ли она на первом строительном этапе, когда трапезная была небольшая. Во всех перечисленных объектах отсутствует притвор (сени), который примыкал к трапезной с западной стороны. Притвор — характерная часть отапливаемых трапезных. Троицкая церковь в с. Троицкое также неотапливаемая. Таким образом, большинство фактов указывает на то, что исследуемые объекты, включая церковь Спас-Вежи, не отапливались.

Как известно, деревянные храмовые комплексы состояли из двух церквей — теплой и холодной [20,

с. 24–26]. Теплые храмы были небольшие с низкими потолками для сбережения тепла. Холодные, напротив, высокие с просторными интерьерами. Сочетания архитектурных форм бывали разные, но среди распространенной композицией был холодный шатровый храм и теплая клетская церковь.

Необходимо отметить, что существуют исторические сведения о сочетании двух клетских храмов, один из которых — холодный, другой — теплый. Например, две церкви XVI в. на Пречистенском погосте на Водлозере (Карелия) [21, с. 351]. Близкий пример храмового комплекса, состоящего из двух клетских церквей, — это исследуемая Троицкая церковь и стоящая рядом Покровская.

Таким образом, становится понятным назначение и архитектурные характеристики исследуемых объектов. Это холодные (летние) клетские храмы, имевшие значительные по площади помещения, вмещавшие много прихожан. По формам эти постройки в целом соответствовали всем типологическим ха-

рактикам клетских церквей, выделяясь лишь размерами и отсутствием отопления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Клетские деревянные храмы имеют многовековую историю. Древнерусские храмы были неотапливаемыми. Отапливаемые храмы получили распространение примерно с XVI в. Соответственно клетские холодные храмы, скорее всего, существовали издревле. С развитием высотности в церковной архитектуре деревянные холодные храмы XVII–XVIII вв. становятся шатровыми, ярусными или многоглавыми. Клетские храмы — преимущественно теплые. То есть в эволюции архитектурных форм деревянных холодных храмов клетские церкви занимают ранние стадии. С распространением теплых деревянных церквей формировались храмовые

комплексы, включающие два однотипных здания — теплое и холодное, которые были схожими по архитектурным формам, но отличались размерами. Настоящее исследование позволяет в типологической группе клетских деревянных храмов выделить подгруппу холодных клетских церквей, отличающихся большими размерами.

Изучение и сохранение рассмотренных объектов имеет важное значение для социальной и экономической жизни малых поселений [22, с. 50–54; 23, с. 1–6]. Совокупность полученных фактов и аргументов позволяет получить новые знания об архитектуре, эволюции и типологии русского деревянного зодчества. Дальнейшие исследования в данном направлении могут быть нацелены на выявление новых аналогичных объектов, изучение и анализ конструкций покрытий, что остается недостаточно изученным в силу немногочисленности объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Khodakovsky E.* Wood in the Architecture of Europe and Russia: National Specifics and International Research // *Historic Wooden Architecture in Europe and Russia*. 2015. Pp. 6–17. DOI: 10.1515/9783035605426-001
2. *Khodakovsky E.* Wooden Church Architecture of the Russian North. Regional Schools and Traditions (14th–19th centuries). London : Routledge, 2015. DOI: 10.4324/9781315723181
3. *Ходаковский Е.В., Бодэ А.Б., Зинина О.А., Носкова А.Г.* Деревянное храмостроительство Русского Севера конца XVIII – начала XX века // *Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. Гуманитарные и общественные науки*. 2019. № 3 (96). С. 145–156. DOI: 10.22204/2587-8956-2019-096-03-145-156
4. *Khodakovsky E., Noskova A.* Archives and Historical Documents in Contemporary Research of the Wooden Architecture of the Russian North // *Historic Wooden Architecture in Europe and Russia*. 2015. Pp. 78–91. DOI: 10.1515/9783035605426-007
5. *Medvedeva M.* The Imperial Archaeological commission (1859–1918) and cultural heritage management in Russia // *Architectural Conservation and Restoration in Norway and Russia*. 2017. Pp. 38–55. DOI: 10.4324/9781315276205-4
6. *Красовский М.* Курс истории русской архитектуры. Часть I. Деревянное зодчество. СПб. : Сатис держава, 2005. С. 178–208.
7. *Бодэ А.Б.* «Верх клинчатой». Одна из особенностей деревянных церквей Русского Севера // *Архитектурное наследство*. 2010. № 53. С. 54–63.
8. *Бодэ А.Б.* Деревянные храмы с каскадными покрытиями как отголосок архитектурных традиций Новгородской земли // *Вестник МГСУ*. 2011. № 1. Т. 2. С. 52–57.
9. *Шановалова Л.Г.* Каргопольские храмы с бочечным завершением // *Историко-культурное наследие Русского Севера. Проблемы изучения, сохранения, использования*. Каргополь, 2006. С. 208–209.
10. *Ополовников А.В.* Русское деревянное зодчество: памятники шатрового типа; памятники клетского типа и малые архитектурные формы; памятники ярусного, кубоватого и многоглавого типа. М. : Искусство, 1986. 310 с.
11. *Ходаковский Е.В.* «Под фасад каменного строения»: обшивка деревянных церквей Русского Севера в конце XVIII – начале XX в. // *Academia. Архитектура и строительство*. 2021. № 3. С. 25–35. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-3-25-33
12. *Ходаковский Е.В.* Деревянная церковная архитектура Русского Севера XIX – начала XX века. Летопись храмостроительства. СПб.: Коло, 2020. 344 с.
13. *Шургин И.Н.* Исчезающее наследие: очерки о русских деревянных храмах XV–XVIII веков. М. : Совпадение, 2006. 118 с.
14. *Ополовников А.В.* Сокровища Русского Севера. М. : Стройиздат, 1989. 366 с.
15. *Бобринский А.А.* Народные русские деревянные изделия: предметы домашнего, хозяйственного и отчасти церковного обихода. М. : Шевчук В. изд-во, 2011.
16. *Ходаковский Е.В.* Деревянная церковная архитектура Русского Севера XIX – начала XX века. Метаморфозы традиции. СПб. : Коло, 2021. 264 с.
17. *Орфинский В.П., Гришина И.Е.* Типология деревянного культового зодчества Русского Севера. Петрозаводск : Издательство ПГУ, 2004. 278 с.
18. *Ильин М.А.* Подмосковье. М. : Искусство, 1974. 271 с.
19. *Забелло С.Я., Иванов В.Н., Максимов П.Н.* Русское деревянное зодчество. М. : Государственное

архитектурное издательство Академии архитектуры СССР, 1942. 214 с.

20. Ушаков Ю.С. Ансамбль в народном зодчестве русского Севера. Л. : Стройиздат : Ленинградское отделение, 1982. 168 с.

21. Жуков А.Ю. Водлозерский погост Новгородского и Олонецкого уездов: XVI – первая треть XVIII вв. // Сельская Россия: прошлое и настоящее: мат. XI Всерос. науч.-практ. конф. 2008. С. 347–377.

22. Нацокина М.В. Проблемы сохранения архитектурного наследия и создания туристической привлекательности малого исторического города России // Проект Байкал. 2019. Т. 16. № 61. С. 50–55. DOI: 10.7480/projectbaikal.61.1500

23. Khodakovskiy E.V., Lexau S.S. The Northern neighbours and their heritage // Architectural Conservation and Restoration in Norway and Russia. 2017. Pp. 1–6. DOI: 10.4324/9781315276205-1

Поступила в редакцию 24 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 29 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2023 г.

О Б АВТОРАХ: **Андрей Борисович Бодэ** — кандидат архитектуры, ведущий научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства** — филиал **Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (НИИТИАГ — филиал ЦНИИП Минстроя России)**; 111024, г. Москва, ул. Душинская, д. 9; доцент кафедры архитектуры; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 277025, Scopus: 57214857461, ResearchID: AFO-1810-2022, ORCID: 0000-0002-9866-845X; bode-niitag@yandex.ru;

Илья Владимирович Воеводин — кандидат технических наук, главный архитектор; **Автономная некоммерческая организация «Исследование и реставрация памятников деревянного зодчества “Традиция”**; 125008, г. Москва, Коптевский бул., д. 6; РИНЦ ID: 1081824; terra-iv@mail.ru;

Татьяна Валентиновна Жигальцова — кандидат философских наук, доцент кафедры культурологии и религиоведения; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова**; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; РИНЦ ID: 552031, Scopus: 57217045158, ResearchID: ABD-2393-2021, ORCID: 0000-0002-5471-1540; zhitava@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Khodakovskiy E. Wood in the Architecture of Europe and Russia: National Specifics and International Research. *Historic Wooden Architecture in Europe and Russia*. 2015; 6-17. DOI: 10.1515/9783035605426-001

2. Khodakovskiy E. *Wooden Church Architecture of the Russian North. Regional Schools and Traditions (14th–19th centuries)*. London, Routledge, 2015. DOI: 10.4324/9781315723181.

3. Bode A.B., Zinina O.A., Noskova A.G., Khodakovskiy E.V. Wooden church construction in the Russian North in late 18th–early 20th century. *Proceedings of the Russian Foundation for Basic Research. Humanities and Social Sciences*. 2019; 3(96):145-156. DOI: 10.22204/2587-8956-2019-096-03-145-156 (rus.).

4. Khodakovskiy E., Noskova A. Archives and Historical Documents in Contemporary Research of the Wooden Architecture of the Russian North. *Historic Wooden Architecture in Europe and Russia*. 2015; 78-91. DOI: 10.1515/9783035605426-007

5. Medvedeva M. The Imperial Archaeological commission (1859–1918) and cultural heritage

management in Russia. *Architectural Conservation and Restoration in Norway and Russia*. 2017; 38-55. DOI: 10.4324/9781315276205-4

6. Krasovskiy M. *A course of history of Russian architecture. Part I. Wooden architecture*. St. Petersburg, Satis derzhava, 2005. (rus.).

7. Bode A.B. “Wedge-Shaped Top”. A Peculiar Feature of Wooden Churches in the Russian North. *Architectural Heritage*. 2010; 53:54-63. (rus.).

8. Bode A.B. Wooden temples with cascade roofing as echo of architectural traditions of Novgorodskaya land. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 1(2): 52-57. (rus.).

9. Shapovalova L.G. Kargopol churches with bochka (barrel) tops. *Historical and cultural heritage of the Russian North. Issues of study, preservation, usage*. 2006; 208-209. (rus.).

10. Opolovnikov A.V. *Russian wooden architecture. Tented roof monuments. Klet'-type monuments and hardscape elements. Tiered, square onion dome,*

and multi-dome monuments. Moscow, Iskusstvo, 1986; 310. (rus.).

11. Khodakovskiy E.V. “Under the Facade of a Stone Building”: the Cladding of Wooden Churches of the Russian North in the 19th century. *Academy. Architecture and Construction*. 2021; 3:25-35. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-3-25-33 (rus.).

12. Khodakovskiy E.V. *Wooden church architecture of the Russian North in XIX–early XX century*. St. Petersburg, Kolo, 2020; 344. (rus.).

13. Shurgin I.N. *Vanishing heritage. Essays on Russian wooden temples of the 15-18th centuries*. Moscow, Sovpadenie, 2006; 118. (rus.).

14. Opolovnikov A.V. *Treasures of the Russian North*. Moscow, Stroyizdat, 1989; 366. (rus.).

15. Bobrinskiy A.A. *Russian folk wooden items: household and partly church-related articles*. Moscow, V. Shevchuk, 2011. (rus.).

16. Khodakovskiy E.V. *Wooden church architecture of the Russian North in XIX–early XX century. Metamorphosis of traditions*. St. Petersburg, Kolo, 2021; 264. (rus.).

17. Orfinskiy V.P., Grishina I.E. *Typology of wooden cult architecture of the Russian North*. Petroza-

vodsk, Publishing house of Petrozavodsk State University, 2004; 278. (rus.).

18. Il'in M.A. *Outer Moscow*. Moscow, Iskusstvo, 1974; 271. (rus.).

19. Zabello S.Ya., Ivanov V.N., Maksimov P.N. *Russian wooden architecture*. Moscow, State architectural publishing house of the USSR Academy of Architecture, 1942; 214. (rus.).

20. Ushakov Yu.S. *Ensemble in folk architecture of the Russian North*. Leningrad, Stroyizdat : Leningrad branch, 1982; 168. (rus.).

21. Zhukov A.Yu. Vodlozersky pogost (churchyard) of Novgorodsky uезд and Olonetsky uезд in XVI – first third of XVIII century. *Rural Russia: past and present. Proceedings of the XI all-Russian research and practice conference*. 2008; 347-377. (rus.).

22. Nashchokina M.V. The issues of preservation of architectural heritage and creation of tourist attraction of a small historic town in Russia. *Project Baikal*. 2019; 16(61):50-55. DOI: 10.7480/projectbaikal.61.1500 (rus.).

23. Khodakovskiy E.V., Lexau S.S. The Northern neighbours and their heritage. *Architectural Conservation and Restoration in Norway and Russia*. 2017; 1-6. DOI: 10.4324/9781315276205-1

Received November 24, 2022.

Adopted in revised form on November 29, 2022.

Approved for publication on February 6, 2023.

BIONOTES: **Andrey B. Bode** — Candidate of Architecture, Leading Researcher; **Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning — a branch of the Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation (NIITIAG — a branch of TsNIIP of the Ministry of Construction of Russia)**; 9 Dushinskaya st., Moscow, 111024, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 277025, ResearchID: AFO-1810-2022, Scopus: 57214857461, ORCID: 0000-0002-9866-845X; bode-niitag@yandex.ru;

Ilya V. Voevodin — Candidate of Technical Sciences, Chief Architect; **Autonomous non-profit organization Research and restoration of monuments of wooden architecture “Tradition”**; 6 Koptevskiy boul., Moscow, 125008, Russian Federation; ID RSCI: 1081824; terra-iv@mail.ru;

Tatiana V. Zhigaltsova — Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor of the Department of Cultural and Religious Studies; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov**; 17 Severnaya Dvina embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ID RSCI: 552031, Scopus: 57217045158, ResearchID: ABD-2393-2021, ORCID: 0000-0002-5471-1540; zhitava@gmail.com.

Contribution of the authors: all the authors contributed to this article equivalently.

The authors declare that there is no conflict of interests.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.07:624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.202-217

Зависимость коэффициента динамичности от жесткости ферм при разных видах локальных разрушений

Александр Романович Туснин, Мария Петровна Бергер

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Для обеспечения безопасности зданий и сооружений при наступлении аварийной ситуации конструкции и отдельные конструктивные элементы должны сохранять несущую способность при возникновении локальных повреждений. Цель исследования — изучение влияния жесткости стальной фермы на величину коэффициента динамичности при проведении расчетов на устойчивость к прогрессирующему обрушению. Решение данной задачи является одним из этапов разработки практической методики расчета стальных ферм покрытия с локальными разрушениями элементов.

Материалы и методы. Выполнена серия численных и аналитических расчетов стальных ферм пролетами 24, 48, 72, 108 и 144 м с разными вариантами локальных разрушений элементов верхнего и нижнего поясов.

Результаты. Изучено влияние жесткости ферм на коэффициент динамичности после исключения из расчетной схемы отдельных элементов. Сравнение полученных значений коэффициентов динамичности при аналитическом и численном расчетах показало их хорошее соответствие (разница не превышает 15 %). Проведен численный динамический расчет пространственного покрытия с типовым расположением связей с учетом выхода из строя одного из элементов ферм. Получено распределение коэффициента динамичности в пределах поврежденной фермы и на соседних фермах.

Выводы. Проведенные аналитические и численные исследования показали, что увеличение жесткости фермы ведет к уменьшению коэффициента динамичности. В запас несущей способности при выполнении практических расчетов допустимо использование аналитических зависимостей. Численный анализ продемонстрировал, что при работе в составе пространственного каркаса промышленного здания нагрузка с поврежденной фермы перераспределяется на соседние фермы и динамические усилия в ней меньше, чем в отдельно работающей ферме. Повреждение сжатого пояса является более неблагоприятным вариантом, значение коэффициентов динамичности превышает значения для растянутых поясов в среднем на 26 %, и ферма работает практически независимо от соседних ферм, как плоская.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стальные фермы, коэффициент динамичности, локальное разрушение, численный расчет, аналитический расчет, прогрессирующее обрушение, запредельная работа стержней

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснин А.Р., Бергер М.П. Зависимость коэффициента динамичности от жесткости ферм при разных видах локальных разрушений // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 202–217. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.202-217

Автор, ответственный за переписку: Мария Петровна Бергер, bergemp@mgsu.ru.

Dependence of the dynamic coefficient on rigidity of trusses in case of versatile local failures

Alexander R. Tusnin, Maria P. Berger

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

ABSTRACT

Introduction. To ensure the safety of buildings and structures in case of emergency, structures and individual structural elements must maintain their bearing capacity in the event of local damage. The purpose of the article is to study the effect of rigidity of a steel truss on the dynamic coefficient in the process of analyzing resistance to progressive collapse. A solution to this problem is a stage in the development of a practical method for analyzing steel trusses in cases of local failures of elements.

Materials and methods. Within the framework of the study, several numerical and analytical computations of steel trusses, having spans of 24, 48, 72, 108 and 144 m, were performed. Steel trusses were subjected to different local failures of elements in top and bottom chords.

Results. The effect of rigidity of trusses on the dynamic coefficient is studied for cases of withdrawal of individual elements from the analytical model. Values of dynamic coefficients, obtained by means of analytical and numerical calculations, demonstrated good convergence (the discrepancy did not exceed 15 %). The dynamic numerical calculation of the 3D roofing skeleton with a standard pattern of horizontal ties was performed, taking into account the local failure of a truss element. The distribution of the dynamic coefficient within a damaged truss and the nearest trusses was obtained.

Conclusions. Analytical and numerical studies showed that an increase in the rigidity of a truss caused a reduction in the value of the dynamic coefficient. Analytical dependences can be used as the bearing capacity reserve when making analytical calculations. Numerical analysis showed that if a damaged truss resisted loading, being part of the 3D framework of an industrial building, the load, acting on the damaged truss, was redistributed to neighboring trusses, and dynamic forces in it were smaller than those in an independent load-bearing truss. The damage of the compressed chord was a worse case; the value of the dynamic coefficients exceeded the values for the case of stretched chords by an average of 26 %, and the truss resisted loads nearly independently from neighboring trusses, behaving as a flat element.

KEYWORDS: steel truss, dynamic coefficient, local failure, numerical analysis, analytical analysis, progressive collapse, beyond-the-limit behaviour of rods

FOR CITATION: Tusnin A.R., Berger M.P. Dependence of the dynamic coefficient on rigidity of trusses in case of versatile local failures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):202-217. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.202-217 (rus.).

Corresponding author: Maria P. Berger, bergemp@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежной и долговечной работы несущих конструкций является одной из основных задач современного проектирования [1, 2]. В настоящее время широко изучаются проблемы живучести различных конструктивных систем зданий и сооружений [3–8]. В покрытиях зданий промышленного, общественного и административного назначения часто применяются стальные фермы. Факт увеличения сроков эксплуатации промышленных зданий, возведенных в период с 1930–1950 гг., отмечается в работе [9]. С ростом срока эксплуатации повышается и степень вероятности появления механических повреждений, что существенно влияет на несущую способность конструкций. Согласно публикациям [10–12] длительность эксплуатации промышленных зданий в нашей стране сегодня превышает 50 лет. В значительной части обследованных зданий обнаружены нарушения технического состояния конструкций, ряд зданий находится в предаварийном состоянии. Эксплуатация зданий, конструкции которых имеют локальные разрушения, представляет повышенную опасность. На данный момент разработано несколько подходов к оценке риска возникновения прогрессирующего обрушения [13–17].

Научный и практический интерес представляет исследование работы стальных стропильных ферм покрытия с учетом возможного выхода из строя одного из элементов фермы. Анализ работы стержневых систем при внезапном удалении одного из элементов приведен в трудах [18, 19].

Цель исследования — изучение особенностей работы поврежденных стальных ферм. В зависимости от времени, в течение которого происходит исключение элемента фермы, зависят усилия, возникающие в конструкции. При постепенном выключении

элемента из работы, например при пожаре, осадке опор, уменьшении сечения в процессе коррозии и т.п., конструкция продолжает работать как статически нагружаемая. При исключении поврежденного элемента из работы конструкции менее чем за 1 с (при хрупком разрушении или потере устойчивости) в конструкции развиваются заметные колебания. Исследования [20] показали, что чем меньше время исключения, тем больше динамические усилия, появляющиеся в конструкции. Для учета динамических эффектов часто применяется методика квазистатического расчета, в рамках которой вводятся коэффициенты динамичности, увеличивающие нагрузку и позволяющие учесть возникающий при повреждении конструкции динамический эффект. При правильном выборе коэффициента динамичности полученные усилия близки по значениям к динамическим усилиям, что дает возможность проводить расчет с учетом прогрессирующего обрушения в квазистатической постановке [21].

В настоящей статье представлены результаты исследования работы стальных ферм различных жесткостей с локальными повреждениями: отдельно стоящих и в составе пространственного каркаса с типовым расположением связей по покрытию. Сечения элементов ферм выбирались из условия обеспечения несущей способности конструкции с учетом возможных повреждений при действии нагрузок, определенных действующими нормами. Для плоских ферм изучалась зависимость величины коэффициента динамичности от приведенной жесткости фермы. Расчет проводился в аналитической и численной постановках. Выполнен расчет ферм в составе пространственного каркаса численно в динамической постановке. Полученные значения коэффициентов динамичности сравнивались с результатами расчетов плоских ферм.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках проведенного исследования рассмотрены фермы пролетами 24, 48, 72, 104, 140 м. Нагрузка на фермы принималась с учетом устройства утепленной кровли по профилированному настилу, III снеговой район, шаг ферм 6 м. Геометрические

схемы плоских ферм приведены на рис. 1–5. Все узлы в фермах приняты жесткими. Были рассмотрены локальные разрушения наиболее нагруженного элемента верхнего и нижнего поясов, что является наиболее опасным сценарием. На рис. 1–5 места рассмотренных локальных повреждений показаны штриховыми линиями.

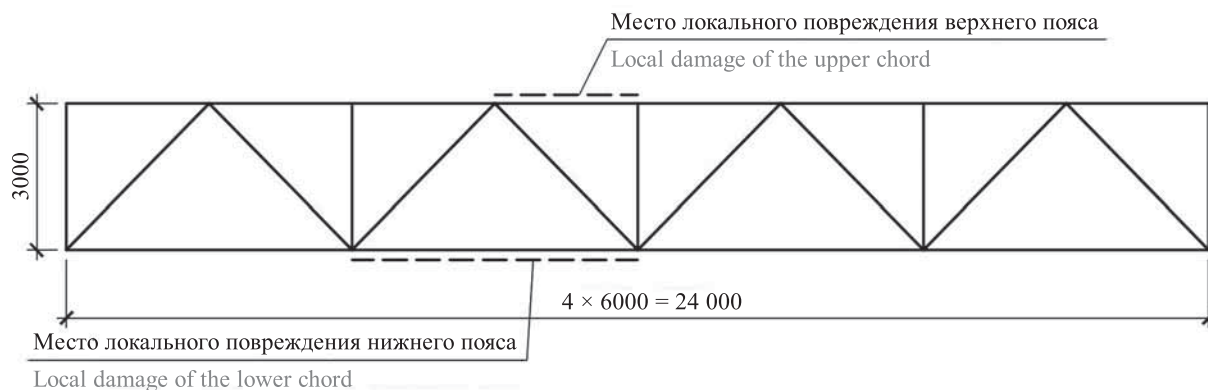


Рис. 1. Геометрическая схема фермы пролетом 24 м

Fig. 1. Skeleton of a 24-m span truss

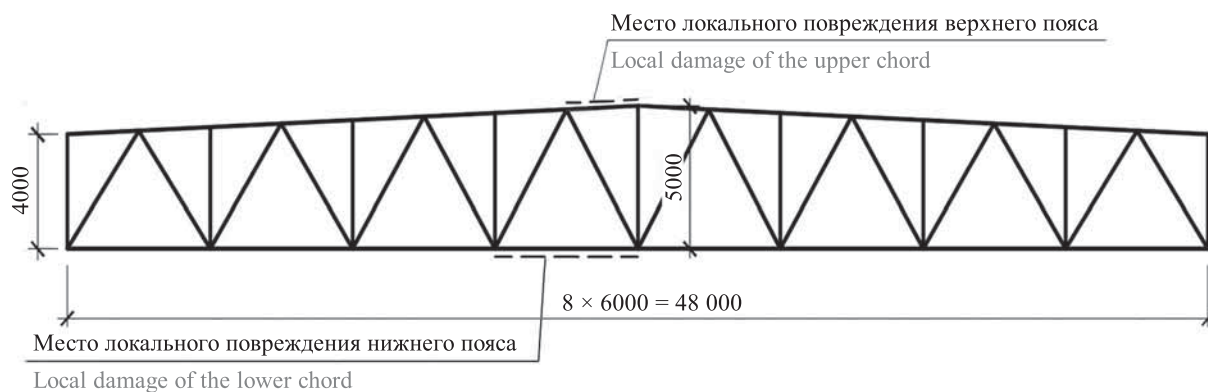


Рис. 2. Геометрическая схема фермы пролетом 48 м

Fig. 2. Skeleton of a 48-m span truss

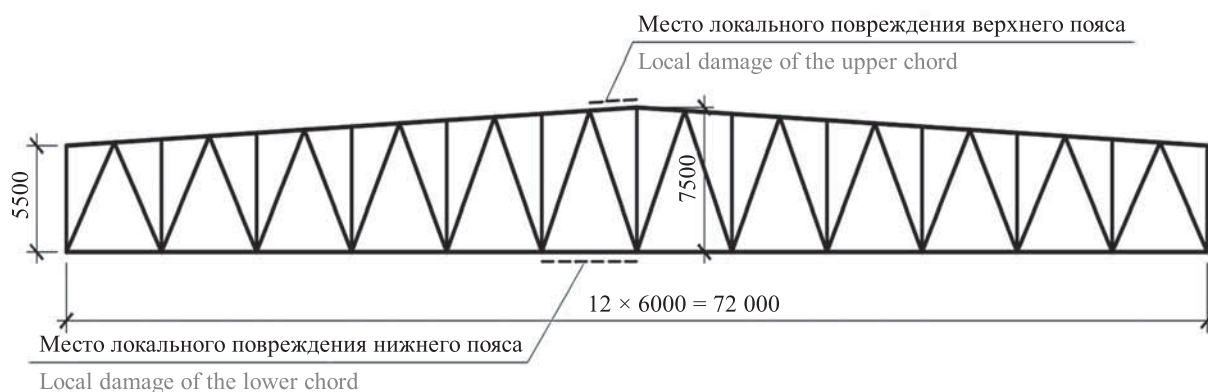


Рис. 3. Геометрическая схема фермы пролетом 72 м

Fig. 3. Skeleton of a 72-m span truss

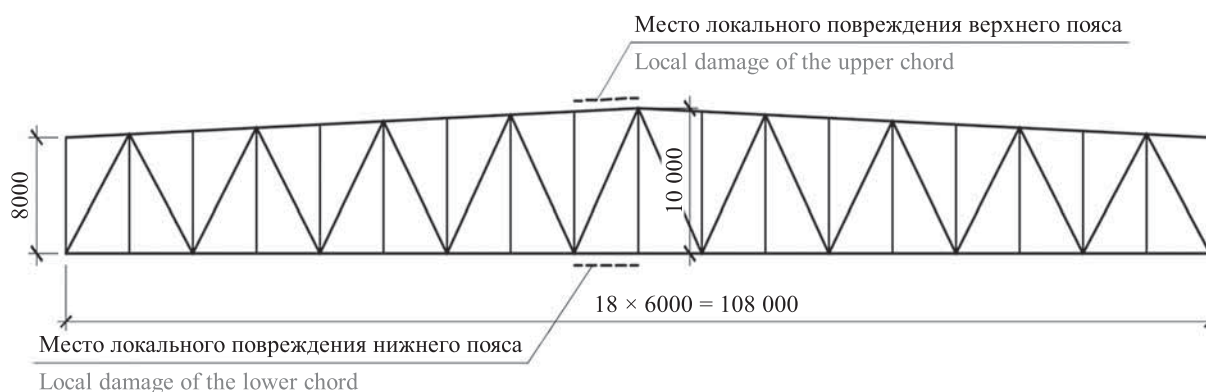


Рис. 4. Геометрическая схема фермы пролетом 108 м

Fig. 4. Skeleton of a 108-m span truss

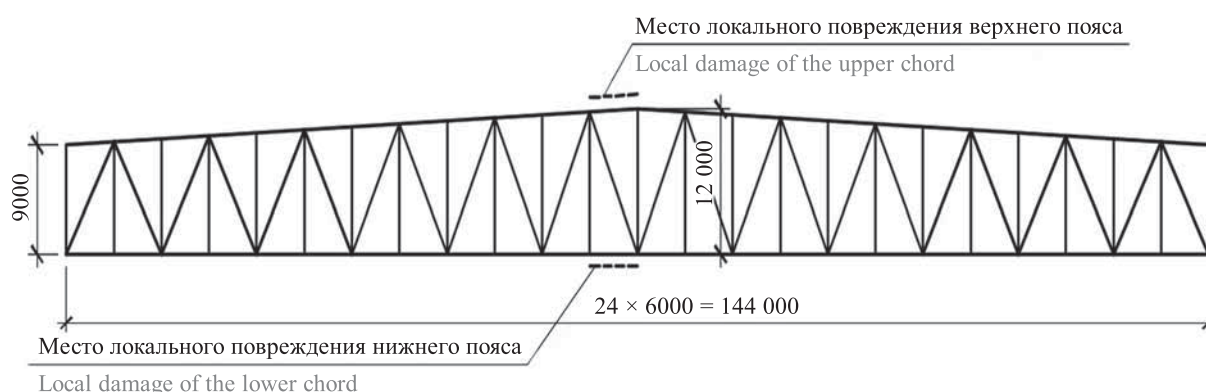


Рис. 5. Геометрическая схема фермы пролетом 144 м

Fig. 5. Skeleton of a 144-m span truss

Для пролета 24 м рассмотрена ферма с параллельными поясами. Для остальных пролетов — трапециевидные фермы, широко применяемые с целью перекрытия пролетов 48 м и более.

Коэффициент динамичности для исследуемых ферм и вариантов локальных повреждений определялся аналитически и численно в динамической постановке. Сравнение результатов численного расчета с аналитическими решениями позволяет оценить достоверность полученных результатов.

Аналитические расчеты выполнялись с помощью методики, изложенной в работе [20], на основании которой величина коэффициента динамичности рассчитывается по формуле:

$$k_d = 1 + \frac{w_0 - w}{w_0}, \quad (1)$$

где w_0 — прогиб поврежденной фермы; w — прогиб исходной фермы.

Прогибы исходной и поврежденной ферм вычисляются от статической нагрузки, на которую по действующим нормам следует выполнять расчет на прогрессирующее обрушение. Прогибы определяются в середине пролета фермы.

Расчеты исходной и поврежденной ферм выполнялись с применением вычислительного комплекса ЛИРА софт, версия 10.8. Фермы рассчитывались с учетом возможных повреждений поясов, что позволило подобрать сечения элементов, при которых обеспечена несущая способность ферм исходя из повреждений. После подбора сечений определялась изгибная жесткость фермы, которая обозначена как I_p — расчетная жесткость фермы. Далее для выбранных ферм жесткость последовательно менялась в диапазоне от 10^{-1} до 10^3 расчетной жесткости и определялся теоретический коэффициент динамичности.

При составлении пространственной расчетной схемы покрытия были выбраны фермы с расчетной жесткостью I_p . Конструктивная схема каркаса для всех пролетов принята рамной в поперечном направлении, связевой в продольном. Поперечная рама — однопролетная, шаг рам — 6,0 м, ригелем рамы служит стропильная ферма трапециевидальной очертания. Ферма крепится к колоннам шарнирно по изгибающему моменту в плоскости и из плоскости фермы, в опорном узле линейные перемещения фермы относительно колонны исключены. Общая устой-

чивость здания обеспечивается поперечными рамами и вертикальными связями, устраиваемыми по продольным рядам колонн при совместной работе с жесткими в горизонтальной плоскости дисками покрытия. Жесткость и геометрическая неизменяемость покрытия обеспечиваются системой горизонтальных и вертикальных связей по покрытию. Пояса ферм неразрезные, элементы решетки крепятся к поясам и друг к другу жестко. Узлы связей и распорок шарнирные

по изгибающему моменту и исключают линейные перемещения. Прогоны в расчетную схему не включались. На рис. 6, 7 показаны схемы расположения горизонтальных связей и распорок по нижнему и верхнему поясу ферм соответственно для фермы пролетом 108 м. Толстыми осевыми линиями показаны вертикальные связевые фермы.

Пространственные модели покрытий пролетами 48 и 72 м приведены на рис. 8, 9.

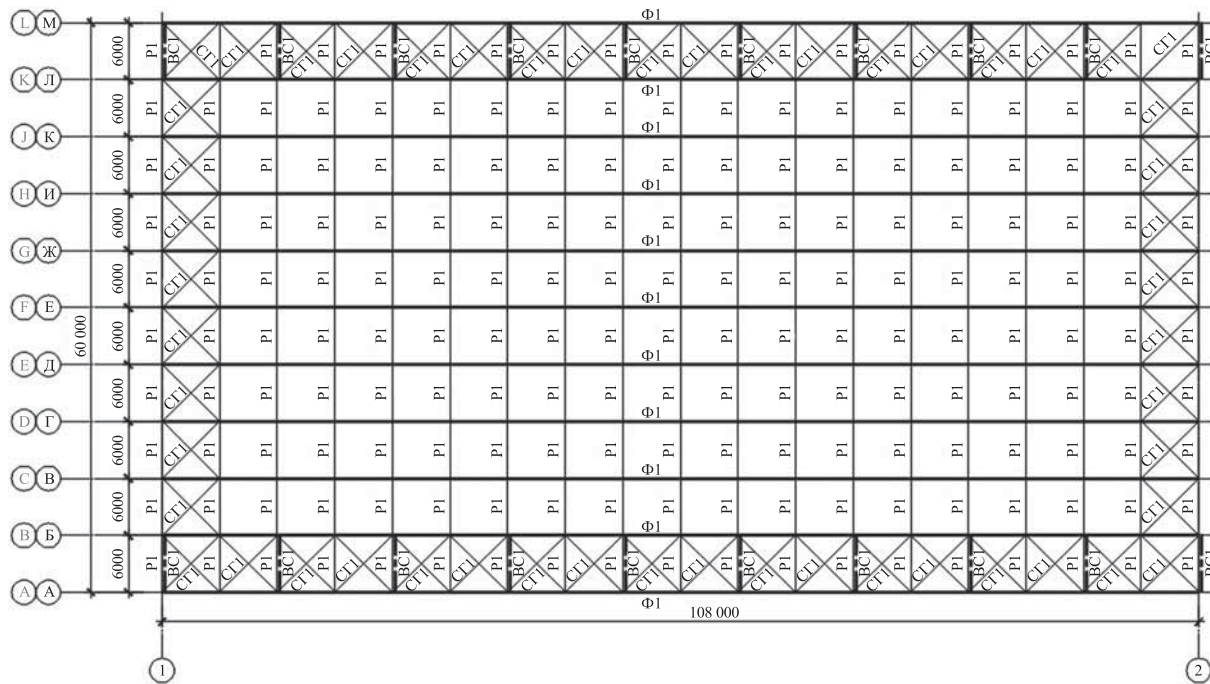


Рис. 6. Схема расположения связей и распорок по нижним поясам ферм
 Fig. 6. Layout of ties and braces along the bottom chords of trusses

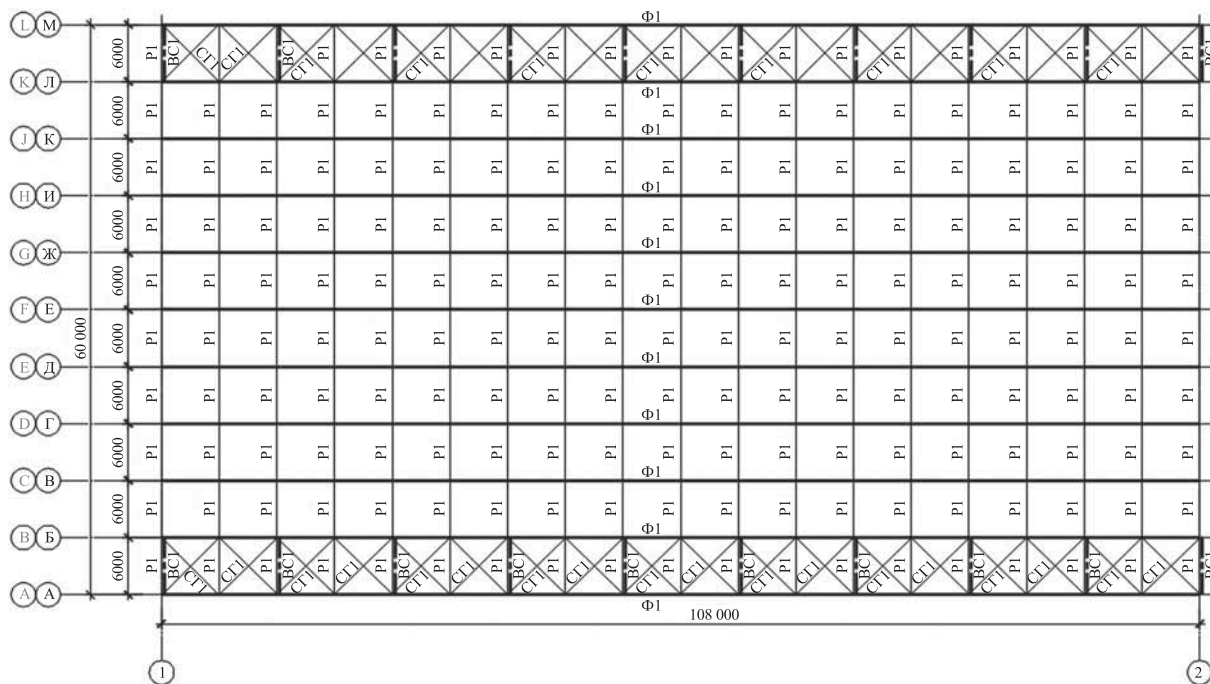


Рис. 7. Схема расположения связей и распорок по верхним поясам ферм
 Fig. 7. Layout of ties and braces along the upper chords of trusses

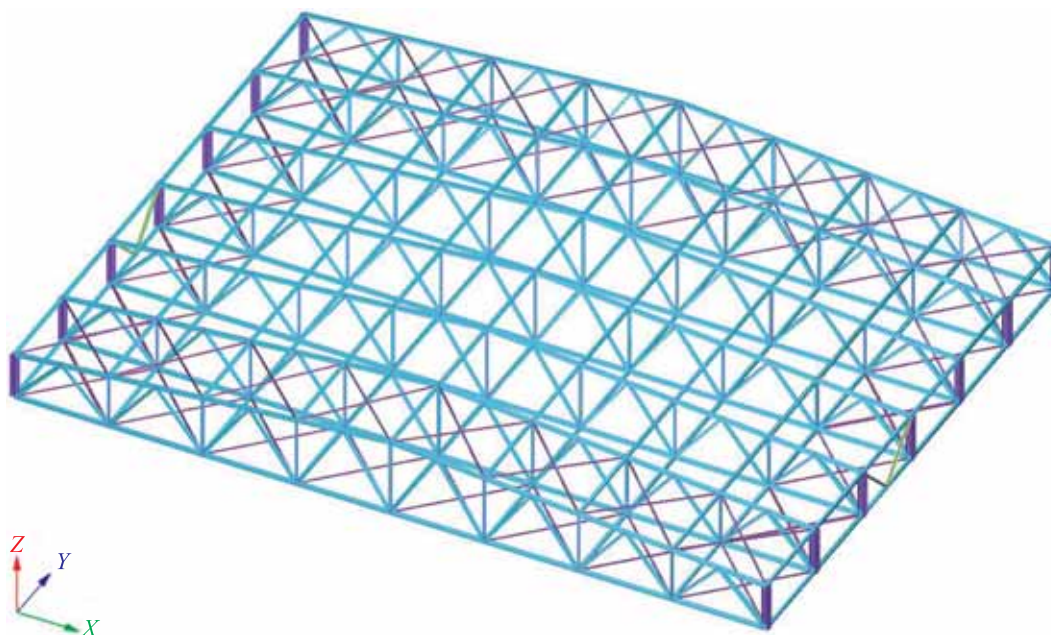


Рис. 8. Пространственная модель покрытия пролетом 48 м

Fig. 8. 3D model of the 48 m-span roofing skeleton

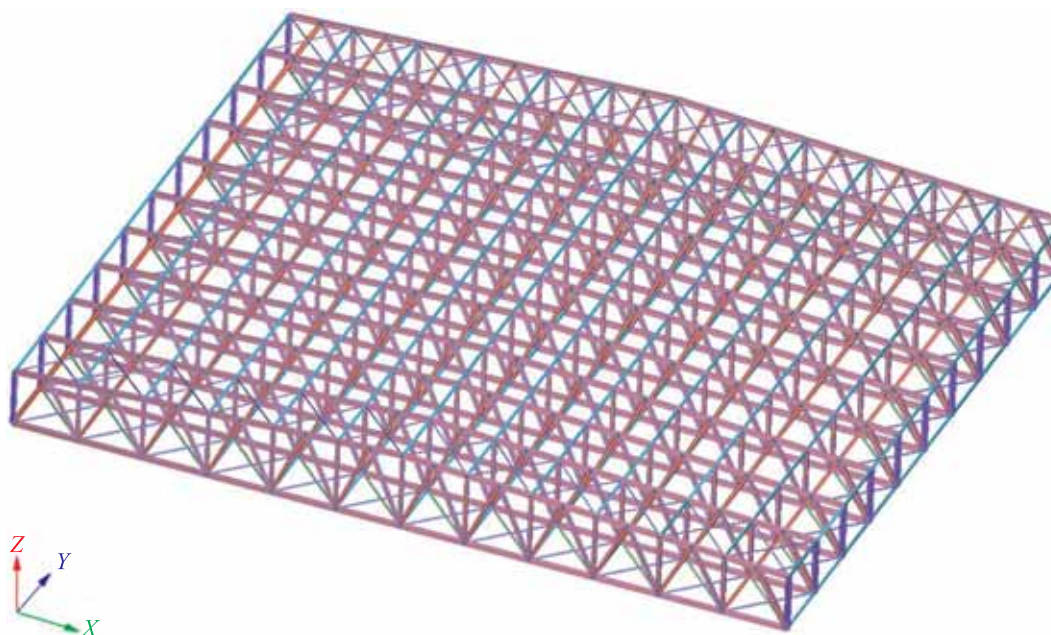


Рис. 9. Пространственная модель покрытия пролетом 72 м

Fig. 9. 3D model of the 72-m span roofing skeleton

Сечения стержней ферм назначены с учетом сохранения несущей способности фермы при самом неблагоприятном локальном разрушении, что позволяет выполнять статические и динамические расчеты поврежденной конструкции. Подбор сечений проводился по первой группе предельных состояний. Рассмотрены следующие расчетные ситуации:

- 1) поврежден стержень верхнего пояса фермы;
- 2) поврежден стержень нижнего пояса фермы.

Место расположения поврежденного стержня выбиралось на основании статического расчета каркаса, по мозаике усилий выбраны стержни с максимальным усилием, возникающим в верхнем или нижнем поясе. Затем выполнялся динамический расчет измененной расчетной схемы при постоянной внешней нагрузке на конструкцию и изменяющейся во времени нагрузке в виде усилий в удаленном стержне. Внешняя нагрузка — это расчетное сочетает-

ние нагрузок, определенное с учетом действующих норм. Нагрузка, моделирующая усилия в исключаемом стержне, уменьшалась до нуля за промежуток времени Δt : 0,01, 0,1 с. Первое время исключения позволяет рассмотреть ситуацию с мгновенным отказом стержня, что соответствует наиболее неблагоприятному варианту поведения конструкции при локальном повреждении. Второе значение времени исключения дает возможность учесть длительность экспериментально фиксируемых временных промежутков выхода элемента из строя при исчерпании прочности и устойчивости.

Для перечисленных вариантов проведены численные расчеты, определены коэффициенты динамичности для поврежденной фермы и соседних с ней

ферм. Выполнены оценка и сравнение работы каркаса для каждого из вариантов при локальном повреждении фермы в виде отказа одного стержня.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изменение величины коэффициента динамичности в зависимости от приведенной жесткости плоских ферм представлено в табл. 1. В столбце «Аналитический расчет» показаны значения коэффициента динамичности, вычисленного с использованием аналитической модели по формуле (1) после выключения из работы отдельных элементов фермы, в столбце «Динамический численный расчет» — результаты расчета в программном комплексе ЛИРА софт 10.8.

Табл. 1. Коэффициенты динамичности для ферм при повреждении нижнего или верхнего пояса

Table 1. Dynamic coefficients for trusses in case of damage to the lower or upper chord

Пролет, м Span, m	Приведенная жесткость I/I_p Reduced rigidity I/I_p	Аналитический расчет Analytic analysis		Динамический численный расчет Dynamic numerical analysis	
		Нижний пояс Lower chord	Верхний пояс Upper chord	Нижний пояс Lower chord	Верхний пояс Upper chord
24	0,1	1,981	1,986	1,909	1,910
	1	1,991	1,996	1,917	1,922
	10	1,979	1,991	1,897	1,903
	100	1,879	1,943	1,804	1,837
	1000	1,587	1,737	1,562	1,572
48	0,1	1,985	1,991	1,911	1,921
	1	1,985	1,992	1,907	1,923
	10	1,966	1,976	1,881	1,875
	100	1,879	1,887	1,754	1,767
	1000	1,651	1,645	1,389	1,389
72	0,1	1,969	1,980	1,879	1,899
	1	1,977	1,984	1,851	1,874
	10	1,959	1,964	1,817	1,798
	100	1,868	1,872	1,714	1,686
	1000	1,625	1,618	1,374	1,363
108	0,1	1,981	1,978	1,990	1,892
	1	1,988	1,987	1,870	1,873
	10	1,981	1,978	1,822	1,812
	100	1,931	1,925	1,757	1,733
	1000	1,761	1,744	1,551	1,528
144	0,1	1,933	1,939	1,769	1,788
	1	1,983	1,985	1,869	1,885
	10	1,987	1,988	1,838	1,866
	100	1,972	1,974	1,800	1,815
	1000	1,900	1,904	1,748	1,742

Согласно полученным данным для пролетов 24, 48, 72 и 108 м коэффициент динамичности при увеличении жесткости фермы от расчетного до максимального значения уменьшается на 15–16 % при аналитическом расчете и до 23 % при численном расчете. Для пролета 144 м при уменьшении жесткости фермы коэффициент динамичности уменьшается на 2,5–5 %, при увеличении жесткости уменьшается до 8 %.

Сравнение полученных значений коэффициентов динамичности при аналитическом и численном расчетах показало, что при максимальной жесткости разница между значениями составила 15 %, однако для всех остальных исследованных жесткостей значения отличаются не более чем на 10 %.

На рис. 10–14 приведены зависимости теоретических коэффициентов динамичности k_d (ось ординат) от приведенной жесткости фермы I/I_p (ось абсцисс). На графиках красным и синим цветом показаны зависимости для верхнего и нижнего поясов соответственно. Штриховой и сплошной линиями — графики изменения коэффициента динамич-

ности на основании аналитического и численного расчетов соответственно.

Для ферм пролетами 24, 48, 72 и 108 м аналитические и численные зависимости коэффициента динамичности имеют похожий характер. Максимальные значения коэффициента динамичности возникают при малых жесткостях, минимальные при больших. Для фермы пролетом 144 м максимальное значение коэффициента динамичности имеет в диапазоне относительных жесткостей от 1 до 10.

Для всех рассмотренных ферм с ростом жесткости по сравнению с расчетной фермой коэффициент динамичности уменьшается. При этом аналитические коэффициенты динамичности больше, чем численные. Для ферм с расчетной жесткостью аналитические коэффициенты динамичности больше численных на 4–8 %, максимальное отличие этих коэффициентов достигает 16 % для больших жесткостей. Хорошее соответствие результатов, полученных разными способами, позволяет применять оба способа при проведении практических расчетов.

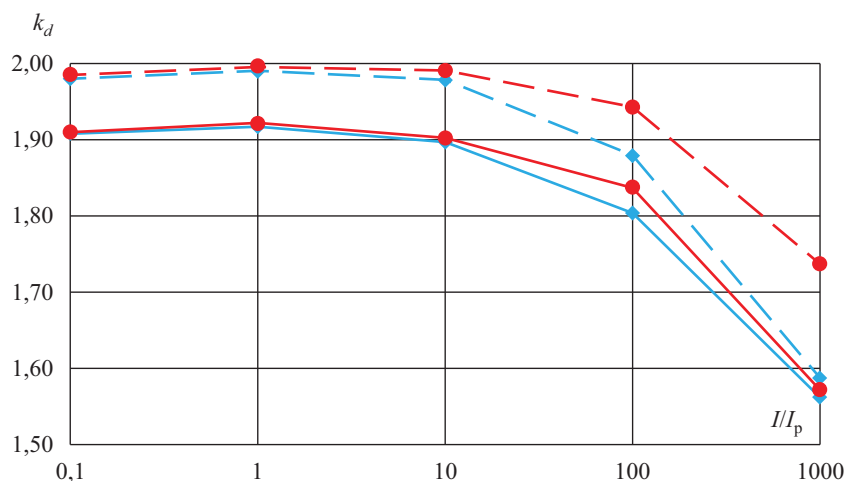


Рис. 10. График изменения коэффициента динамичности для фермы 24 м

Fig. 10. The dynamic coefficient for a 24-m truss

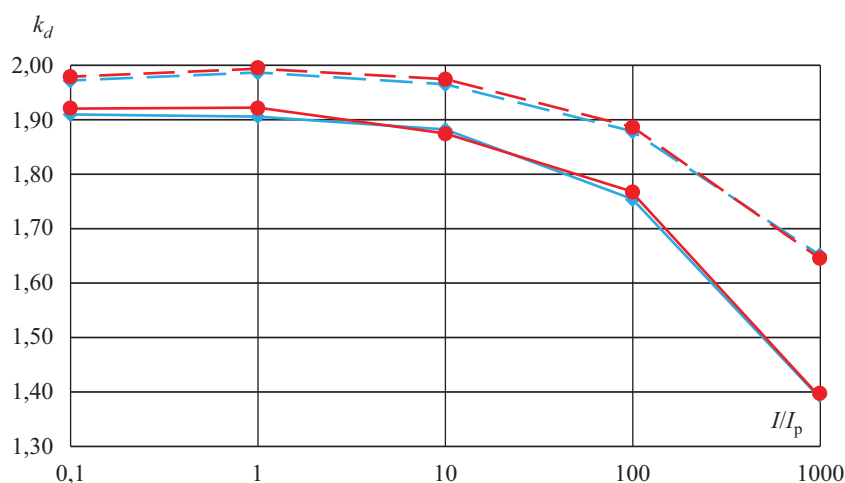


Рис. 11. График изменения коэффициента динамичности для фермы 48 м

Fig. 11. The dynamic coefficient for a 48-m truss

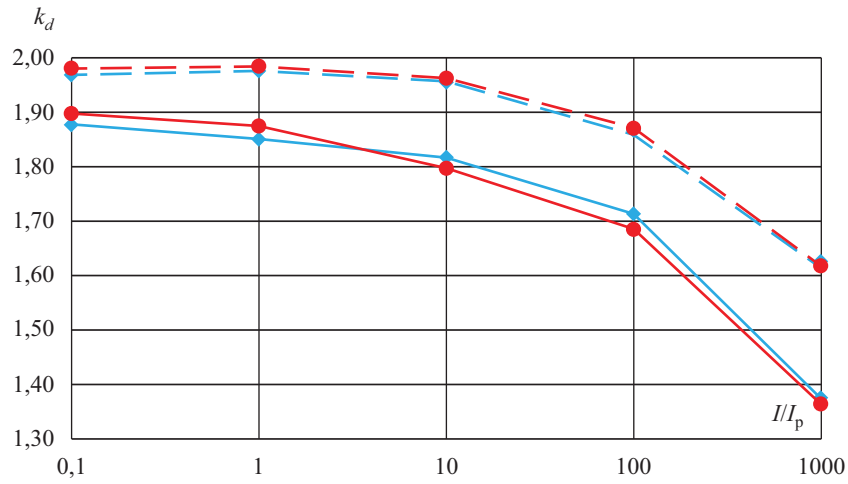


Рис. 12. График изменения коэффициента динамичности для фермы 72 м

Fig. 12. The dynamic coefficient for a 72-m truss

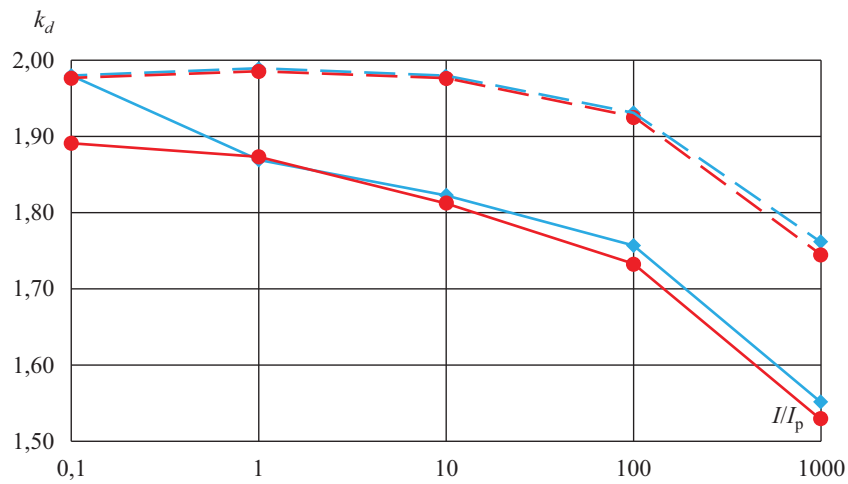


Рис. 13. График изменения коэффициента динамичности для фермы 108 м

Fig. 13. The dynamic coefficient for a 108-m truss

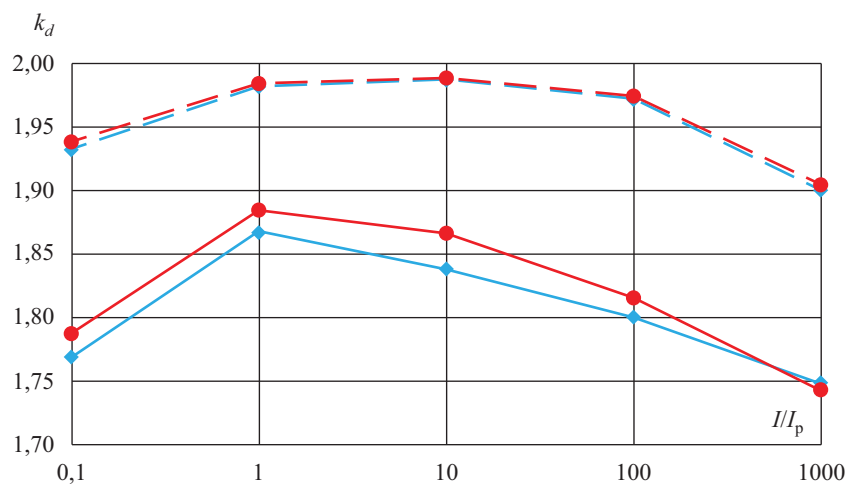


Рис. 14. График изменения коэффициента динамичности для фермы 144 м

Fig. 14. The dynamic coefficient for a 144-m truss

Анализ результатов показал, что для изученных плоских ферм без учета работы в составе пространственного каркаса для всех пролетов разница между повреждением нижнего и верхнего пояса для ферм с расчетной жесткостью составляет не более 1 %. Таким образом, для фермы с проектными сечениями, подобранными с учетом расчета на устойчивость от прогрессирующего обрушения, коэффициент динамичности для расчета фермы в запредельной стадии работы можно принимать несколько меньше 2.

При работе в составе пространственного каркаса промышленного здания нагрузка с поврежденной фермы перераспределяется на соседние фермы и динамические усилия в ней меньше, чем в отдельно работающей ферме. В табл. 2 приведены результаты расчетов ферм с локальными повреждениями, работающих в составе пространственного каркаса. Значения коэффициентов динамичности в столбце «Ана-

литический расчет» получены по формуле (1), в столбце «Динамический численный расчет» — на основании численного расчета при различном времени исключения.

При принятой компоновке покрытия локальное разрушение растянутого пояса существенно меньше влияет на работу фермы, чем при локальном разрушении верхнего пояса. Коэффициент динамичности при локальном разрушении нижнего пояса не превышает при динамическом расчете величины 1,4, при локальном разрушении верхнего пояса 1,9. При аналитическом расчете разрушение нижнего пояса ведет к коэффициенту динамичности 1,6, верхнего пояса до 1,98. Увеличение времени исключения до 0,1 с ведет к некоторому уменьшению коэффициента динамичности. Значения коэффициентов динамичности при расчете в статической и динамической постановках отличаются на 8–10 %.

Табл. 2. Значения коэффициента динамичности в поврежденной ферме при различном времени исключения

Table 2. Values of the dynamic coefficient in a damaged truss at different withdrawal times

Динамический численный расчет Dynamic numerical analysis				Аналитический расчет Analytic analysis
Пролет, м Span, m	Место разрушения Local destruction	Время исключения, с Time of withdrawal, s		
		0,01	0,1	
24	Нижний пояс / Lower chord	1,347	1,284	1,389
	Верхний пояс / Upper chord	1,857	1,853	1,980
48	Нижний пояс / Lower chord	1,386	1,360	1,475
	Верхний пояс / Upper chord	1,856	1,855	1,966
72	Нижний пояс / Lower chord	1,375	1,362	1,590
	Верхний пояс / Upper chord	1,869	1,864	1,948
108	Нижний пояс / Lower chord	1,392	1,385	1,542
	Верхний пояс / Upper chord	1,883	1,868	1,929
144	Нижний пояс / Lower chord	1,399	1,397	1,551
	Верхний пояс / Upper chord	1,859	1,856	1,927

Повреждение сжатого пояса является более неблагоприятным вариантом, значение коэффициентов динамичности превышает значения для растянутых поясов в среднем на 26 %. При повреждении верхнего пояса ферма работает практически независимо от соседних ферм, как плоская, рассмотренная выше. В этом случае распорки, вертикальные и горизонтальные связи плохо перераспределяют нагрузку с поврежденной фермы на соседние. Для обеспечения несущей способности поврежденной фермы следует увеличивать сечения стержней. Колебания поврежденной фермы практически не передаются на соседние, и коэффициент динамичности нагрузки

для соседних ферм существенно меньше, чем для поврежденной фермы. Разница между аналитическими и численными значениями для повреждения верхнего пояса составила 5–10 %. Полученные значения коэффициентов динамичности незначительно отличаются от коэффициентов динамичности для плоских ферм (до 5 %), что позволяет утверждать, что ферма при локальном повреждении стержня верхнего пояса работает как плоская и установленные горизонтальные связи в распределении нагрузки участвуют мало. Незначительное отличие результатов аналитического и численного расчета дает возможность использовать оба метода при расчетах данного варианта каркаса.

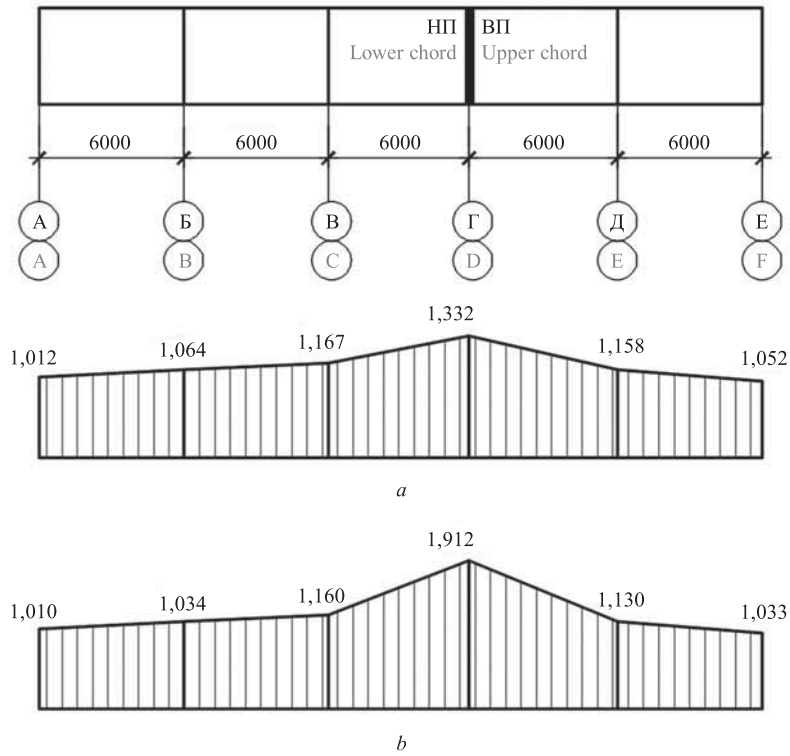


Рис. 15. Эпюра распределения коэффициента динамичности по покрытию при повреждении нижнего (а) и верхнего (b) поясов, пролет 24 м

Fig. 15. Distribution of the dynamic coefficient in the roofing skeleton in case of damaged lower (a) and upper (b) chords, 24-m span

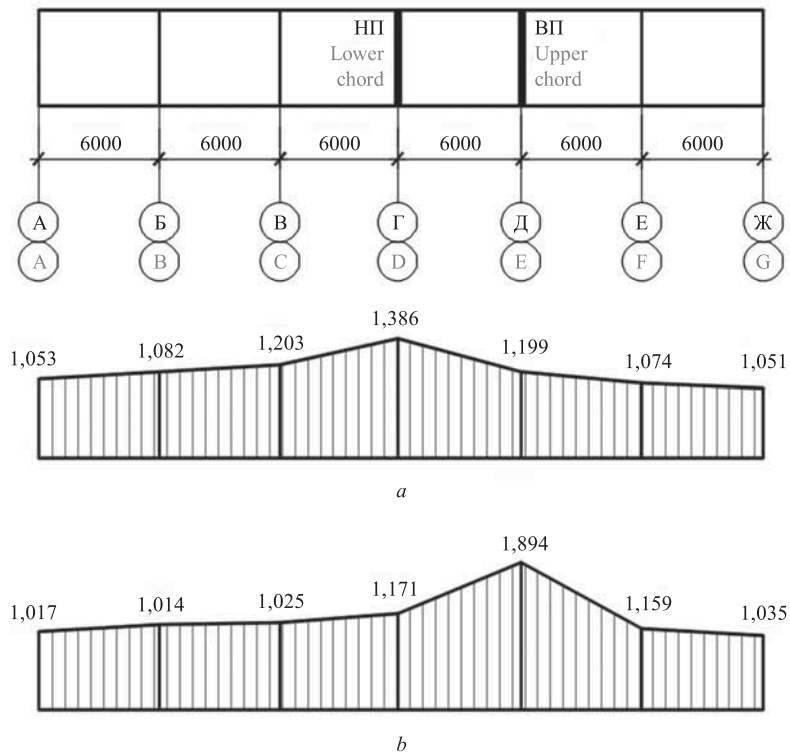


Рис. 16. Эпюра распределения коэффициента динамичности по покрытию при повреждении нижнего (а) и верхнего (b) поясов, пролет 48 м

Fig. 16. Distribution of the dynamic coefficient in the roofing skeleton in case of damaged lower (a) and upper (b) chords, 48-m span

Динамические усилия, меньшие по величине, чем в поврежденной ферме, развиваются и в соседних фермах. На рис. 15–19 представлены эпюры распределения коэффициента динамичности для всего покрытия здания. Эпюры построены для мгновенного выхода поврежденного стержня из строя, время исключения $\Delta t = 0,01$ с. В верхней части рисунка приводится продольный разрез здания вдоль цифровых осей. Несущие стропильные фермы покрытия расположены вдоль буквенных осей. Над каждой фермой дано значение коэффициента динамичности, который можно использовать при статическом расчете для задания нагрузки, приложенной к соответствующей ферме. Поврежденная ферма и вариант повреждения в ней выделены на схеме жирной линией. Выбор поврежденной фермы определен предварительным статическим расчетом, в результате которого выявлены фермы с наибольшими продольными усилиями. Для ферм пролетами 24 и 108 м наибольшие продольные усилия возникали в верхних и нижних поясах одной фермы. Для ферм пролетами 48, 72 и 144 м наибольшие продольные усилия в верхних и нижних поясах возникали в разных фермах.

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что в соседних фермах коэффици-

ент динамичности составляет от 1,1 до 1,2. При этом для более удаленных от поврежденной ферм коэффициенты динамичности находятся в пределах от 1,0 до 1,1.

В рассмотренной конструктивной схеме каркаса при локальном разрушении одного из стержней фермы перераспределение усилий происходит в основном в пределах поврежденной фермы на стержни, соседние с поврежденным. Этим объясняются максимальные значения коэффициентов динамичности для поврежденных ферм и существенно меньшие величины для соседних ферм. При данной конструктивной схеме повышение живучести каркаса возможно за счет увеличения сечения стержней стропильных ферм с учетом возможного локального разрушения стержней.

Необходимо отметить, что в связях и распорках, примыкающих к поврежденной ферме и непосредственно участвующих в перераспределении усилий, происходит увеличение продольной силы. Однако это перераспределение не ведет к чрезмерному росту усилий. Продольные усилия в этих элементах увеличиваются на 15–20 %, что позволяет исключить заметное усложнение конструкции узлов и рост общей металлоемкости каркаса.

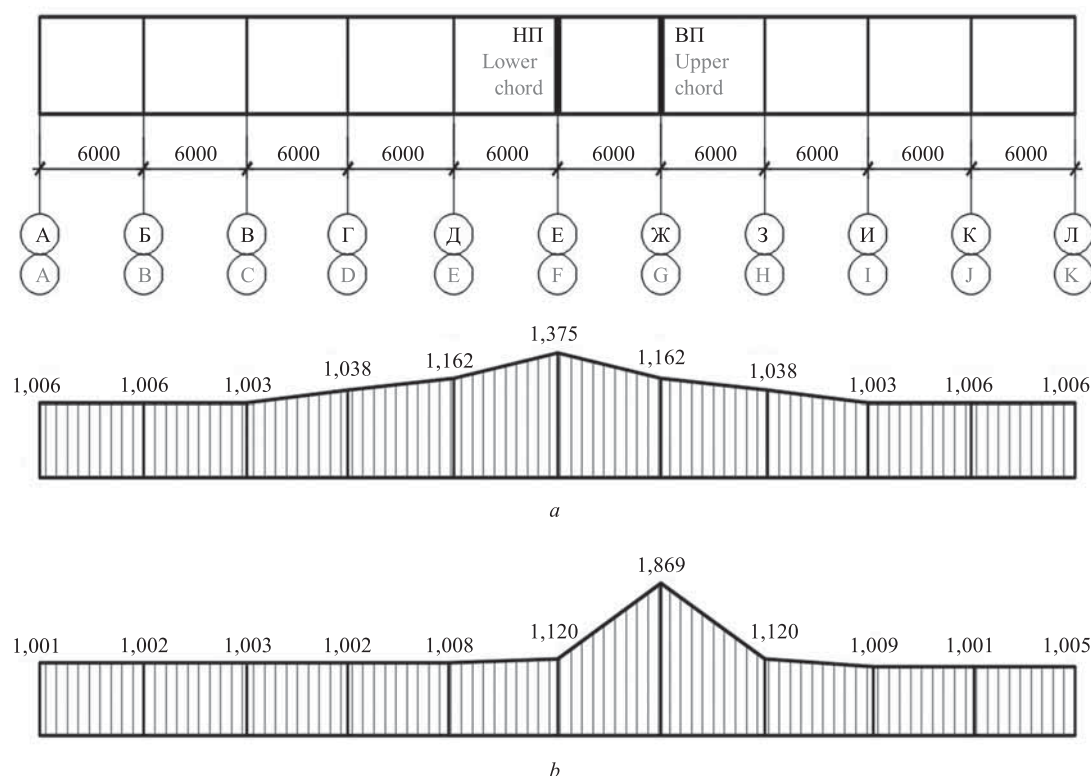


Рис. 17. Эпюра распределения коэффициента динамичности по покрытию при повреждении нижнего (а) и верхнего (б) поясов, пролет 72 м

Fig. 17. Distribution of the dynamic coefficient in the roofing skeleton in case of damaged lower (a) and upper (b) chords, 72-m span

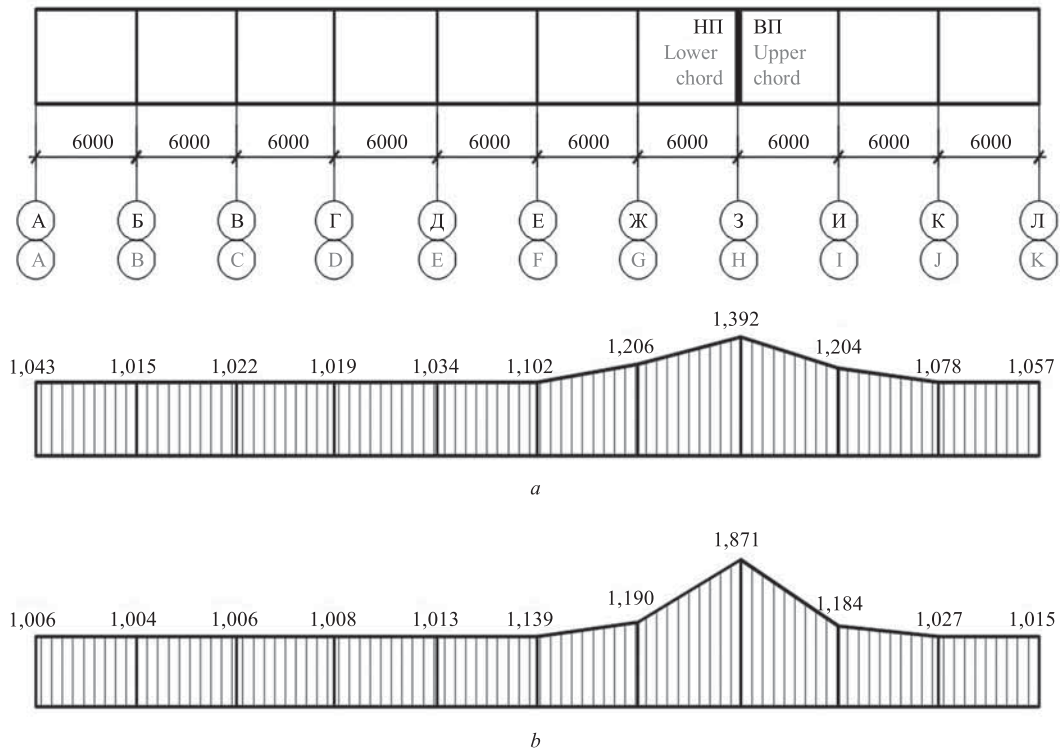


Рис. 18. Эпюра распределения коэффициента динамичности по покрытию при повреждении нижнего (а) и верхнего (б) поясов, пролет 108 м

Fig. 18. Distribution of the dynamic coefficient in the roofing skeleton in case of damaged lower (a) and upper (b) chords, 108-m span

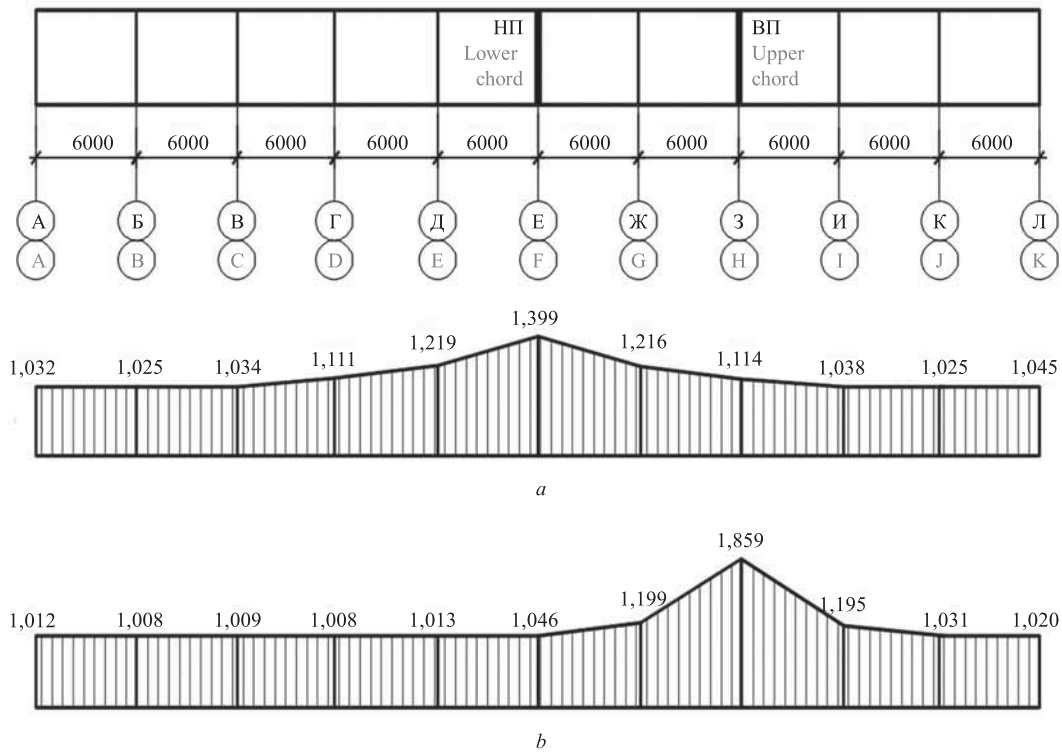


Рис. 19. Эпюра распределения коэффициента динамичности по покрытию при повреждении нижнего (а) и верхнего (б) поясов, пролет 144 м

Fig. 19. Distribution of the dynamic coefficient in the covering in case of damaged lower (a) and upper (b) chords, 144-m span

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных теоретических и численных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Изучено влияние жесткости ферм на коэффициент динамичности после исключения из расчетной схемы отдельных элементов при потере устойчивости и прочности.

2. Установлено, что для пролетов 24, 48, 72 и 108 м увеличение жесткости фермы в 1000 раз ведет к уменьшению коэффициента динамичности на 15–16 % при аналитическом расчете и на 23 % при численном расчете. Однако для пролета 144 м увеличение жесткости фермы незначительно влияет на значение коэффициента динамичности, который в рассматриваемом диапазоне жесткостей меняется всего на 1,7 % для аналитического расчета и 2 % для численного.

3. Выполненный численный анализ работы плоских ферм различной жесткости показал, что теоретические значения в среднем выше численных на 10–15 %.

4. При выполнении практических расчетов ферм на прогрессирующее обрушение рекомендуется ис-

пользование квазистатического (с коэффициентами динамичности, определенными по аналитической зависимости) или динамического методов.

5. Наиболее неблагоприятным вариантом повреждения в рассмотренных фермах является исключение из работы наиболее нагруженного стержня верхнего сжатого пояса.

6. В пространственном каркасе с горизонтальными связями по верхним и нижним поясам ферм значения коэффициента динамичности оказались близкими к коэффициентам динамичности для плоской фермы. Разница между значениями коэффициентов динамичности, полученными при аналитическом и динамическом численном расчетах, не превышает 10 %. Коэффициенты динамичности для поврежденной фермы в составе пространственного каркаса составляют:

- при локальном повреждении растянутого нижнего пояса $k_d = 1,4$;
- при локальном повреждении верхнего сжатого пояса $k_d = 1,9$.

Коэффициенты динамичности для нагрузки на фермы, соседние к поврежденной, составляют 1,2, для остальных ферм 1,12.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ведяков И.И., Еремеев П.Г., Одесский П.Д., Попов Н.А., Соловьев Д.В. Расчет строительных конструкций на прогрессирующее обрушение: нормативные требования // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 4. С. 16–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24

2. Еремеев П.Г., Ведяков И.И. Еще раз о проблеме защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 8. С. 4–10. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.08.04-10

3. Adam J.M., Buitrago M., Bertolesi E., Sagaseta J., Moragues J.J. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // Engineering Structures. 2020. Vol. 210. P. 110414. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110414

4. Buitrago M., Bertolesi E., Calderón P.A., Adam J.M. Robustness of steel truss bridges: Laboratory testing of a full-scale 21-metre bridge span // Structures. 2021. Vol. 29. Pp. 691–700. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.005

5. Колчунов В.И., Федорова Н.В. Некоторые проблемы живучести железобетонных конструктивных систем при аварийных воздействиях // Вестник НИЦ строительство. 2018. № 1 (16). С. 115–119.

6. Федорова Н.В., Кореньков П.А., Ву Н.Т. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зда-

ний при аварийных воздействиях // Строительство и реконструкция. 2018. № 4. С. 42–52.

7. Fedorova N.V., Vu N.T., Iliushchenko T.A. Dynamic additional loading of the frame of a multi-story building after the failure of one of the structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. Issue 1. P. 012040. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012040

8. Подшивалов И.И. Анализ результатов моделирования напряженного состояния колонн и связей экспериментального здания от прогрессирующего обрушения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 3. С. 180–190. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-180-190

9. Губанов В.В., Москаленко В.И. Опыт ликвидации последствий аварии промышленного здания // Металлические конструкции. 2008. Т. 14. № 3. С. 181–188.

10. Еремин К.И., Матвеевский С.А., Арутюнян Г.А. Методика экспериментальных исследований блоков покрытий промышленных зданий при аварийных воздействиях // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 34–46.

11. Еремин К.И., Матвеевский С.А. Электронная паспортизация зданий и сооружений // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. тр. 2008. № 8. С. 5–14.

12. Нежданов К.К., Жуков А.Н. Анализ состояния и причин обрушений строительных конструкций в промышленных зданиях // Региональная архитектура и строительство. 2011. № 1. С. 80–84.

13. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 1. С. 12–30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30

14. Fialko S., Kabantsev O., Perelmuter A. Elastoplastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 2 (102). P. 10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14

15. Ведяков И.И., Райзер В.Д. Надежность строительных конструкций. Теория и расчет : монография. М. : Издательство АСВ, 2018. 414 с.

16. Тамразян А.Г., Степанов А.Ю. Количественная оценка риска прогрессирующего обрушения конструкций большепролетных сооружений //

Сб. науч. тр. УНИИСК им. В.М. Шимановского. Киев, 2008. № 1. С. 90–97.

17. Ведяков И.И., Соловьев Д.В., Коваленко А.И. Вероятностный подход к оценке риска прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 10. С. 36–43. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.36-43

18. Чернов Ю.Т. К расчету систем с выходящими связями // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 4 (231). С. 53–57.

19. Бондарев Ю.В., Нгуен Т.С. Расчет стержневых систем при внезапном удалении отдельных элементов // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 4 (231). С. 43–48.

20. Бергер М.П., Туснин А.Р. Расчет фермы с поврежденными элементами // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 11. С. 35–41.

21. Бергер М.П. Несущая способность стальных ферм с учетом времени локального разрушения : дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 186 с.

Поступила в редакцию 9 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 5 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2023 г.

О Б АВТОРАХ : Александр Романович Туснин — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических и деревянных конструкций, директор Института промышленного и гражданского строительства (ИПГС); Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 455914, Scopus: 6507367654, ORCID: 0000-0002-9997-9436; TushinAR@mgsu.ru;

Мария Петровна Бергер — кандидат технических наук, преподаватель; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 927136, Scopus: 57192100982, ResearcherID: AAG-2520-2022, ORCID: 0000-0001-8906-9298; bergerm@mgus.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vedyakov I.I., Yefremov P.G., Odesskiy P.D., Popov N.A., Solov'yev D.V. Regulatory requirements for the design of building structures for progressive collapse. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 4:16-24. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24 (rus.).

2. Yeremeyev P.G., Vedyakov I.I. Once again about the problem of protecting buildings and structures from progressive collapse. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 8:4-10. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.08.04-10 (rus.).

3. Adam J.M., Buitrago M., Bertolesi E., Sagasetta J., Moragues J.J. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario. *Engineering Structures*. 2020; 210:110414. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110414

4. Buitrago M., Bertolesi E., Calderón P.A., Adam J.M. Robustness of steel truss bridges: Laboratory

testing of a full-scale 21-metre bridge span. *Structures*. 2021; 29:691-700. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.005

5. Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Current problems of reinforced concrete structural systems survivability at emergency impacts. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2018; 1(16): 115-119. (rus.).

6. Fedorova N.V., Korenkov P.A., Vu N.T. Experimental method of research of deformation of monolithic reinforced concrete building under accidental actions. *Building and Reconstruction*. 2018; (4):42-52. (rus.).

7. Fedorova N.V., Vu N.T., Iliushchenko T.A. Dynamic additional loading of the frame of a multi-story building after the failure of one of the structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 896(1):012040. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012040

8. Podshivalov I.I. Progressive collapse analysis of experimental building skeleton based on stress-strain state of columns and joints. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24(3):180-190. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-180-190 (rus.).
9. Gubanov V.V., Moskalenko V.I. Elimination of consequences of an industrial building failure. *Metal Constructions*. 2008; 14(3):181-188. (rus.).
10. Eremin K.I., Matveyushkin S.A., Harutyunyan G.H. Methodology of Experimental Investigations of Block Coverings of Industrial Buildings under Emergency Influences. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 12:34-46. (rus.).
11. Yeremin K.I., Matveyushkin S.A. Electronic certification of buildings and structures. *Prevention of Accidents of Buildings and Structures: collection of scientific papers*. 2008; 8:5-14. (rus.).
12. Nezhdanov K.K., Zhukov A.N. Analysis of the state and causes of collapse of building structures in industrial buildings. *Regional Architecture and Engineering*. 2011; 1:80-84. (rus.).
13. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Review of modern optimization methods for bearing systems of buildings and structures. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(1): 12-30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30 (rus.).
14. Fialko S., Kabantsev O., Perelmuter A. Elastoplastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 2(102):10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14
15. Vedyakov I.I., Rayzer V.D. *Reliability of building structures. Theory and calculation*. Moscow, ASV Publishing House, 2018; 412. (rus.).
16. Tamrazyan A.G., Stepanov A.Yu. Quantitative assessment of the risk of progressive collapse of structures of large-span structures. *Collection of scientific papers of UNIISK named after V.M. Shimanovskogo*. Kiyev, 2008; 1:90-97. (rus.).
17. Vedyakov I.I., Solov'yev D.V., Kovalenko A.I. A probabilistic approach to evaluating the risk of progressive collapse. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 10:36-43. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.36-43 (rus.).
18. Chernov Yu.T. To the calculation of systems with switched connections. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2010; 4(231):53-57. (rus.).
19. Bondarev Yu.V., Nguyen T.S. Calculation of rod systems in the sudden removal of individual elements. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2010; 4(231):43-48. (rus.).
20. Berger M.P., Tusnin A.R. Calculation of a farm with damaged elements. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 11:35-41. (rus.).
21. Berger M.P. *Bearing capacity of steel trusses, taking into account the time of local destruction : PhD thesis*. Moscow, 2020; 186. (rus.).

Received November 9, 2022.

Adopted in revised form on February 5, 2023.

Approved for publication on February 6, 2023.

B I O N O T E S : **Alexander R. Tusnin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal and Timber Structures, Director of the Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 455914, Scopus: 6507367654, ORCID: 0000-0002-9997-9436; TusninAR@mgsu.ru;

Maria P. Berger — Candidate of Technical Sciences, lecturer; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 927136, Scopus: 57192100982, ResearcherID: AAG-2520-2022, ORCID: 0000-0001-8906-9298; bergemp@mgsu.ru.

Contribution of the authors: all the authors contributed to this article equivalently.

The authors declare no conflict of interest.

Воздействие на ход вторичной консолидации торфа путем его дегидратации с помощью высокодисперсной глины

Александр Леонидович Невзоров, Галина Юрьевна Ивахнова

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ);

г. Архангельск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Первичная или фильтрационная консолидация торфа в основании насыпи завершается через 3–5 лет после ее устройства, после чего в течение десятилетий имеет место вторичная консолидация, обусловленная удалением заполняющей микропоры связанной влаги. Темп развития осадки на этой стадии зависит от степени разложения торфа, температуры, присутствия в поровой воде тех или иных химических веществ, вибрационных воздействий и других факторов. Для снижения деформации оснований, обусловленных вторичной консолидацией торфа, выполняют модификацию торфа с использованием смесей вяжущих с наполнителями или осуществляют мероприятия, направленные на кратковременное ускорение осадки и последующее замедление этого процесса, например временную пригрузку, электроосмос и др.

Материалы и методы. Исследовался эффект дегидратации торфа с помощью высокодисперсных материалов, в качестве которых использовали бентонит и сапонитсодержащие отходы алмазодобывающей промышленности. Проводились одометрические испытания продолжительностью до 100 сут, в ходе которых в образцах устраивали вертикальные цилиндрические элементы из указанных материалов, занимавшие около 10 % объема образцов.

Результаты. Включения бентонита, формирование которых выполнялось без извлечения торфа, оказали существенное влияние на развитие деформаций, интенсивная дегидратация торфа привела к увеличению коэффициента вторичной консолидации $c_{\alpha\epsilon}$ в 3–4 раза. После 25–30 сут интенсивной осадки $c_{\alpha\epsilon}$ снизился в среднем в 1,5 раза относительно исходного значения. Под влиянием элементов из сапонитсодержащих отходов коэффициент $c_{\alpha\epsilon}$ увеличился на 11–15 %, но через 20–30 сут он снизился в среднем в 2 раза относительно исходного значения. Фактором, препятствующим развитию осадки, послужило большее сопротивление элементов вертикальной нагрузке.

Выводы. В результате внедрения в торф высокодисперсной глины происходит ускорение миграции связанной влаги из микропор и увеличение темпа вторичной консолидации. Кроме дегидратации, ускорению вторичной консолидации способствовали механическое уплотнение торфа при внедрении в образцы глины и набухание глины.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: торф, вторичная консолидация, бентонит, сапонитсодержащие отходы, осадка, деформация, дегидратация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Невзоров А.Л., Ивахнова Г.Ю. Воздействие на ход вторичной консолидации торфа путем его дегидратации с помощью высокодисперсной глины // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 218–229. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.218-229

Автор, ответственный за переписку: Галина Юрьевна Ивахнова, g.ivakhnova@gmail.com.

Effect of clay with high water adsorption capacity on process of secondary consolidation of peat

Alexander L. Nevzorov, Galina Yu. Ivakhnova

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU); Arkhangelsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Primary consolidation of peat, underlying an embankment, is completed 3 to 5 years after its filling. It is followed by secondary consolidation, caused by removal of bound moisture from micropores. At this stage, the settlement rate depends on the degree of peat decomposition, temperature, content of various chemicals in the pore water, vibration effects, and other factors. To reduce the embankment deformation, caused by the secondary consolidation, peat is either modified by binding compounds, having filling agents, or other actions are taken to accelerate the settlement process for a short term and to decelerate it thereafter using temporary surcharge, electroosmosis and other actions.

Materials and methods. The authors studied the effect of peat dehydration using clayey materials with high water adsorption capacity, such as bentonite and saponite waste generated by the diamond mining industry. 100 days oedometer tests were carried out. In the course of testing, vertical cylindrical elements, made of the above materials, were installed in the specimens. These cylindrical elements occupied about 10 % of the specimen volume.

Results. Bentonite inclusions, formed without any peat extraction, had a powerful effect on development of deformations. Intensive dehydration of peat led to a 2–4 times increase in the coefficient of secondary consolidation $c_{\alpha\epsilon}$. Following 25 to 30 days of intensive settlement, the value of the $c_{\alpha\epsilon}$ coefficient went down by an average of 1.5 times relative to its initial value.

The effect of elements, made of saponite-containing waste, turned out to be different. The value of the $c_{\alpha\epsilon}$ coefficient increased by 11 to 15 %, but 20 to 30 days later it went down by an average of 2 times relative to the initial value. Higher resistance of elements to vertical loading served as the factor preventing the development of settlement.

Conclusions. Clay has a high water adsorption capacity, and its intrusion into peat results in accelerated water migration from micropores and boosts the rate of secondary consolidation. In addition to peat dehydration, secondary consolidation was accelerated by mechanical compaction in the process of adding clay into specimens followed by clay swelling.

KEYWORDS: peat, secondary consolidation, bentonite, saponite-containing waste, settlement, deformation, dehydration

FOR CITATION: Nevzorov A.L., Ivakhnova G.Yu. Effect of clay with high water adsorption capacity on process of secondary consolidation of peat. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):218-229. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.218-229 (rus.).

Corresponding author: Galina Yu. Ivakhnova, g.ivakhnova@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Торф — один из видов сильнодеформируемых грунтов, отложения которого занимают около 5–8 % поверхности суши в мире и до 10 % в России [1]. При освоении обширных заболоченных территорий, например на северо-западе нашей страны или в Западной Сибири, где выполнить полную замену многометровых толщ торфа минеральными грунтами не представляется возможным, насыпи устраивают по их поверхности, применяя так называемый метод пригрузки. Торф, объем пор в котором может превышать объем твердой фазы в 15–20 раз, а слагающие

его растительные остатки лишь по традиции можно именовать твердой фазой, под действием веса насыпи получает осадку до 50–60 % от исходной толщины слоя. Причем проблему представляет не столько величина осадки, сколько длительное отсутствие ее стабилизации. Результатом постстроительных деформаций является разрушение покрытия дорог и тротуаров, элементов благоустройства, отмосток зданий, на периодическое восстановление которых расходуются значительные средства (рис. 1). Свайные фундаменты зданий и инженерных коммуникаций подвергаются воздействию сил негативного трения.



a



b

Рис. 1. Последствия длительной осадки торфа в основании насыпи: *a* — деформации тротуара; *b* — срезка стенок колодца и перекладка тротуарной плитки для выравнивания поверхности

Fig. 1. Consequences of long-term peat settlement at the base of the embankment: *a* — sidewalk deformation; *b* — cutting the well wall and re-laying paving bricks to level the surface

Как показывают длительные наблюдения на опытном полигоне и на территории г. Архангельска, первичная консолидация торфа, обусловленная удалением свободной воды из макропор и рассеиванием порового давления, завершается через 3–5 лет после отсыпки [2, 3]. Похожее значения продолжительности этого периода t_p (в годах) дает эмпирическая формула S. Noto: $t_p = 0,15H^2$, где H — толщина слоя торфа, м [4]. Следует заметить, что данные наблюдений за развитием осадки не согласуются с результатами измерений порового давления. В полевых

экспериментах G. Mesri поровое давление в торфяной залежи становилось практически равным нулю всего лишь за несколько недель или месяцев [5]. По данным П.А. Коновалова и других исследователей, в слоях торфа под насыпью измеренные значения порового давления были пренебрежимо малы и только в торфе, расположенном между двумя слоями суглинка, в течение года поровое давление оставалось равным 19 кПа, что составляло 35 % от приложенной нагрузки [6–8].

Переход от первичной ко вторичной консолидации происходит при весьма высоких значениях коэффициента пористости, например при $e = 8,3-9,2$ под нагрузкой 50 кПа и $e = 5,7-7,9$ под нагрузкой 100 кПа [9]. Очевидно, что при таком объеме пор нагрузку воспринимает не рыхлый растительный каркас, а заполняющая микропоры связанная влага, и деформации вторичной консолидации торфа обусловлены ее удалением при постоянном значении эффективных напряжений. Об этом говорит и наличие усадки у образцов торфа после завершения длительных компрессионных испытаний. По мнению R.E. Olson, вклад вторичной консолидации в общую осадку торфа обычно составляет около 10 %, хотя может достигать и больших значений [10]. По нашим данным, эта доля составляет в среднем 23 % при нагрузке 50 кПа и 15 % при 100 кПа [9].

Темп развития осадки на стадии вторичной консолидации зависит от степени гумификации растительных остатков, нагрузки, температуры, присутствия в поровой воде тех или иных химических веществ, вибрационных воздействий и других факторов. Он характеризуется коэффициентом вторичной консолидации. В настоящей статье будем использовать коэффициент c_{ae} , равный тангенсу угла наклона к оси абсцисс графика зависимости относительных деформаций ε от логарифма времени t или $c_a = \partial\varepsilon/\partial(\lg t)$, а относительные деформации вычислять как $\varepsilon = s/h_0$, где h_0 — начальная высота образца.

Согласно ранее проведенным авторами одометрическим испытаниям c_{ae} обычно находится в интервале от 0,02 до 0,04. Многолетние наблюдения на опытном полигоне дают существенно большие по сравнению с испытаниями в одометрах значения c_{ae} [2]. Японские ученые предложили эмпирическую формулу для расчета этого коэффициента: $c_{ae} = 0,033 + 0,0043W$, где W — исходная влажность торфа в долях единицы [11].

Деформации торфа не стабилизируются в течение десятилетий и, по-видимому, принимая во внимание природу этого грунта, его структуру и состав, следует признать, что полностью остановить осадку торфа в основании насыпей не представляется возможным. Те или иные воздействия на этот органический материал могут привести лишь к временной стабилизации или снижению скорости развития деформаций, т.е. к увеличению сроков межремонтных периодов покрытия дорог, тротуаров, элементов благоустройства и проч. Известные способы воздействия на торф можно разделить на две группы. К первой относятся мероприятия по модификации торфа смесями вяжущих с инертными материалами, в частности цемента, извести и даже гипса с песком [12–14], глинистым диатомитом [15], глиной [1, 13, 16], известняком [15], отсевом, образующимся при производстве щебня [17], золой ТЭЦ [16, 18] и иными промышленными отходами, включая пластмассы [17], позволяющими создать в рыхлом скелете этого органического грунта каркас и сформировать структур-

ные связи. Причем применяется перемешивание торфа как с сухими смесями, так и с растворами [19]. Из-за высоких затрат, конечно, невозможно сформировать сплошной массив закрепленного торфа, поэтому обычно устраивают отдельно стоящие столбы или колонны, частично воспринимающие нагрузку от насыпи.

Во вторую группу входят способы, направленные на кратковременное (скачкообразное) ускорение осадки и последующее снижение интенсивности развития деформаций, например временная дополнительная пригрузка [20–22], воздействие электрическим током (электроосмос) [23–25], вибрационные воздействия [21, 26]. Вакуумирование эффективно только при первичной консолидации торфа. Перечисленные способы, как правило, трудно реализовать в сложившейся городской застройке.

Ранее авторами были проведены эксперименты, в которых в полости специально изготовленного поршня одометра засыпался воздушно сухой порошок бентонита. Контакт торфа с бентонитом приводил к приросту относительных деформаций на стадии вторичной консолидации на 0,09–0,11 от начальной высоты образцов или 0,12–0,16 от высоты образцов после завершения компрессионного сжатия [3].

В настоящей статье представлены результаты лабораторных экспериментов, целью которых было воздействие на ход вторичной консолидации путем формирования в торфе элементов из высокодисперсной глины. Результатом такого воздействия могут стать: ускорение миграции связанной влаги из микропор; сжатие торфа под действием давления набухания глины. Кроме того, опыты позволяют глубже понять феномен вторичной консолидации этого органического материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты проводили в компрессионно-фильтрационных приборах на образцах ненарушенной структуры диаметром 60 см², высотой 7 см, отобранных в окрестностях г. Архангельска на неосвоенном, неосушенном низинном болоте из шурфов с глубины 0,5–0,8 м. Торф имел следующие исходные свойства: степень разложения 40–45 %, плотность 0,97–1,02 г/см³, плотность частиц 1,44–1,45 г/см³, влажность 8,33–9,91, коэффициент пористости 12,6–15,3, коэффициент фильтрации 0,043–0,364 м/сут при среднем значении 0,21 м/сут.

Фотографии структуры торфа, выполненные на сканирующем электронном микроскопе *Vegan-Tescan 3* с различным увеличением, представлены на рис. 2.

Известно, что процесс декомпозиции растительных остатков активно развивается при температуре 15–45 °С [27], а ее повышение даже на несколько градусов ведет к росту c_{ae} [22, 28, 29], поэтому приборы устанавливались в помещении, где температура не превышала 12 °С.

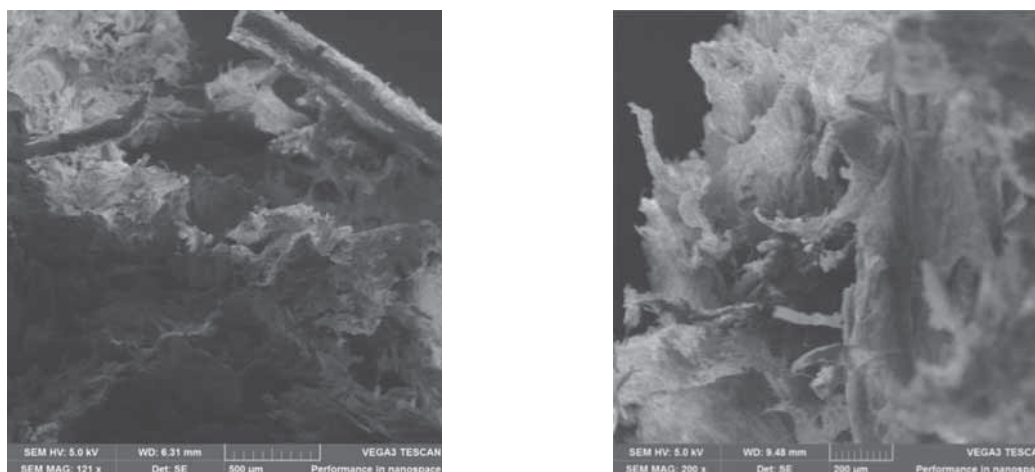


Рис. 2. Фотографии торфа, выполненные на сканирующем электронном микроскопе

Fig. 2. Scanning electron micrographs of peat

Образцы испытывались при характерной для основания насыпей нагрузке 50 кПа, которая прикладывалась сразу в одну ступень, как это и требуется при определении коэффициентов консолидации.

Проводившиеся рядом авторов одометрические испытания показали, что величина $c_{\text{ог}}$ у торфа не всегда отличается постоянством во времени, как это следует из классических представлений о процессе, и наклон графика $\varepsilon = f(\lg t)$ может возрастать в ходе испытаний [3, 22]. Выполненный нами ранее анализ данных длительных компрессионных испытаний продемонстрировал, что наличие указанного участка обусловлено не увеличением скорости деформирования, а неполным соответствием применяемой эмпирической зависимости к данным длительных компрессионных испытаний [9]. В представленных в настоящей статье опытах по истечении 34–44 сут, когда еще не наблюдалось наступление так называемой третичной консолидации, нагрузку снимали и 3 суток выжидали разуплотнения образцов. После чего, подняв на непродолжительное время поршень прибора, на всю высоту образцов устраивали вертикальные цилиндрические включения из высокодисперсной глины диаметром 8 мм, суммарно занимающие около 10 % их объема. Затем повторно прикладывали прежнюю нагрузку 50 кПа. Эксперименты прекращали, когда деформации торфа не превышали 0,01 мм в течение нескольких суток. Образцы извлекали и определяли влажность торфа и высокодисперсной глины.

В контрольных опытах с торфом без включений также выполняли временную разгрузку на указанное время.

В качестве высокодисперсных глинистых материалов использовали бентонит и сапонитсодержащие отходы алмазодобывающей промышленности. Последние отбирали в прудковой зоне хвостохранилища. Сапонит является минералом группы монтмориллонита, его содержание в осадке может достигать 87 % [30]. Свойства указанных материалов, включая

деформации свободного набухания ε_{SW} предварительно высушенных образцов и влажность набухания W_{SW} , приведены в табл. 1, графики гранулометрического состава — на рис. 3, а, изотермы сорбции паров воды — на рис. 3, б. Судя по изотермам сорбции, удельная поверхность сапонитсодержащих отходов в 1,7–2 раза меньше, чем у бентонита, и может оцениваться примерно в 200–240 м²/г. Чуть меньшее соотношение показывают значения влажности набухания.

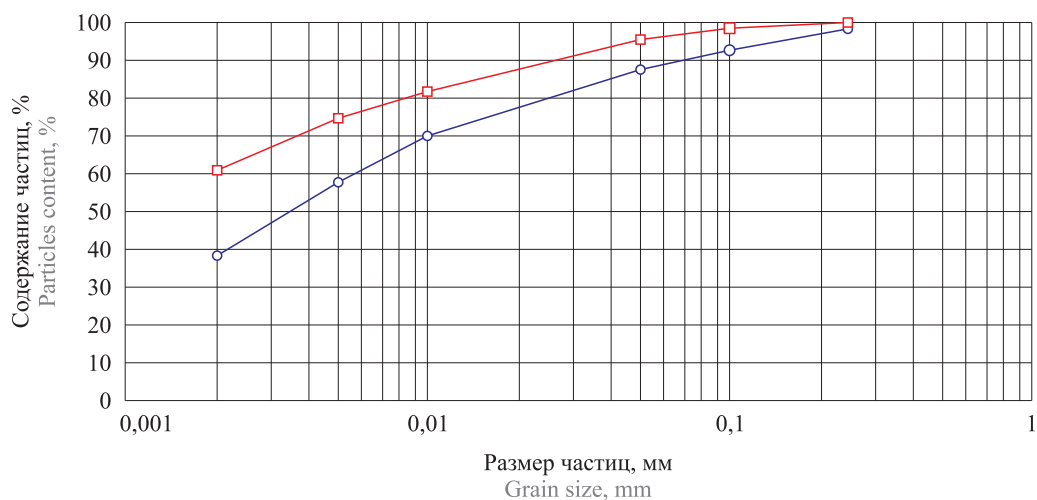
Табл. 1. Свойства высокодисперсных материалов

Table 1. Properties of highly dispersive materials

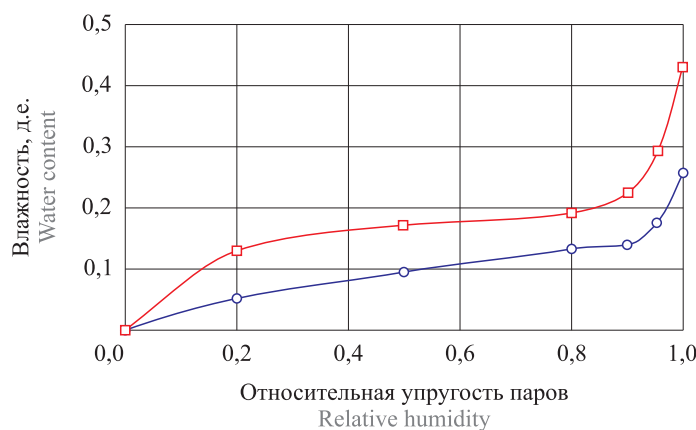
Материал Material	ρ_s	W_L	W_P	I_P	ε_{SW}	W_{SW}
Бентонит Bentonite	2,80	1,47	0,65	0,82	0,95	1,38
Отходы сапонитсодержащие Saponite- containing waste	2,79	0,79	0,31	0,48	0,30	0,89

Глинистые материалы вносились в образцы торфа двумя способами. Первый заключался в извлечении с помощью пробоотборника цилиндрических ядер торфа диаметром 8 мм, засыпке в полости и уплотнении воздушно сухого порошка (способ I). Во втором случае торф не извлекался, а раздвигался стержнем того же диаметра (способ II). Первый способ соответствовал технологии устройства буровых, второй — набивных свай.

По результатам испытаний строились графики зависимости относительных деформаций от логарифма времени $\varepsilon = f(\lg t)$ — график А на рис. 4. На этом графике обозначено пять участков: 1 — первичная консолидация, 2 — вторичная консолидация, 3 — временная разгрузка образца, 4 — повторное приложение нагрузки, 5 — продолжение вторичной консолидации.



a



b

—□— бентонит / bentonite —○— сапонитсодержащие отходы / saponite-containing waste

Рис. 3. Графики, характеризующие дисперсность глинистых материалов: a — графики гранулометрического состава; b — изотермы сорбции паров воды

Fig. 3. Figures describing the specific surface of clayey materials: a — grain size distribution curves; b — soil water sorption isotherm curves

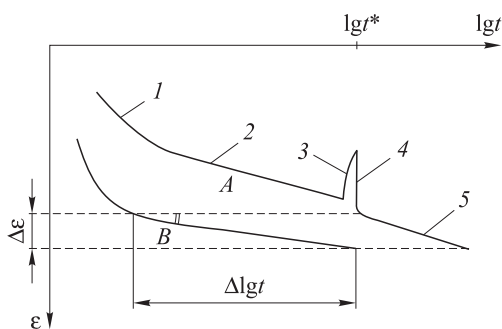


Рис. 4. Графики $\varepsilon = f(lgt)$

Fig. 4. $\varepsilon = f(lgt)$ curves

Из-за небольшой протяженности в логарифмическом масштабе участка 5 отдельно строился график B, где за начальный отсчет времени принимался момент повторного приложения нагрузки. Иными

словами, участки 4 и 5 графика A и график B построены по одним и тем же данным, но в разных координатах времени.

График B аппроксимировали прямой линией и при вычислении коэффициента вторичной консолидации переходили к исходной шкале времени:

$$c_{\alpha\varepsilon} = \Delta\varepsilon / [\lg(t_2 + t^*) - \lg(t_1 + t^*)],$$

где t^* — интервал времени между началом первичного и повторного нагружений.

Все испытания проводились с двух-трехкратной повторяемостью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 5 представлены характерные графики развития деформаций во времени, полученные при испытании одного из контрольных образцов. Как

видно, этап первичной консолидации был непродолжительным — всего несколько часов. Коэффициент вторичной консолидации c_{ae} оказался равным 0,037. Близкие значения этого коэффициента получены авторами ранее [9].

Разгрузка через 35 сут привела к разуплотнению образца на 14 % от достигнутой осадки. В остальных опытах разуплотнение образцов изменялось от 12 до 23 % и в среднем составило 18 %.

При повторном нагружении для возврата на прежнюю траекторию осадки потребовалось времени значительно больше, чем на первичную консоли-

дацию — 1,5 сут, после чего все точки зависимости $\varepsilon = f(\lg t)$ до снятия нагрузки и после ее повторного приложения расположились практически на одной прямой, т.е. снятие нагрузки на трое суток не привело к изменению темпа вторичной консолидации. Коэффициент c_{ae} остался практически без изменений и составил 0,040. Среднее значение коэффициента по данным испытаний четырех образцов приведено в табл. 2.

С целью увеличения масштаба графиков на следующих рисунках их начальные участки первых суток испытаний не показаны.

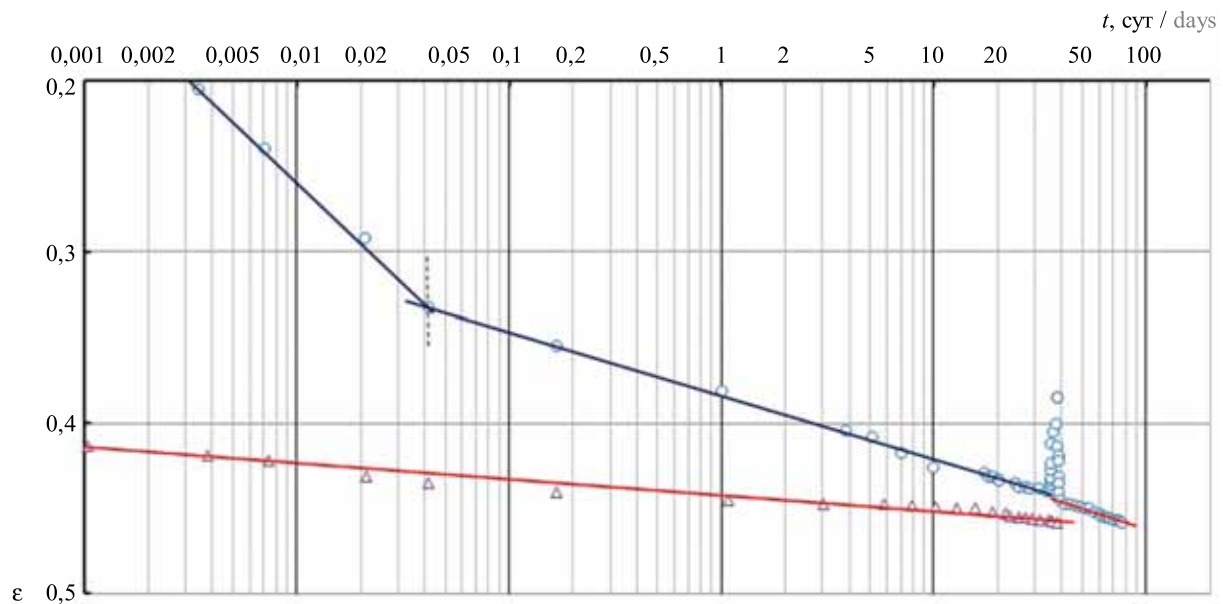


Рис. 5. График $\varepsilon = f(\lg t)$ для образца торфа без включений

Fig. 5. $\varepsilon = f(\lg t)$ curve for a peat specimen without inclusions

Табл. 2. Результаты экспериментов

Table 2. Results of the experiments

Материал и способ изготовления включений Material of inclusions	ρ_0	W_0	e_0	c_{ae1}	c_{ae2}	c_{aeK}	W_T	W_B
Нет No inclusions	1,01	9,22	13,70	0,039	0,039	—	5,70	—
Бентонит, способ I Bentonite, method I	1,00	8,55	12,83	0,032	0,055	—	4,56/4,82	1,07
Бентонит, способ II Bentonite, method II	0,98	8,81	13,48	0,034	0,138	0,023	4,52/4,71	0,99
СО, способ I SW, method I	0,99	9,36	14,28	0,031	0,047	—	4,55/5,04	0,63
СО, способ II SW, method II	0,99	8,33	12,63	0,035	0,039	0,017	4,05/4,55	0,59

Примечание: c_{ae1} — исходное значение коэффициента вторичной консолидации; c_{ae2} — коэффициент вторичной консолидации после формирования в образцах включений из высокодисперсных материалов (второй этап испытаний); c_{aeK} — то же перед завершением испытаний; W_T — влажность торфа после завершения опытов; W_B — влажность включений из глины; СО — сапонитсодержащие отходы.

Note: c_{ae1} is the initial value of the secondary consolidation coefficient; c_{ae2} is the secondary consolidation coefficient following the formation in specimens of highly dispersive inclusions (second stage of testing); c_{aeK} is the same value before the end of experiments; W_T is the peat water content after the experiments; W_B is the water content in clayey inclusions; SW is saponite-containing waste.

На рис. 6 представлен характерный график $\varepsilon = f(lgt)$ для образца торфа с включениями бентонита, устроенными первым способом (как буронабивных свай), на рис. 7 — результаты аналогичного ис-

пытания с включениями из сапонитсодержащих отходов. Как видно, включения высокодисперсных материалов способствовали увеличению наклона графиков к оси абсцисс.

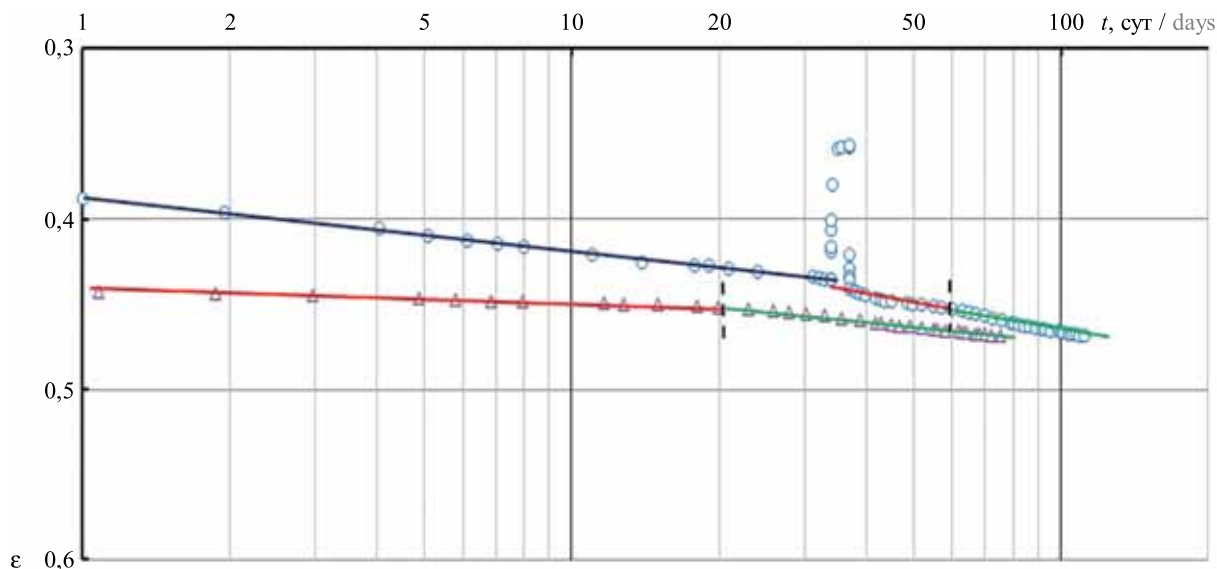


Рис. 6. График $\varepsilon = f(lgt)$ для образца торфа с включениями бентонита, изготовленными первым способом

Fig. 6. $\varepsilon = f(lgt)$ curve for a peat specimen with bentonite inclusions. The specimen is made using the first method

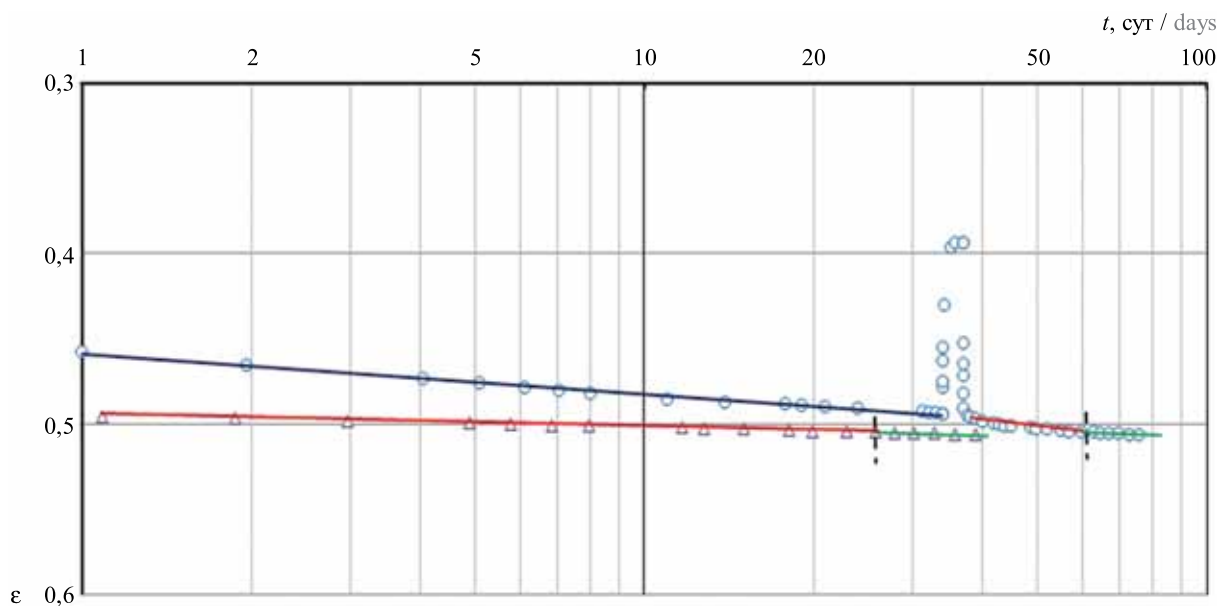


Рис. 7. График $\varepsilon = f(lgt)$ для образца торфа с включениями сапонитсодержащих отходов, изготовленными первым способом

Fig. 7. $\varepsilon = f(lgt)$ curve for a peat specimen, having saponite waste inclusions formed using the first method

В эксперименте с бентонитом на первом этапе испытаний продолжительностью 34 сут получили $c_{\text{св}} = 0,031$. Оказалось, что график $\varepsilon = f(lgt)$ после повторного приложения нагрузки можно аппроксимировать двумя прямыми линиями. На первом участке продолжительностью около 20 сут коэффициент вторичной консолидации оказался равным 0,051, т.е.

увеличился в 1,6 раза по сравнению с первичным нагружением, на втором — он возрос до 0,057. Полученный результат можно объяснить тем, что вначале на ход деформирования образца одновременно влияли дегидратация торфа и набухание глины, а затем набухание уже прекратилось. Стабилизация деформаций не наступила в течение последующих 55 сут.

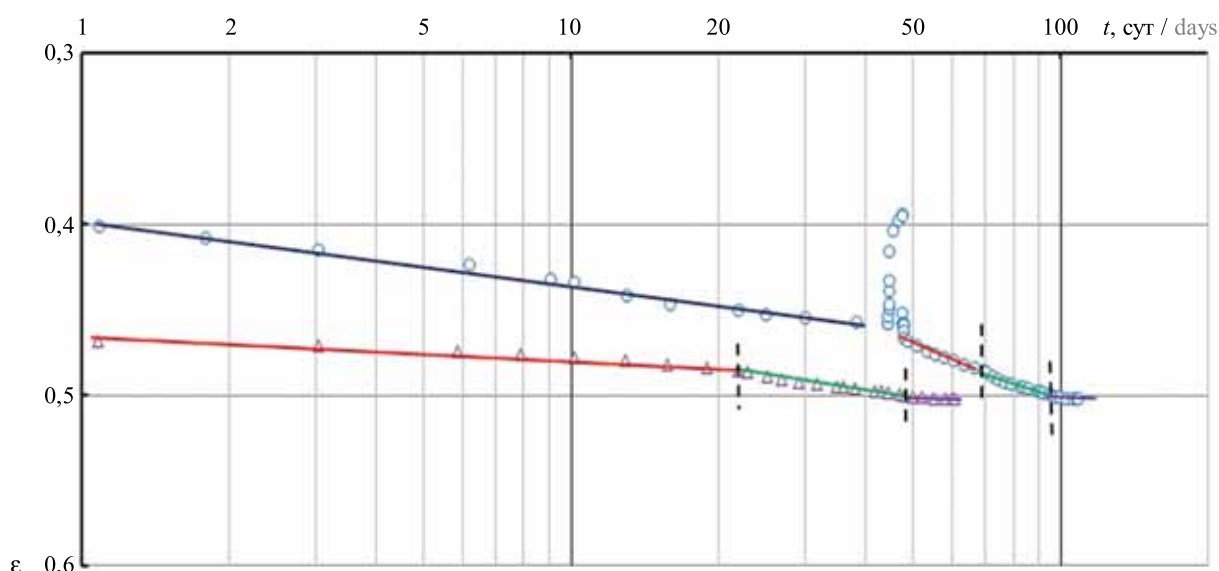


Рис. 8. График $\varepsilon = f(lgt)$ для образца торфа с включениями бентонита, изготовленными вторым способом

Fig. 8. $\varepsilon = f(lgt)$ curve for a peat specimen, having bentonite inclusions formed using the second method

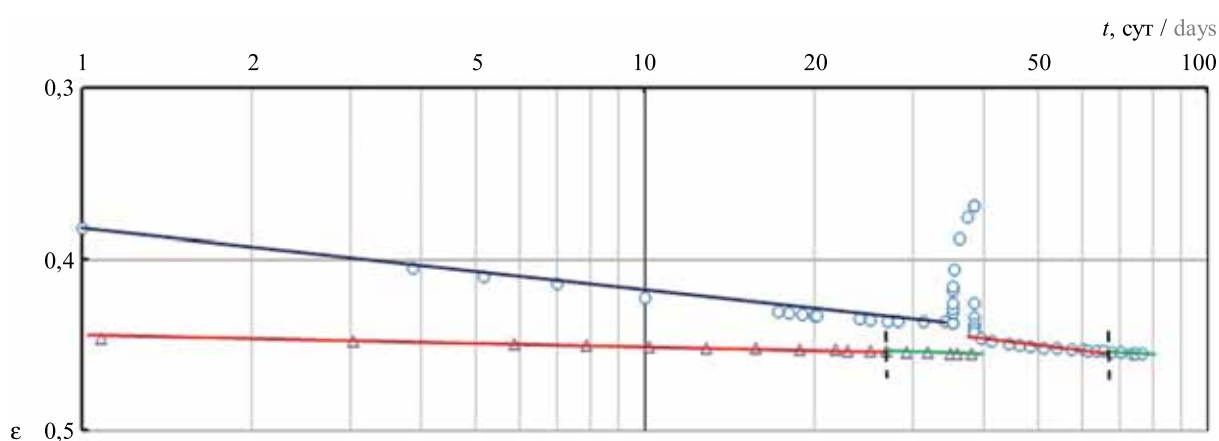


Рис. 9. График $\varepsilon = f(lgt)$ для образца торфа с включениями сапонитсодержащих отходов, изготовленными вторым способом

Fig. 9. $\varepsilon = f(lgt)$ curve for a peat specimen, having saponite waste inclusions formed using the second method

У образца с включениями второй глины из хвостохранилища $c_{\text{ос}}$ увеличился с 0,024 до 0,041, т.е. в 1,7 раза, но через 21 день после повторного нагружения стало наблюдаться замедление развития осадки.

Средние значения коэффициентов по результатам шести аналогичных опытов приведены в табл. 2.

На рис. 8, 9 представлены характерные графики $\varepsilon = f(lgt)$, построенные по данным испытаний образцов торфа с включениями тех же высокодисперсных глин, изготовленными вторым способом (как набивных свай).

Включения бентонита оказали существенное влияние на ход деформирования образцов. В течение 22 сут после их устройства и повторного приложения нагрузки коэффициент $c_{\text{ос}}$ составил 0,110, что в 3,1 раза больше исходного значения $c_{\text{ос}} = 0,036$. В по-

следующие 28 сут наклон графика к оси абсцисс несколько увеличился, но после интенсивной осадки, когда относительные деформации возросли на 0,06, произошло существенное замедление темпа осадки — $c_{\text{ос}}$ уменьшился до 0,020.

Иным оказалось влияние включений сапонитсодержащих отходов. Если на первом этапе испытаний было получено исходное значение $c_{\text{ос}} = 0,033$, то после повторного нагружения этот коэффициент увеличился лишь на 12 % и стал равен 0,037. Замедление развития осадки стало наблюдаться после 28 сут, когда коэффициент вторичной консолидации снизился до 0,015.

Средние значения коэффициентов вторичной консолидации торфа по данным 14 опытов приведены в табл. 2. Там же даны средние значения начальных значений плотности ρ_0 , влажности W_0 и коэф-

фициента пористости e_0 образцов. В первой строке таблицы, кроме двух контрольных опытов, учтены ранее опубликованные данные авторов [3, 9]. Первое из двух значений W_T получено для части образцов в непосредственной близости от включений, второе — на удалении от них.

Конечная влажность материала включений, как и следовало ожидать, оказалась несколько меньше влажности, достигнутой при свободном набухании: у бентонита $W_C = (0,71-0,77)W_{SW}$; у сапонитсодержащих отходов $W_C = (0,66-0,70)W_{SW}$. В контрольных опытах при отсутствии включений влажность торфа W_T при завершении опытов составила в среднем 5,70, включения высокодисперсных материалов обеспечили ее снижение до 4,05–4,82.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные эксперименты показали, что ускорение вторичной консолидации торфа может быть достигнуто путем внесения в него высокодисперсной глины, вызывающей интенсивную миграцию влаги из микропор. Движущей силой миграции служит разность потенциалов влаги в глине и торфе. В мономолекулярных пленках потенциал влаги, т.е. отрицательное давление, удерживающее связанную влагу на поверхности частиц, достигает 200 МПа. По мере роста влажности он снижается и, например, у монтмориллонита с влажностью 0,32–0,36 составляет около 1 МПа [31]. Приведенное значение более чем на порядок превышает давление, создаваемое на слой торфа насыпью при временной пригрузке или атмосферным давлением при его вакуумировании. Миграция прекращается при достижении равенства потенциалов влаги в торфе и высокодисперсной глине, результатом чего является замедление развития деформаций торфа или временная стабилизация осадки. Определенный вклад в рассматриваемый процесс вносит и набухание глинистого материала. Следует подчеркнуть, что степень дегидратации торфа определяется не только разностью потенциалов влаги в торфе и глине, но и количеством глины.

Эксперименты в одометрах показали, что при замене 10 % торфа в образце бентонитом коэффициент вторичной консолидации c_{ae} увеличился в 1,6–1,8 раза, сапонитсодержащими отходами из хвостохранилища — в 1,7 раза. Большой эффект дало формирование включений глины с вытеснением торфа по технологии устройства набивных свай. В опытах с бентонитом коэффициент c_{ae} увеличился в 3,1 раза и по завершении периода интенсивных деформаций, связанных с гидратацией глинистого материала, снизился в 1,8 раза относительно исходного значения. Устроенные по той же технологии включения из сапонитсодержащих отходов вызвали дегидратацию торфа, но коэффициент c_{ae} увеличился лишь на 12 %. Замедление развития осадки стало наблюдаться после 28 сут, когда коэффициент вторичной консолидации снизился до 0,015. По-видимому, препятствующим развитию осадки фактором послужило большее сопротивление включений вертикальной нагрузке.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- воздействовать на ход вторичной консолидации торфа можно с помощью мероприятий, направленных на кратковременное ускорение осадки, к которым следует отнести предложенную и исследованную авторами дегидратацию торфа за счет внесения в него высокодисперсной глины;
- эксперименты в одометрах показали, что при замене 10 % торфа бентонитом коэффициент вторичной консолидации c_{ae} увеличился в 1,6–1,8 раза, сапонитсодержащими отходами обогащения алмазосодержащей руды — в 1,7 раза;
- внедрение в торф бентонита по технологии устройства набивных свай привело к увеличению коэффициента c_{ae} в 3,1 раза. По завершении периода интенсивных деформаций, связанных с гидратацией глинистого материала, указанный коэффициент снизился в 1,8 раза относительно исходного значения. Устроенные по той же технологии включения из сапонитсодержащих отходов вызвали увеличение c_{ae} лишь на 12 %, однако при завершении миграции поровой влаги c_{ae} снизился в 1,8 раза относительно исходного значения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kazemian S., Moayedi H. Improvement of settlement problems of fibrous peat // Application of Nanotechnology in Pavements, Geological Disasters, and Foundation Settlement Control Technology. 2014. DOI: 10.1061/9780784478448.017
2. Tyurin D.A., Nevzorov A.L. Numerical simulation of long-term peat settlement under the sand embankment // Procedia Engineering. 2017. Vol. 175. Pp. 51–56. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.014
3. Ivakhnova G.Yu., Nevzorov A.L. The acceleration of the peat secondary consolidation due to the sorp-

- tion of bound water with disperse clay // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945. Issue 1. P. 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012051
4. Hayashi H., Nishimoto S., Yamanashi T. Applicability of settlement prediction method to peaty ground // Soils and Foundations. 2016. Vol. 56. Issue 1. Pp. 144–151. DOI: 10.1016/j.sandf.2016.01.012
5. Mesri G., Stark T.D., Ajlouni M.A., Chen C.S. Secondary compression of peat with or without surcharging // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental

- Engineering. 1997. Vol. 123. Issue 5. Pp. 411–421. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(1997)123:5(411)
6. Коновалов П.А., Гончаров В.Г., Платонов Ю.Н., Зехниев Ф.Ф. Результаты исследований процесса консолидации дренированных многослойных заторфованных оснований (совместный советско-финский эксперимент) // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1993. № 5. С. 18–23.
 7. Коновалов П.А., Зехниев Ф.Ф., Безволев С.Г. Оценка эффективности предварительного уплотнения слабого водонасыщенного глинистого основания способом перегрузки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2002. № 2. С. 18–22.
 8. Коновалов П.А., Зехниев Ф.Ф., Безволев С.Г. Расчет эффективности укрепления слабых оснований нагружением, дренированием и армированием // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2003. № 1. С. 2–8.
 9. Ивахнова Г.Ю., Невзоров А.Л. Особенности интерпретации результатов компрессионных испытаний торфа // Строительство и архитектура. 2020. Т. 8. № 1 (26). С. 26–32. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-1-26-32
 10. Olson E.R. Secondary Consolidation, Unit 7 // Advanced Soil Mechanics. Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology. 1989. Pp. 99–119.
 11. Hayashi H., Nishimoto S., Hashimoto H., Kajitori S. Long-term settlement of peaty soft ground improved using the vacuum consolidation method // Japanese Geotechnical Journal. 2013. Vol. 8. Issue 3. Pp. 415–424. DOI: 10.3208/jgs.8.415
 12. Huat B.B.K., Kazemian S., Prasad A., Barghchi M. A study of the compressibility behavior of peat stabilized by DMM: Lab Model and FE analysis // Scientific Research and Essays. 2011. Vol. 6. Issue 1. Pp. 196–204.
 13. Hashim R., Islam M.S. Properties of stabilized peat by soil-cement column method // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2008. Vol. 13. Pp. 1–9.
 14. Kalantari B., Huat B.B.K. Load-Bearing capacity improvement for peat soil // European Journal of Scientific Research. 2009. Vol. 32. Issue 2. Pp. 252–259.
 15. Abdel-Salam A.E. Stabilization of peat soil using locally admixture // HBRC Journal. 2018. Vol. 14. Issue 3. Pp. 294–299. DOI: 10.1016/j.hbrj.2016.11.004
 16. Venuja S., Mathiluxsan S., Nasvi M.C. Geotechnical engineering properties of peat, stabilized with a combination of fly ash and well graded sand // Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka. 2017. Vol. 50. Issue 2. P. 21. DOI: 10.4038/engineer.v50i2.7249
 17. Borthakur N., Sindh M.S. Stabilization of peat soil using locally available admixture // International Journal of Advances in Computer Science & Its Applications. 2014. Vol. 4. Issue 4. Pp. 227–231.
 18. Kolay P.K., Pui M.P. Peat stabilization using gypsum and fly ash // Journal of Civil Engineering, Science and Technology. 2010. Vol. 1. Issue 2. Pp. 1–5. DOI: 10.33736/jcest.75.2010
 19. Islam M.S., Hashim R. Bearing capacity of stabilized tropical peat by deep mixing method // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2009. Vol. 3. Issue 2. Pp. 682–688.
 20. Fernando R.M.S., Kulathilaka S.A.S. Effect of preloading on secondary consolidation of peaty clay // NBRO Symposium. Innovations for Resilient Environment. 2015. Pp. 89–92.
 21. Zain N.H.M. Effect of oxidation on the compression behaviour of organic soils: doctoral thesis. Delft University of Technology, 2019. DOI: 10.4233/uuid:aa7fe90a-7bf5-4c91-aa3e-c6a594a7d59d
 22. Fox P.J., Edil T.B. Effects of stress and temperature on secondary compression of Peat // Canadian Geotechnical Journal. 1996. Vol. 33. Issue 3. Pp. 405–415. DOI: 10.1139/t96-062
 23. Huey S.Y.J. Consolidation of peat and organic soil using electro-osmosis treatment: PhD Thesis. Curtin University, 2016. 278 p.
 24. Martin L. Effects of electro-osmotic consolidation of clays and its improvement using ion exchange membranes: PhD Thesis. New Jersey Institute of Technology, 2019. 144 p.
 25. Moayedi H., Kassim K.A., Kazemian S., Raf-tari M., Mokhberi M. Improvement of peat using Portland cement and electrokinetic injection technique // Arabian Journal for Science and Engineering. 2014. Vol. 39. Issue 10. DOI: 10.1007/s13369-014-1245-x
 26. Cappa R., Yniesta S., Brandenburg S.J., Lemnitzer A. Settlements and excess pore pressure generation in peaty soils under embankments during cyclic loading // 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. 2015.
 27. Pichan S.P., O’Kelly B.C. Effect of decomposition on the compressibility of fibrous peat // GeoCongress 2012. 2012. DOI: 10.1061/9780784412121.445
 28. Peng B., Feng R., Wu L., Shen Y. Controlling conditions of the one-dimensional consolidation test on peat soil // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 23. P. 11125. DOI: 10.3390/app112311125
 29. Hanson J.L., Edil T.B., Fox P.J. Stress-temperature effects on peat compression // Soft Ground Technology. 2001. DOI: 10.1061/40552(301)26
 30. Карпенко Ф.С. Условия накопления сапонитсодержащих осадков и технология их сгущения в хвостохранилище месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова : автореф. дис. ... канд. геолого-минер. наук. М., 2009. 36 с.
 31. Сергеев Е.М. Теоретические основы инженерной геологии: физико-химические основы. М. : Недра, 1985. 288 с.

Поступила в редакцию 22 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 18 января 2023 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2023 г.

О Б АВТОРАХ: Александр Леонидович Невзоров — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ)**; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; РИНЦ ID: 393637, Scopus: 7004203097, ResearcherID: J-2809-2012, ORCID: 0000-0002-6547-2741; a.l.nevzorov@yandex.ru;

Галина Юрьевна Ивахнова — аспирант кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ)**; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; РИНЦ ID: 1044892; Scopus: 57219992412, g.ivakhnova@gmail.com.

Вклад авторов:

Невзоров А.Л. — обзор литературы, концепция исследования, подготовка текста статьи.

Ивахнова Г.Ю. — проведение экспериментов, обработка данных, оформление рисунков.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kazemian S., Moayedi H. Improvement of settlement problems of fibrous peat. *Application of Nanotechnology in Pavements, Geological Disasters, and Foundation Settlement Control Technology*. 2014. DOI: 10.1061/9780784478448.017
2. Tyurin D.A., Nevzorov A.L. Numerical simulation of long-term peat settlement under the sand embankment. *Procedia Engineering*. 2017; 175:51-56. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.014
3. Ivakhnova G.Yu., Nevzorov A.L. The acceleration of the peat secondary consolidation due to the sorption of bound water with disperse clay. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 945(1):012051. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012051
4. Hayashi H., Nishimoto S., Yamanashi T. Applicability of settlement prediction method to peaty ground. *Soils and Foundations*. 2016; 56(1):144-151. DOI: 10.1016/j.sandf.2016.01.012
5. Mesri G., Stark T.D., Ajlouni M.A., Chen C.S. Secondary compression of peat with or without surcharging. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1997; 123(5):411-421. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(1997)123:5(411)
6. Konovalov P.A., Goncharov V.G., Platonov Iu.N., Zekhniev F.F. Results of investigations of the consolidation of drained multilayer peaty foundation beds. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1993; 5:18-23. (rus.).
7. Konovalov P.A., Zekhniev F.F., Bezvolev S.G. Evaluation of the effectiveness of pre-compaction of a weak water-saturated clayey bed by the overload method. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2002; 2:18-22. (rus.).
8. Konovalov P.A., Zekhniev F.F., Bezvolev S.G. Analysis of the effectiveness of weak-bed stabilization by loading, drainage, and reinforcement. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003; 1:2-8. (rus.).
9. Ivakhnova G.Yu., Nevzorov A.L. Specificities of the interpretation of the oedometer tests data for a peat. *Construction and Architecture*. 2020; 8(1):(26):26-32. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-1-26-32 (rus.).
10. Olson E.R. Secondary Consolidation, Unit 7. *Advanced Soil Mechanics. Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology*. 1989; 99-119.
11. Hayashi H., Nishimoto S., Hashimoto H., Kajitori S. Long-term settlement of peaty soft ground improved using the vacuum consolidation method. *Japanese Geotechnical Journal*. 2013; 8(3):415-424. DOI: 10.3208/jgs.8.415
12. Huat B.B.K., Kazemian S., Prasad A., Barghchi M. A study of the compressibility behavior of peat stabilized by DMM: Lab Model and FE analysis. *Scientific Research and Essays*. 2011; 6(1):196-204.
13. Hashim R., Islam M.S. Properties of stabilized peat by soil-cement column method. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2008; 13:1-9.
14. Kalantari B., Huat B.B.K. Load-Bearing capacity improvement for peat soil. *European Journal of Scientific Research*. 2009; 32(2):252-259.
15. Abdel-Salam A.E. Stabilization of peat soil using locally admixture. *HBRC Journal*. 2018; 14(3): 294-299. DOI: 10.1016/j.hbrj.2016.11.004
16. Venuja S., Mathiluxsan S., Nasvi M.C. Geotechnical engineering properties of peat, stabilized with a combination of fly ash and well graded sand. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*. 2017; 50(2):21. DOI: 10.4038/engineer.v50i2.7249
17. Borthakur N., Sindh M.S. Stabilization of peat soil using locally available admixture. *International Journal of Advances in Computer Science & Its Applications*. 2014. Vol. 4. Issue 4. Pp. 227-231.
18. Kolay P.K., Pui M.P. Peat stabilization using gypsum and fly ash. *Journal of Civil Engineering, Sci-*

ence and Technology. 2010; 1(2):1-5. DOI: 10.33736/jcest.75.2010

19. Islam M.S., Hashim R. Bearing capacity of stabilized tropical peat by deep mixing method. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2009; 3(2):682-688.

20. Fernando R.M.S., Kulathilaka S.A.S. Effect of preloading on secondary consolidation of peaty clay. *NBRO Symposium. Innovations for Resilient Environment*. 2015; 89-92.

21. Zain N.H.M. *Effect of oxidation on the compression behaviour of organic soils: doctoral thesis*. Delft University of Technology, 2019. DOI: 10.4233/uuid:aa7fe90a-7bf5-4c91-aa3e-c6a594a7d59d

22. Fox P.J., Edil T.B. Effects of stress and temperature on secondary compression of Peat. *Canadian Geotechnical Journal*. 1996; 33(3):405-415. DOI: 10.1139/t96-062

23. Huey S.Y.J. *Consolidation of peat and organic soil using electro-osmosis treatment: PhD Thesis*. Curtin University, 2016; 278.

24. Martin L. *Effects of electro-osmotic consolidation of clays and its improvement using ion exchange membranes: PhD Thesis*. New Jersey Institute of Technology, 2019; 144.

25. Moayedi H., Kassim K.A., Kazemian S., Raf-tari M., Mokheri M. Improvement of peat using Portland

cement and electrokinetic injection technique. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014; 39(10). DOI: 10.1007/s13369-014-1245-x

26. Cappa R., Yniesta S., Brandenburg S.J., Lem-nitzer A. Settlements and excess pore pressure generation in peaty soils under embankments during cyclic loading. *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. 2015.

27. Pichan S.P., O'Kelly B.C. Effect of decomposition on the compressibility of fibrous peat. *GeoCongress 2012*. 2012. DOI: 10.1061/9780784412121.445

28. Peng B., Feng R., Wu L., Shen Y. Controlling conditions of the one-dimensional consolidation test on peat soil. *Applied Sciences*. 2021; 11(23):11125. DOI: 10.3390/app112311125

29. Hanson J.L., Edil T.B., Fox P.J. Stress-tempe-rature effects on peat compression. *Soft Ground Techno-logy*. 2001. DOI: 10.1061/40552(301)26

30. Karpenko F.S. *Accumulation conditions of sap-onite-containing waste and technology of their condensa-tion in the tailings dam of M.V. Lomonosov diamonds deposit : author's abstract of PhD thesis*. Moscow, 2009; 39. (rus.).

31. Sergeev E.M. *Theoretical foundations of en-gineering geology: physico-chemical bases*. Moscow, 1985; 288. (rus.).

Received November 22, 2022.

Adopted in revised form on January 18, 2023.

Approved for publication on February 6, 2023.

B I O N O T E S : **Alexander L. Nevzorov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Engineering Geology, Bases and Foundations; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Severnaya Dvina emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ID RISC: 393637, Scopus: 7004203097, ResearcherID: J-2809-2012, ORCID: 0000-0002-6547-2741; a.l.nevzorov@yandex.ru;

Galina Yu. Ivakhnova — postgraduate of the Department of Engineering Geology, Bases and Foundations; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Severnaya Dvina emb., Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ID RISC: 1044892; Scopus: 57219992412; g.ivakhnova@gmail.com.

Authors' contribution:

Alexander L. Nevzorov — literature review, research concept, preparation the text of the article.

Galina Yu. Ivakhnova — experiments, data gathering and processing, design of graphs and figures.

The authors declare no conflict of interest.

Сопротивление срезу самоупреженных элементов без поперечного армирования с продольными стержнями из полимерных композитов. Верификация предложенной расчетной модели

Виктор Владимирович Тур, Александр Петрович Воробей

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

АННОТАЦИЯ

Введение. На основании результатов теоретических исследований моделей сопротивления срезу бетонных элементов, армированных стержнями из полимерных композитов, была предложена модифицированная модель, в качестве основы которой принята теория критической трещины среза (CSCT). Для верификации положений предложенной модели проведены экспериментальные исследования, в которых выявлены особенности сопротивления срезу элементов на напрягающем бетоне и бетона на портландцементе, армированных как стальными стержнями, так и стержнями из полимерных композитов, при различных случаях и схемах нагружения.

Материалы и методы. Предложенная модифицированная модель сопротивления срезу верифицирована на фоне опытных данных, полученных как в собственных исследованиях, так и другими авторами (база данных включала 301 элемент).

Результаты. Основываясь на результатах параметрического исследования, предложен феноменологический критерий сопротивления срезу для гибких элементов, армированных стержнями из полимерных композитов, на основе которого разработана упрощенная расчетная модель, позволяющая определять сопротивление срезу бетонных элементов (в том числе и самоупреженных), армированных FRP стержнями, без необходимости расчета всех составляющих перерезывающей силы.

Выводы. Представленная упрощенная модель сопротивления срезу гибких самоупреженных элементов, армированных стержнями из полимерных композитов, адекватно оценивает сопротивление срезу элементов при действии в пролете распределенной нагрузки и показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными. Опираясь на результаты сравнительного анализа, показано, что основные преимущества предложенной модели перед существующими зависимостями заключаются в том, что она отражает физическую сущность явления среза, а также применима к различным случаям и схемам нагружения элементов, армированных стержнями из полимерных композитов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сопротивление срезу, равномерно распределенная нагрузка, экспериментальные исследования, стержни из полимерных композитов, напрягающий бетон, балочные элементы, база данных, критерий сопротивления срезу, упрощенная модель

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тур В.В., Воробей А.П. Сопротивление срезу самоупреженных элементов без поперечного армирования с продольными стержнями из полимерных композитов. Верификация предложенной расчетной модели // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 230–240. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.230-240

Автор, ответственный за переписку: Виктор Владимирович Тур, profturvic@gmail.com.

Shear resistance of self-stressed elements without web reinforcement and with longitudinal bars made of polymer composites. Experimental studies. Verification of the proposed design model

Viktar V. Tur, Aliaksandr P. Varabei

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

ABSTRACT

Introduction. The critical shear crack theory (CSCT) was applied to devise a modified model on the basis of theoretical research into shear resistance models of concrete elements reinforced with polymer composite bars. Experimental studies were conducted for various loading patterns and cases to verify provisions of the proposed model, to find the shear resistance of elements made of expansive concrete and concrete containing Portland cement, reinforced with steel bars and FRP.

Materials and methods. The proposed modified shear resistance model was verified using the experimental data obtained both by the authors and other researchers (the database had 301 elements).

Results. Given the results of a parametric study, a phenomenological shear resistance criterion was proposed for flexible elements, reinforced with polymer composite bars. Its mission was to simplify the model design to determine the shear resistance of concrete elements reinforced by FRP bars. Hence, no analysis of the shear force components was needed.

Conclusions. The proposed simplified shear resistance model of flexible self-stressed elements, reinforced with polymer composite bars, adequately evaluates the shear resistance of elements exposed to the load distributed in a span; it shows good convergence with experimental data.

KEYWORDS: shear resistance, uniformly distributed load, experimental studies, FRP, expansive concrete, beam elements, database, shear resistance criterion, simplified design model

FOR CITATION: Tur V.V., Varabei A.P. Shear resistance of self-stressed elements without web reinforcement and with longitudinal bars made of polymer composites. Experimental studies. Verification of the proposed design model. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):230-240. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.230-240 (rus.).

Corresponding author: Viktor V. Tur, profturnic@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Существует ряд эмпирических и полуэмпирических расчетных моделей сопротивления срезу элементов, армированных стержнями из полимерных композитов (англ. Fiber Reinforced Polymer — FRP), рассмотренных в первой части статьи¹. Принимая во внимание то обстоятельство, что в большинстве случаев данные модели получают путем модификации известных расчетных моделей сопротивления срезу простым умножением коэффициента продольного армирования на поправочный коэффициент, равный отношению модулей упругости FRP и стали, или через введение целого набора эмпирических коэффициентов, была разработана расчетная модель сопротивления срезу самоупрeяженных бетонных элементов с продольными стержнями из полимерных композитов (подробно описана в первой части данной статьи¹). Эффект от самоупрeяжения, достигнутый на стадии расширения напрягающего бетона, учитывается в предложенной модели при определении трещиностойкости сечений, наклонных к продольной оси элемента, и ширины раскрытия критической наклонной трещины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для вeрификации положений представленной модифицированной модели сопротивления срезу самоупрeяженных бетонных элементов, армированных FRP, выполнены экспериментальные исследования, методика проведения которых и полученные результаты детально описаны в работе [1]. Кроме того, при анализе была использована собственная база экспериментальных данных, составленная из результатов испытаний других авторов [2], включавшая 301 элемент.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Параметрические исследования

Для выявления положения расчетного сечения a_A осуществлены исследования трех различных положений наклонной трещины по длине пролета

в зависимости от схемы нагружения (рис. 1), базируясь на результатах экспериментальных данных, изложенных в работе [1].

Расчет составляющих перерезывающей силы для различных сечений по длине пролета опытных балок [1] был произведен по алгоритму итерационной процедуры расчета сопротивления срезу бетонных элементов, армированных FRP стержнями, представленному в первой части статьи. На рис. 2 представлены результаты расчета составляющих сопротивления срезу для сечений ($a_A = d$, $a_A = L/4$ и $a_A = L/2 - d$) балки БИ-2СД18 из работы [1], нагруженной равномерно-распределенной нагрузкой в пролете, и для сечений ($a_A = d$, $a_A = a/2$ и $a_A = a - d$) балки БИ-3СД12 из работы [1], нагруженной сосредоточенной силой в консоли.

В табл. 1 приведены результаты сравнения значений перерезывающих сил (сопротивлений срезу), рассчитанных по предложенной итерационной процедуре, с результатами экспериментального исследования, приведенными в работе [1] для различных сечений вдоль пролета опытных балок, армированных стержнями из полимерных композитов (FRP).

Итоги параметрического исследования (рис. 2) показывают, что вклад в сопротивление срезу составляющей поперечной силы за счет зацепления по берегам трещины является основным для всех исследованных положений наклонной трещины. Исходя из результатов сравнения теоретических значений сопротивления срезу и экспериментальных исследований [1], представленных в табл. 1, можно заключить, что расположение расчетного сечения по длине элемента, нагруженного сосредоточенными силами, будет находиться ближе к оси приложения нагрузки $a_A = a - d$. Также установлено, что при действии равномерно распределенной нагрузки в пролете балки, армированной стержнями из полимерных композитов, расчетное сечение будет располагаться ближе к середине пролета балки ($a_A = L/2 - d$).

Предложенная модель сопротивления срезу показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными (рис. 3). Так, для балок с пролетом среза $a/d \geq 2,5$ (а также нагруженных равномерно распре-

¹ Тур В.В., Воробей А.П. Сопrotивление срезу самоупрeяженных элементов без поперечного армирования с продольными стержнями из полимерных композитов. Теоретические основы расчетной модели // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 1. С. 46–59. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.46-59

деленной нагрузкой) при положении расчетного сечения на расстоянии $a_A = a - d$ ($a_A = L/2 - d$) от опоры параметры ошибки моделирования, определенные согласно ТКП EN 1990², составили: среднее $V_{Rd,exp}/V_{Rd,theo} = 0,93$ при $V_x = 26,8\%$.

Дисперсия результатов связана главным образом с тем, что при проведении параметрического исследова-

ния в расчетной модели сопротивления были приняты усредненные постоянные значения параметров модифицированного закона «сцепление – проскальзывание» (p и α), а также максимальные напряжения сцепления τ_m и смещения s_m , независимо от типа, формы и характеристик поверхности стержней FRP, как рекомендовано в труде [3].

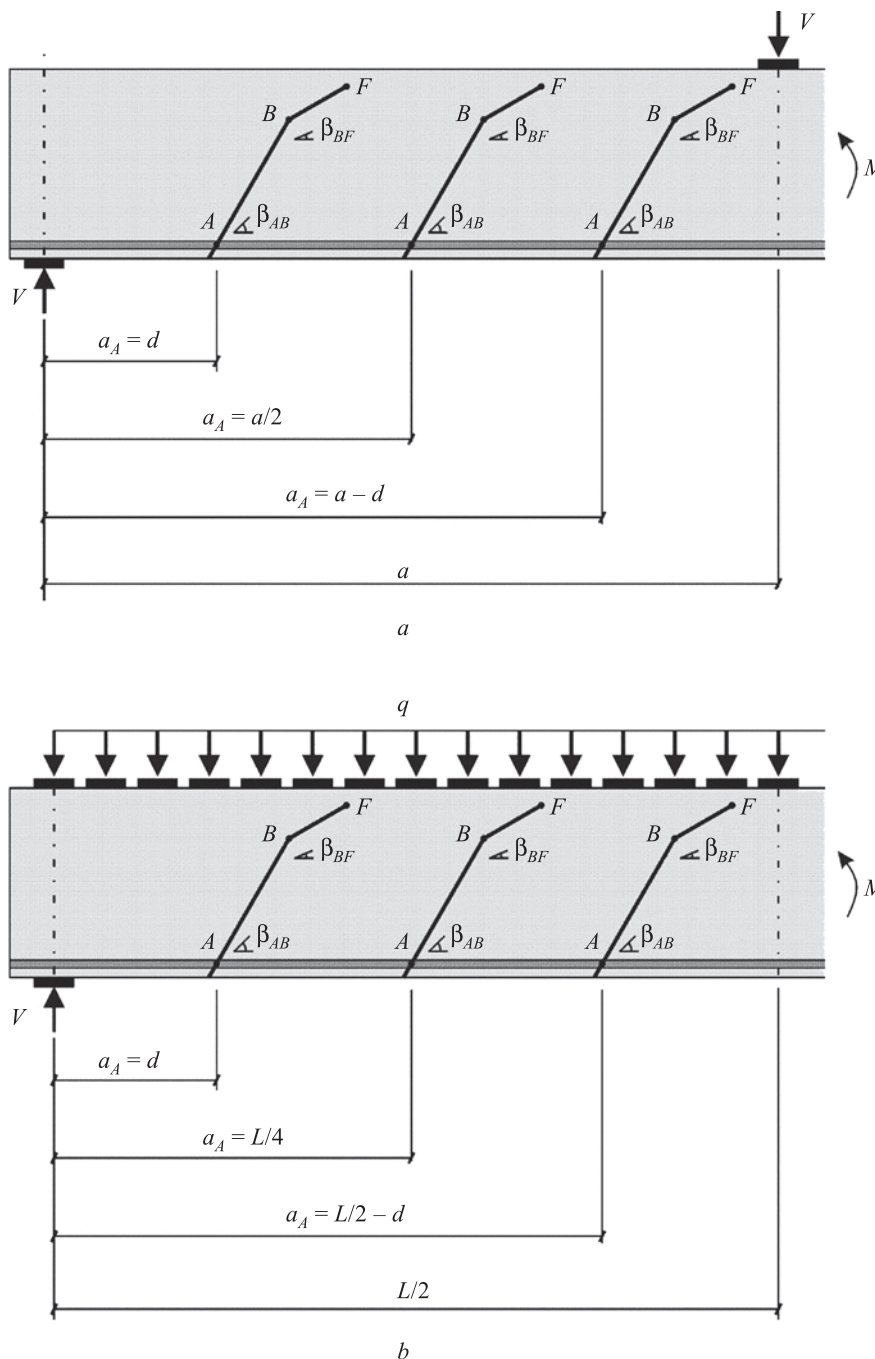


Рис. 1. Потенциальное положение наклонной трещины a_A по длине пролета при различных схемах нагружения: a — элемент, нагруженный сосредоточенной силой; b — элемент, нагруженный равномерно распределенной нагрузкой
 Fig. 1. Potential position of inclined crack a_A along the span for various loading patterns: a — an element loaded with a concentrated force; b — an element loaded with a uniformly distributed load

² Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций: ТКП EN 1990-2011 (02250) (EN 1990:2002, IDT) (с изм.) : введ. 01.07.12. Минск : Стройтехнорм, 2012. 86 с.

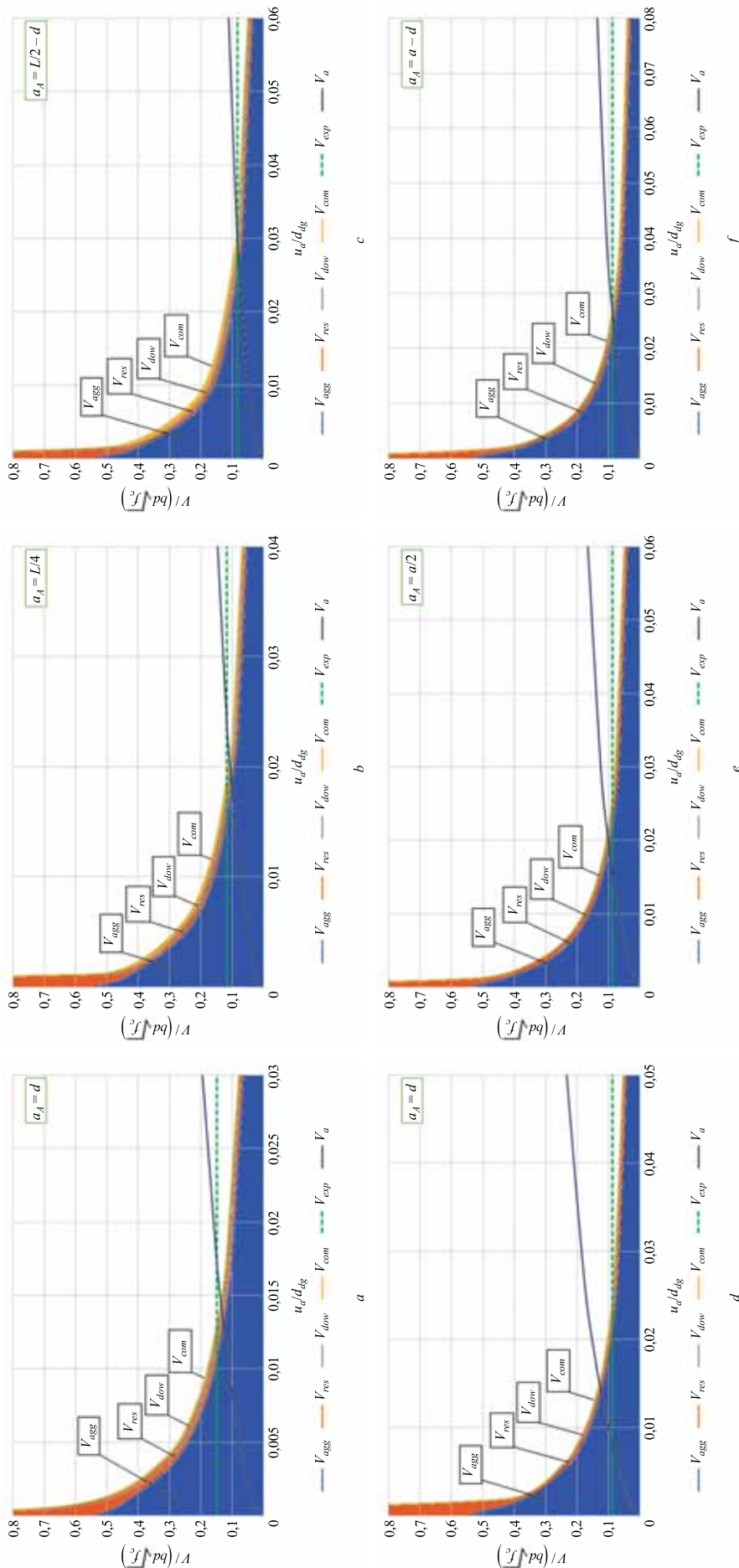


Рис. 2. Критерий разрушения и кривая «нагрузка – деформация» для расчетных сечений опытных балок; составляющие сопротивления срезу: зацепления по берегам трещины, остаточные напряжения растяжения; нагельный эффект и сжатая зона бетона. Расчетные сечения балки БИ-2СД18: a — $a_A = d$; b — $a_A = L/4$; c — $a_A = L/2 - d$ и балки БИ-3СД12: d — $a_A = d$; e — $a_A = a/2$; f — $a_A = a - d$

Fig. 2. The failure criterion and the “load – strain” curve made for the analyzed sections of experimental beams; shear resistance components: interlock aggregate, residual tensile strength of concrete; dowel action and the compressed area. Design sections of beam BI-2SD18: a — $a_A = d$; b — $a_A = L/4$; c — $a_A = L/2 - d$ and beam BI-3SD12: d — $a_A = d$; e — $a_A = a/2$; f — $a_A = a - d$

Табл. 1. Сравнение теоретических значений сопротивления срез по предложенной процедуре с экспериментальными данными [1] при различных расчетных сечениях вдоль пролета балочных элементов, армированных FRP

Table 1. Comparison of theoretical values of shear resistance according to the proposed procedure using experimental data [1] for various design sections along the span of beam elements reinforced with FRP

Название балок Types of beams	Тип армирования Reinforcement type	Сечение, мм Cross section, mm	V_{theo} , кН / kN	V_{exp} , кН / kN	V_{exp}/V_{theo}
BI-1SD18P (без нагружения консоли) (no cantilever loaded)	GFRP	$d = 270$	32,38	49,73	1,54
		$L/4 = 420$	24,0	36,65	1,53
		$L/2 - d = 570$	17,21	23,56	1,37
BI-2SD18	GFRP	$d = 270$	32,87	36,02	1,10
		$L/4 = 375$	26,17	28,14	1,08
		$L/2 - d = 480$	20,45	20,26	0,99
BII-3SD12	GFRP	$d = 270$	36,57	24,52	0,67
		$a/2 = 450$	29,26	24,52	0,84
		$a - d = 630$	24,87	24,52	0,99
BII-4UD12	CFRP	$d = 270$	36,09	24,52	0,68
		$a/2 = 450$	28,90	24,52	0,85
		$a - d = 630$	24,76	24,52	0,99
BV-9SS16,5	GFRP	$d = 270$	29,76	32,38	1,09
		$L/4 = 375$	23,64	25,30	1,07
		$L/2 - d = 480$	18,38	18,22	0,99
BV-10SS16,5	GFRP	$d = 270$	33,27	18,48	0,56
		$a/2 = 450$	26,51	18,48	0,70
		$a - d = 630$	22,48	18,48	0,82
BVI-12SPTs	GFRP	$d = 270$	28,04	29,09	1,04
		$L/4 = 375$	22,39	22,73	1,02
		$L/2 - d = 480$	17,45	16,36	0,94
BVII-13SS16,5	GFRP	$d = 270$	32,24	21,94	0,68
		$a/2 = 450$	25,78	21,94	0,85
		$a - d = 630$	21,93	21,94	1,0
BVIII-15SPTs	GFRP	$d = 270$	38,98	29,72	0,76
		$a/2 = 230$	30,76	29,72	0,97

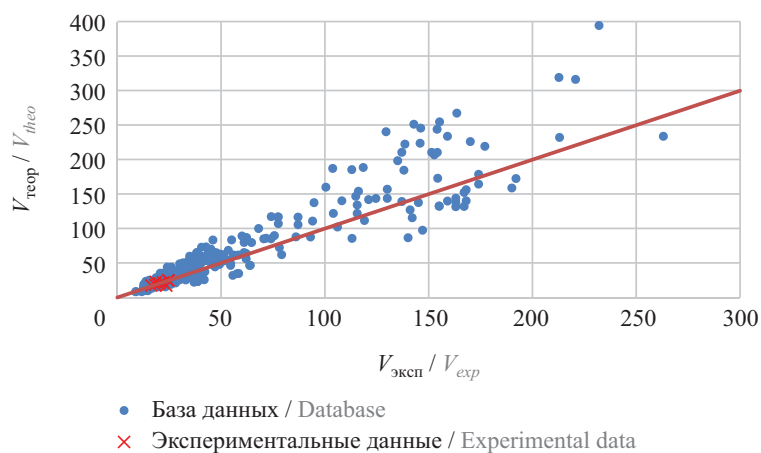


Рис. 3. Сравнение теоретических значений сопротивления срез по предложенной процедуре (при $a_A = a - d$) с базой данных [2] и экспериментальными данными [1]

Fig. 3. Comparison between theoretical values of shear resistance, obtained using the proposed procedure (for $a_A = a - d$), with the database [2] and experimental data [1]

Феноменологический критерий сопротивления срезу бетонных элементов, армированных стержнями из полимерных композитов

Несмотря на то что предложенная модель обеспечивает приемлемую точность расчета сопротивления срезу (табл. 1), для целей проектирования вместо довольно трудоемкой итерационной процедуры расчета составляющих сопротивления срезу предложен гиперболический критерий сопротивления срезу и на его основе упрощенная расчетная модель.

Критерий сопротивления срезу был получен на фоне экспериментальных исследований [1] и базы

данных (301 бетонный элемент, армированный FRP) [2] аппроксимацией степенного выражения вида:

$$\frac{\tau}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{V}{bd\sqrt{f_{cm}}} = k \left(\frac{u_A}{d_{dg}} \right)^{-3/4}, \quad (1)$$

где $k = 0,0056 \text{ МПа}^{0,5}$ (рис. 4).

На рис. 4 синие точки и красные ромбы представляют собой пересечения критериев разрушения, рассчитанных, согласно предложенной процедуре, в расчетном сечении $a_A = a - d$ для балочных элементов с пролетом среза $a/d \geq 2,5$ и зависимости «нагрузка – деформации» (само пересечение условно не показано, см. рис. 2).

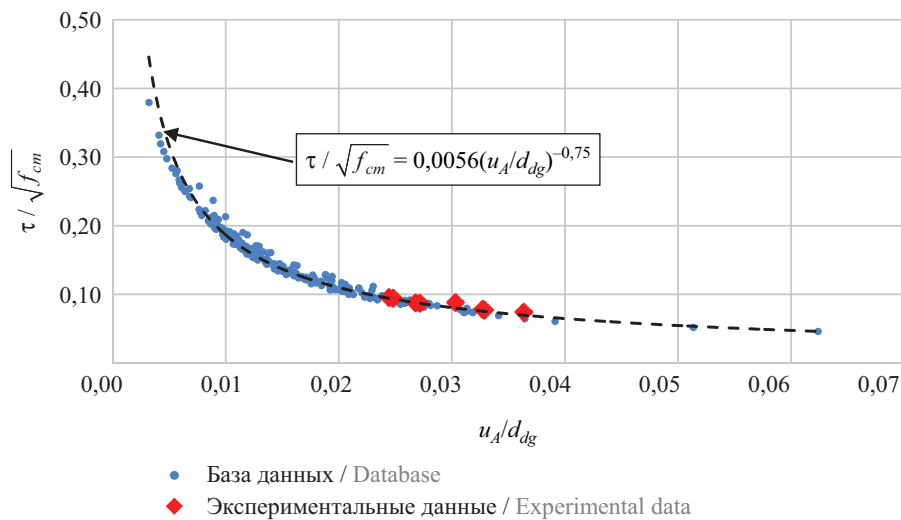


Рис. 4. Критерий сопротивления срезу по предложенной модели на фоне экспериментальных данных

Fig. 4. Shear resistance criterion obtained using the proposed model against the background of experimental data

Как видно из рис. 4, полученный критерий для элементов, армированных стержнями FRP, имеет отличие от аналитического описания критерия модели CSCT [4–10] для случая арматуры из стальных стержней. Отличием в критерии (1) является значение степени $(-3/4)$ и коэффициента $k = 0,0056$ (для стальных стержней по результатам аппроксимации степень $(-1/2)$ и $k = 0,019$ [11]). При использовании критерия разрушения (1) при расчете сопротивления срезу бетонных элементов, армированных FRP, горизонтальная составляющая ширины раскрытия наклонной

трещины u_A определяется по зависимостям (1)–(13), представленным в первой части данной статьи¹.

Упрощенный вариант модели сопротивления срезу, разработанный на основе феноменологического критерия (1), примет следующий вид:

$$V_{Rd,c} = \frac{k'}{\gamma_c} bd\sqrt{f_{ck}} \left(\frac{u_A}{d_{dg}} \right)^{-3/4}, \quad (2)$$

где k' — эмпирический коэффициент, который калибруется для требуемого уровня надежности при частном коэффициенте $\gamma_c = 1,5$;

$$\begin{cases} d_{dg} = \min \{ 16 + d_g; 40 \}, \text{ при } f_{ck} \leq 60 \text{ МПа,} \\ d_{dg} = \min \left\{ 16 + d_g \left(\frac{60}{f_{ck}} \right)^2; 40 \right\}, \text{ при } f_{ck} > 60 \text{ МПа.} \end{cases} \quad (3)$$

Предложенная модель сопротивления срезу показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными (рис. 5). Так, для балок с пролетом среза $a/d \geq 2,5$ и положением расчетного сечения на расстоянии $a_A = a - d$ от опоры параметры ошибки мо-

делирования составили: среднее $V_{Rd,exp}/V_{R,theo} = 0,98$, при $V_x = 26,61 \%$.

Исходя из результатов сравнительного анализа моделей сопротивления срезу бетонных элементов, армированных стержнями из полимерных компози-

тов^{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15} [12–20], представленного в табл. 2, предложенная модель не уступает по точности наиболее применимым существующим моделям, однако имеет ключевое отличие, которое отражает физическую сущность явления среза и позволяет определить ширину раскрытия наклонной трещины с учетом распределения смещений, нормальных напряжений и напряжений сцепле-

ния вдоль арматурного стержня, а также дает возможность установить длину зоны передачи напряжений. По сравнению с существующими моделями^{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15} [12–20] предложенная процедура адекватно оценивает сопротивление срезу бетонных элементов, армированных FRP, при действии в пролете распределенной нагрузки (табл. 1).

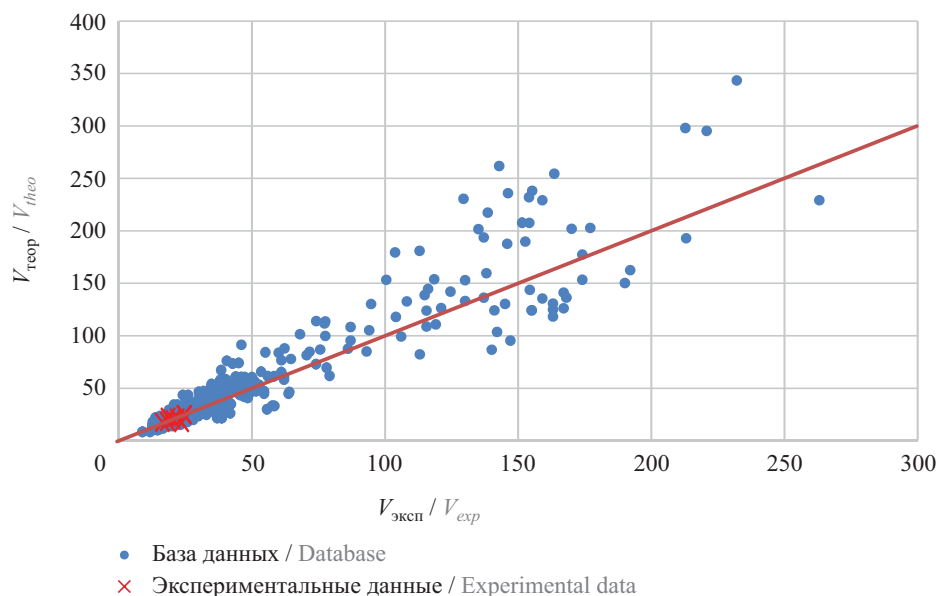


Рис. 5. Сравнение теоретических значений сопротивления срезу по предложенной упрощенной модели (при $a_A = a - d$) с базой данных [2] и экспериментальными данными [1]

Fig. 5. Comparison between theoretical values of shear resistance, obtained using the proposed simplified model (for $a_A = a - d$), the database [2] and the experimental data [1]

³ ACI 440.1R-03. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI Committee 440. American Concrete Institute, 2003. 41 p.

⁴ ACI-440-15. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI committee 440. American Concrete Institute, 2015. 88 p.

⁵ ISIS-M03-01. Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers // The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada, University of Winnipeg. Manitoba, 2001. 81 p.

⁶ JSCE 1997. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials // Japan Society of Civil Engineers, Concrete Engineering Series 23. Tokyo, 1998. No. 81. 7 p.

⁷ CSA S806-12. Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. Canadian Standards Association. Mississauga, ON, 2012. 206 p.

⁸ GB 50608-2010. Technical code for infrastructure application of FRP composites. Beijing : China Metallurgical Construction Association, 2011. No. 735.

⁹ BISE-1999. Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures using Fiber Composite Reinforcement. London : British Institution of Structural Engineers, 1999. 116 p.

¹⁰ AASHTO LRFD-17. Bridge Design Guide Specifications for GFRP Reinforced Concrete Bridge Decks and Traffic Railings. Washington DC : AASHTO, 2018.

¹¹ CNR-DT203-06. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars // Advisory Committee Technical Recommendations Construction. Rome, 2006. 39 p.

¹² CAN/CSA-S6-14. Canadian highway bridge design code // Canadian Standards Association. Toronto, 2014.

¹³ ACI-318-19. Building code requirements for structural concrete and commentary // ACI committee 318, American Concrete Institute. Farmington Hills, Mich., 2019. 624 p.

¹⁴ Eurocode 2. Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau : DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04. Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter // Deutsches Institut für Normung. Berlin, 2013. 389 p.

¹⁵ Eurocode 2. Design of Concrete Structures. Part 1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures (prEN 1992-1-1:2018) // European Committee for Standardization (Draft for committee works). 2018. 293 p.

Табл. 2. Результаты сравнительного анализа сопротивления срезу балок без поперечного армирования ($a/d \geq 2,5$)

Table 2. Results of comparative analysis of the shear strength of beams having no transverse reinforcement ($a/d \geq 2.5$)

Расчетные методы Design model	Среднее V_{exp}/V_{theo} Mean value	Медиана V_{exp}/V_{theo} Median	Стандартное отклонение V_{exp}/V_{theo} Standard deviation	Коэффициент вариации V_{exp}/V_{theo} , % Coefficient of variation	Минимальное значение V_{exp}/V_{theo} Minimum value	Максимальное значение V_{exp}/V_{theo} Maximum value
А.К. El-Sayed и соавт. [12] A.K. El-Sayed et al.	1,14	1,26	0,32	24,05	0,48	3,14
D. Gao и соавт. [13] D. Gao et al.	0,84	0,97	0,30	28,60	0,36	2,66
M. Nehdi и соавт. [14] M. Nehdi et al.	0,95	1,07	0,27	24,07	0,40	2,35
I.F. Kara [15]	0,88	0,99	0,25	23,69	0,37	2,37
A. Mari и соавт. [16] A. Mari et al.	1,45	1,64	0,44	25,03	0,62	4,14
T. Zhang и соавт. [17] T. Zhang et al.	0,84	1,05	0,33	31,11	0,41	2,62
H. Baghi и соавт. [18] H. Baghi et al.	0,38	0,41	0,14	30,38	0,15	1,10
A.H. Ali и соавт. [19] A.H. Ali et al.	1,02	1,02	0,33	29,80	0,42	2,32
N.A. Hoult и соавт. [20] N.A. Hoult et al.	1,07	1,09	0,26	21,87	0,42	2,47
ACI 440. R-03 ³	2,29	3,53	2,42	55,68	0,99	14,45
ACI 440-15 ⁴	1,60	1,79	0,53	26,59	0,72	4,87
ISIS-M03-01 ⁵	1,70	2,01	0,67	37,76	0,52	4,65
JSCE 97 ⁶	1,24	1,25	0,33	23,93	0,51	3,02
CAN/CSA-S806-2012 ⁷	0,91	0,95	0,22	23,88	0,34	1,97
GB50608-10 ⁸	1,36	1,57	0,46	26,78	0,63	4,12
BISE-99 ⁹	1,08	1,12	0,29	25,02	0,42	2,81
AASHTO LRFD-2017 ¹⁰	1,56	1,73	0,58	30,91	0,54	4,73
CNR-DT 203/2006 ¹¹	0,56	0,61	0,17	28,79	0,19	1,52
CAN/CSA-S6 ¹²	0,65	0,65	0,24	32,46	0,20	1,83
ACI 318-19 ¹³	1,75	1,89	0,51	27,15	0,67	4,65
EN2 ¹⁴	1,68	1,78	0,54	28,59	0,74	3,93
prEN2 ¹⁵	0,92	0,93	0,24	25,44	0,35	2,29
Предложенная упрощенная модель Proposed simplified model	0,98	0,95	0,26	26,61	0,50	1,85

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Опираясь на результаты сравнительного анализа, показано, что основные преимущества предложенной модели перед существующими зависимостями заключаются в том, что она отражает физическую сущ-

ность явления среза, а также применима к различным случаям и схемам нагружения элементов, армированных стержнями из полимерных композитов. При этом выявленные статистические параметры ошибки моделирования² составляют: среднее $V_{Rd,exp}/V_{R,theo} = 0,98$, при $V_x = 26,61$ % (упрощенная модель).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Воробей А.П., Тур В.В. Экспериментальные исследования сопротивления срезу самоупроченных бетонных балок, армированных FRP при различных условиях нагружения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. 2021. № 16. С. 41–57.
2. Cholostiakow S., Di Benedetti S.M., Guadagnini M., Kaszubska M., Szczech D., Kotynia R. Shear database of RC FRP beams without shear reinforcement. The University of Sheffield, Dataset. 2017.
3. Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R. Development length of FRP straight rebars // Composites Part B: Engineering. 2002. Vol. 33. Issue 7. Pp. 493–504. DOI: 10.1016/S1359-8368(02)00051-3
4. Cavagnis F. Shear in reinforced concrete without transverse reinforcement: from refined experimental measurements to mechanical models : thesis ... doctor of philosophy. Structural concrete laboratory (IBETON), École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2017. 201 p. DOI: 10.5075/epfl-thesis-8216
5. Muttoni A., Fernández Ruiz M. Shear strength of members without transverse reinforcement as function of critical shear crack width // ACI Structural Journal. 2008. Vol. 105. Issue 2. DOI: 10.14359/19731
6. Fernández Ruiz M., Muttoni A., Sagaseta J. Shear strength of concrete members without transverse reinforcement: a mechanical approach to consistently account for size and strain effects // Engineering Structures. 2015. Vol. 99. Pp. 360–372. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2015.05.007
7. Campana S., Fernández Ruiz M., Anastasi A., Muttoni A. Analysis of shear-transfer actions on one-way RC members based on measured cracking pattern and failure kinematics // Magazine of Concrete Research. 2013. Vol. 65. Issue 6. Pp. 386–404. DOI: 10.1680/macr.12.00142
8. Cavagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A. An analysis of the shear-transfer actions in reinforced concrete members without transverse reinforcement based on refined experimental measurements // Structural Concrete. 2018. Vol. 19. Issue 1. Pp. 49–64. DOI: 10.1002/suco.201700145
9. Cavagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results // Engineering Structures. 2015. Vol. 103. Pp. 157–173. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.09.015
10. Muttoni A., Fernández Ruiz M. From experimental evidence to mechanical modeling and design expressions: The Critical Shear Crack Theory for shear design // Structural Concrete. 2019. Vol. 20. Issue 4. Pp. 1464–1480. DOI: 10.1002/suco.201900193
11. Cavagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A. A mechanical model for failures in shear of members without transverse reinforcement based on development of a critical shear crack // Engineering Structures. 2018. Vol. 157. Pp. 300–315. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.12.004
12. El-Sayed A.K., El-Salakawy E.F., Benmokrane B. Shear strength of concrete beams reinforced with FRP bars: design method // SP-230: 7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures. 2005. DOI: 10.14359/14875
13. Gao D., Zhang C.A Model for Shear Strength of FRP Bar Reinforced Concrete Beams without Stirrups // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2020/8881463
14. Nehdi M., El Chabib H., Aly Saïd A. Proposed shear design equations for FRP-reinforced concrete beams based on genetic algorithms approach // Journal of Materials in Civil Engineering. 2007. Vol. 19. Issue 12. Pp. 1033–1042. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:12(1033)
15. Kara I.F. Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete beams without stirrups based on genetic programming // Advances in Engineering Software. 2011. Vol. 42. Issue 6. Pp. 295–304. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.02.002
16. Mari A., Cladera A., Oller E., Bairán J. Shear design of FRP reinforced concrete beams without transverse reinforcement // Composites Part B: Engineering. 2014. Vol. 57. Pp. 228–241. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.10.005
17. Zhang T., Oehlers D.J., Visintin P. Shear strength of FRP RC beams and one-way slabs without stirrups // Journal of Composites for Construction. 2014. Vol. 18. Issue 5. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000469
18. Baghi H., Barros J.A.O., Kaszubska M., Kotynia R. Shear behavior of concrete beams reinforced exclusively with longitudinal glass fiber reinforced polymer bars: Analytical model // Structural Concrete. 2018. Vol. 19. Issue 1. Pp. 162–173. DOI: 10.1002/suco.201700175
19. Ali A.H., Mohamed H.M., Chalioris C.E., Deifalla A. Evaluating the shear design equations of FRP-reinforced concrete beams without shear reinforcement // Engineering Structures. 2021. Vol. 235. P. 112017. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.112017
20. Hoult N.A., Sherwood E. G., Bentz E.C., Collins M.P. Does the use of FRP reinforcement change the one-way shear behavior of reinforced concrete slabs? // Journal of Composites for Construction. 2008. Vol. 12. Issue 2. P. 125–133. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:2(125)

Поступила в редакцию 12 апреля 2022 г.

Принята в доработанном виде 15 декабря 2022 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2023 г.

О Б АВТОРАХ: **Виктор Владимирович Тур** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; profurvic@gmail.com;

Александр Петрович Воробей — кандидат технических наук, ассистент кафедры архитектуры; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; phdavarabei@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Varabei A., Tur V. Experimental studies of the resistance shear of self-stressed concrete beams under different loading conditions. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2021; (16):41-57. (rus.).
2. Cholostiakow S., Di Benedetti S.M., Guadagnini M., Kaszubska M., Szczech D., Kotynia R. *Shear database of RC FRP beams without shear reinforcement*. The University of Sheffield, Dataset. 2017.
3. Cosenza E., Manfredi G., Realfonzo R. Development length of FRP straight rebars. *Composites Part B: Engineering*. 2002; 33(7):493-504. DOI: 10.1016/S1359-8368(02)00051-3
4. Cavagnis F. *Shear in reinforced concrete without transverse reinforcement: from refined experimental measurements to mechanical models : thesis ... doctor of philosophy*. Structural concrete laboratory (IBETON), École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2017; 201. DOI: 10.5075/epfl-thesis-8216
5. Muttoni A., Fernández Ruiz M. Shear strength of members without transverse reinforcement as function of critical shear crack width. *ACI Structural Journal*. 2008; 105(2). DOI: 10.14359/19731
6. Fernández Ruiz M., Muttoni A., Sagaseta J. Shear strength of concrete members without transverse reinforcement: a mechanical approach to consistently account for size and strain effects. *Engineering Structures*. 2015; 99:360-372. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2015.05.007
7. Campana S., Fernández Ruiz M., Anastasi A., Muttoni A. Analysis of shear-transfer actions on one-way RC members based on measured cracking pattern and failure kinematics. *Magazine of Concrete Research*. 2013; 65(6):386-404. DOI: 10.1680/macr.12.00142
8. Cavagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A. An analysis of the shear-transfer actions in reinforced concrete members without transverse reinforcement based on refined experimental measurements. *Structural Concrete*. 2018; 19(1):49-64. DOI: 10.1002/suco.201700145
9. Cavagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results. *Engineering Structures*. 2015; 103:157-173. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.09.015
10. Muttoni A., Fernández Ruiz M. From experimental evidence to mechanical modeling and design expressions: The Critical Shear Crack Theory for shear design. *Structural Concrete*. 2019; 20(4):1464-1480. DOI: 10.1002/suco.201900193
11. Cavagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A. A mechanical model for failures in shear of members without transverse reinforcement based on development of a critical shear crack. *Engineering Structures*. 2018; 157:300-315. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.12.004
12. El-Sayed A.K., El-Salakawy E.F., Benmokrane B. Shear strength of concrete beams reinforced with FRP bars: design method. *SP-230: 7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. 2005. DOI: 10.14359/14875
13. Gao D., Zhang C. A Model for Shear Strength of FRP Bar Reinforced Concrete Beams without Stirrups. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020:1-9. DOI: 10.1155/2020/8881463
14. Nehdi M., El Chabib H., Aly Said A. Proposed shear design equations for FRP-reinforced concrete beams based on genetic algorithms approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007; 19(12):1033-1042. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:12(1033)
15. Kara I.F. Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete beams without stirrups based on genetic programming. *Advances in Engineering Software*. 2011; 42(6):295-304. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.02.002
16. Mari A., Cladera A., Oller E., Bairán J. Shear design of FRP reinforced concrete beams without transverse reinforcement. *Composites Part B: Engineering*. 2014; 57:228-241. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.10.005

17. Zhang T., Oehlers D.J., Visintin P. Shear strength of FRP RC beams and one-way slabs without stirrups. *Journal of Composites for Construction*. 2014; 18(5). DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000469

18. Baghi H., Barros J.A.O., Kaszubska M., Kotytnia R. Shear behavior of concrete beams reinforced exclusively with longitudinal glass fiber reinforced polymer bars: *Analytical model*. *Structural Concrete*. 2018; 19(1):162-173. DOI: 10.1002/suco.201700175

19. Ali A.H., Mohamed H.M., Chalioris C.E., Deifalla A. Evaluating the shear design equations of FRP-reinforced concrete beams without shear reinforcement. *Engineering Structures*. 2021; 235:112017. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.112017

20. Hout N.A., Sherwood E.G., Bentz E.C., Collins M.P. Does the use of FRP reinforcement change the one-way shear behavior of reinforced concrete slabs? *Journal of Composites for Construction*. 2008; 12(2):125-133. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:2(125)

Received April 12, 2022.

Adopted in revised form on December 15, 2022.

Approved for publication on February 6, 2023.

B I O N O T E S : **Victar V. Tur** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Concrete Technology and Construction Materials; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moscow st., Brest, 224017, Republic of Belarus; profurvic@gmail.com;

Aliaksandr P. Varabei — Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department of Architecture; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moscow st., Brest, 224017, Republic of Belarus; phdavvarabei@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors contributed equally to the writing of the article.

Conflict of the interests: the authors declare no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.241-253

Расчетное сопровождение реконструкции каркасов действующих металлургических цехов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Большое количество эксплуатирующихся сейчас в России промышленных сооружений металлургического профиля было возведено в период 1960–1980 гг. В настоящее время такие сооружения требуют масштабной реконструкции, включающей усовершенствование технологического процесса, замену оборудования на более производительное и экологичное, внедрение систем автоматизированного управления. Обновление производственного процесса влечет за собой изменение условий работы каркаса сооружения и действующих на него нагрузок, по сравнению с теми, на которые он запроектирован.

Материалы и методы. Для наиболее корректной оценки распределения усилий и перемещений в элементах каркаса и разработки мероприятий по его усилению целесообразно выполнять пространственный расчет каркаса с использованием конечно-элементного моделирования. При расчете необходимо учитывать требования действующих нормативных документов, которые во многом жестче, чем те требования, по которым каркас проектировался.

Результаты. Описан опыт практического расчета каркаса конвертерного отделения конвертерного цеха № 2 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», выполненного в рамках проекта реконструкции, включающего замену двух конвертеров с газоотводящими трактами и сооружение системы улавливания и очистки неорганизованной эмиссии. Представлены расчетная схема и нагрузки, действующие на каркас конвертерного цеха, результаты расчетов на основные сочетания нагрузок и прогрессирующее разрушение. С помощью расчетов установлено, что несущая способность части конструкций не обеспечена, в связи с чем разработано их усиление.

Выводы. Пространственный конечно-элементный расчет позволил на базе корректной оценки напряженно-деформированного состояния каркаса проанализировать несущую способность конструкций каркаса конвертерного цеха и разработать их эффективное усиление, отвечающее требованиям действующих норм. Одними из направлений дальнейших исследований представляются уточнения расчета, связанные с учетом фактической жесткости узлов сопряжения конструкций между собой, оценкой реально действующих нагрузок и учетом включения в работу ограждающих и прочих несущих конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: реконструкция, усиление, конечно-элементный расчет, конвертерный цех, промышленное здание, металлургическая промышленность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснина О.А. Расчетное сопровождение реконструкции каркасов действующих металлургических цехов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 241–253. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.241-253

Автор, ответственный за переписку: Ольга Александровна Туснина, tusninaOA@mgsu.ru.

Analysis of frames of operating metallurgical shops under reconstruction

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

ABSTRACT

Introduction. A large number of industrial metallurgical shops, currently in operation in Russia, were erected in 1960–1980. Nowadays, these facilities need large-scale reconstruction to improve the production procedure and to install new, high performance and environmentally friendly equipment and automated control systems. Higher capacity production requires a change in the frame behaviour and the loads acting on it, in comparison with the design ones. It should be noted that the remaining service life of the frame is coming to an end in the harsh environment of a metal factory, and therefore, it needs a major overhaul and reinforcement to ensure smooth operation under the action of new loads.

Materials and methods. To ensure the most accurate evaluation of forces and displacements in the frame elements and to design its reinforcement, it is advisable to perform a 3D analysis of the frame using the finite element method. This analysis must take into account current regulatory requirements, that are much tighter than those that were in effect when the frame was designed (for example, higher standard snow load, requirements ensuring protection from progressive collapse, higher values of some reliability factors, etc.).

Results. The author describes the practical analysis of the frame of converter shop No. 2 at Novolipetsk Iron and Steel Works (NLMK), which was part of a reconstruction project, that included replacement of two converters with gas exhaust ducts and construction of a fugitive emission treatment system. The calculation model was described; loads acting on the frame

of the converter shop were provided; principal combinations of loads and progressive collapse prevention actions were analyzed. The analysis confirmed that the bearing capacity of some structures was insufficient, and therefore, they were to be reinforced.

Conclusions. Proper analysis of the stress-strain state of the frame was made using the finite element method. The bearing capacity of the converter shop frame was analyzed, and its effective reinforcement was designed according to current standards. Further research will be focused on improving the analysis by contributing the actual stiffness of joints, evaluating actual loads and ensuring the combined action of enclosing and other non-bearing structures.

KEYWORDS: reconstruction, reinforcement, finite element analysis, converter shop, industrial building, metal industry

FOR CITATION: Tushina O.A. Analysis of frames of operating metallurgical shops under reconstruction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):241-253. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.241-253 (rus.).

Corresponding author: Olga A. Tushina, tushinaOA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрастает необходимость реконструкции действующих промышленных предприятий металлургической отрасли, введенных в эксплуатацию 40 и более лет назад, с целью обновления морально и физически устаревшего оборудования, усовершенствования технологического процесса, улучшения экологических показателей и повышения производительности [1, 2].

При проведении реконструкции металлургических цехов активно внедряются системы автоматизированного управления технологическими процессами газоотводящих трактов, которые позволяют обеспечивать производительность при соблюдении требуемых экологических показателей [3, 4].

Кроме такого обновления, возникает и потребность в ремонте, а часто и усилении существующих строительных конструкций каркаса металлургических цехов, эксплуатирующихся в тяжелых условиях, характеризующихся следующими факторами:

- большие динамические нагрузки от интенсивно работающих кранов грузоподъемностью до 400–450 т тяжелого и особо тяжелого режима работы;
- наличие различного динамического оборудования (конвейеры, транспортеры, весы-дозаторы, различные машины и механизмы, и т.д.);
- непосредственное воздействие огня на некоторые несущие конструкции (например, в конвертерных цехах при устаревшем оборудовании в процессе ускоренной заливки чугуна в конвертер часто наблюдается развитие пламени, поражающее подкраново-подстропильные фермы (ППФ));
- повышенная температура воздуха внутри цеха (по данным службы эксплуатации, внутренняя температура воздуха в складах слябов может достигать 100–120 °С);
- возможные аварийные нагрузки и воздействия (разлив расплавленного металла, взрывы котлового охладителей и трубопроводов, перекосы и заклинивания кранов, удары транспортируемым грузом по строительным конструкциям и проч. [5]);
- наличие агрессивных коррозионных сред (наблюдается в цехах холодного проката [6]).

Все эти факторы влекут за собой возникновение различных дефектов и повреждений несущих кон-

струкций, развитие коррозионного износа и со временем приводят к исчерпанию эксплуатационного ресурса каркаса. Помимо дефектов, появившихся при эксплуатации, на несущую способность каркаса негативно влияют неудачные конструктивные решения (увеличенные размеры температурных блоков, слабая связевая система, наличие расцентровок и эксцентриситетов и др.), принятые при проектировании, что иногда отмечается в ходе анализа архивной проектной документации и фактически на объекте [7].

При таких тяжелых условиях работы, а также учитывая большую длительность эксплуатации цехов, остаточный ресурс каркасов сегодня находится на грани исчерпания [8–10], в результате чего для предотвращения аварий требуется выполнение ремонта, а часто и усиления несущих конструкций.

Вследствие реализации проектов модернизации производственного процесса, реализуемого в цехе, изменяются нагрузки, действующие на каркас, и условия его эксплуатации. В связи с этим следует осуществлять поверочный расчет каркаса на новые нагрузки с учетом требований действующих нормативных документов, которые в ряде случаев оказываются жестче, чем те, в соответствии с которыми проектировалось сооружение. Можно привести основные изменения нормативной документации:

- увеличение снеговой нагрузки (например, для III снегового района нормативная снеговая нагрузка по сравнению с нормами 1962 и 1974 гг. увеличилась в 1,5 раза — от 100 до 150 кг/м²);
- необходимость учета повышенного значения коэффициента надежности по материалу $\gamma_m = 1,15$ для конструкций, возведенных до 1982 г.;
- увеличение некоторых коэффициентов надежности по нагрузке (например, для ветровой нагрузки коэффициент надежности в нормах 1962 и 1974 гг. составлял 1,2, в действующих ныне нормах он равен 1,4; для крановой нагрузки коэффициент надежности в нормах 1985 г. составлял 1,1, сейчас — 1,2).

Металлургические цеха, в которых выполняются работы, связанные с получением и транспортировкой расплава металлов, классифицируются как опасные производственные объекты и имеют повышенный уровень ответственности. В соответствии с действующими нормами для сооружений повышенного уровня ответственности необходимо учитывать

коэффициент надежности по ответственности не менее чем 1,1, а также обеспечивать устойчивость каркаса к прогрессирующему разрушению.

Описанные выше требования не учитывались при проектировании, в связи с чем даже при отсутствии дефектов и увеличении нагрузок существующие каркасы промышленных сооружений не всегда отвечают требованиям действующих норм и нуждаются в усилении.

Следует дополнительно отметить, что расчет каркасов при их проектировании в 1950–1980 гг. проводился, как правило, на основе плоских расчетных схем путем выделения из каркаса отдельных типовых поперечных рам. Учет пространственной работы каркаса и отпорного влияния соседних рам возможно было выполнить посредством применения специальных коэффициентов пространственной работы, учитывающих конструктивные решения каркаса, жесткость связевой системы, тип ограждающих конструкций покрытия и геометрические характеристики конструкций [11, 12].

Пространственная работа каркаса одноэтажного промышленного здания наиболее существенно проявляется при действии местных нагрузок, приложенных не ко всем поперечным рамам (таковой, например, является нагрузка от мостовых кранов или иного оборудования). Согласно руководству [13] при расчете рам с шагом колонн 6 м на два крана грузоподъемностью до 100 т включительно учет пространственной работы каркаса допускается не производить, а при кранах грузоподъемностью более 100 т необходимость пространственного расчета должна определяться в каждом конкретном случае.

Расчет отдельных плоских рам обычно дает результаты, которые идут в запас несущей способности, что позволяло игнорировать выполнение пространственного расчета при практическом проектировании. Такой подход являлся достаточно эффективным и давал возможность с достаточной надежностью запроектировать регулярный каркас одноэтажного промышленного сооружения с мостовыми кранами.

Однако для более сложных каркасов, неоднородных как в конструктивном отношении, так и по уровню и локализации действующих нагрузок, выполнение плоского расчета отдельных рам не позволяет точно оценить действительную работу конструкций. Пространственная работа такого сложного каркаса оказывается более комплексной, и ее игнорирование может повлечь за собой недооценку усилий и напряжений в некоторых конструкциях. Примером может служить каркас конвертерного цеха, отличающийся следующими особенностями:

- наличие одноэтажных и многоэтажных участков в составе одного температурного блока;
- большие размеры (ширина поперечной рамы в осях составляет 132 м, высота достигает 83 м);
- неравномерное распределение жесткости несущих конструкций в каркасе: на отдельных участках

достаточно регулярно располагаются рядовые несущие конструкции, а на других — мощные конструкции, обладающие большой жесткостью (например, ППФ, бункерные балки, насыщенные связями встроенные в каркас этажерки сыпучих материалов и прочие подобные конструкции);

- существенно неоднородное действие нагрузок на каркас: наличие зон, насыщенных технологическим оборудованием (газоочистки, площадки котлоохладителей, этажерка сыпучих, заливочный пролет), и не столь интенсивно нагруженных иных участков (шихтарники, ковшевые пролеты).

В таких каркасах распределение усилий происходит более неравномерно по сравнению с регулярными одноэтажными каркасами из-за активного включения в пространственную работу подкраново-подстропильных ферм, поперечных и продольных связей и других конструкций, обладающих большой жесткостью и концентрирующих усилия на себя. Вместе с тем большие локальные нагрузки от оборудования, действующие на каркас крайне неравномерно, усложняют его пространственную работу, что нельзя игнорировать при расчете.

Применение описанного выше подхода по учету пространственной работы для такого каркаса не представлялось возможным, в силу отсутствия сведений о коэффициентах пространственной работы при одновременном действии разнородных локальных нагрузок на различных участках каркаса, а также ввиду его конструктивной неравномерности.

В связи с этим на практике расчет каркасов конвертерных цехов выполнялся путем рассмотрения отдельных плоских поперечных рам. Помимо заметного в данном случае отличия работы плоской рамы и рамы в составе каркаса, применение плоских расчетных схем не позволяло проанализировать действительное напряженно-деформированное состояние (НДС) подкраново-подстропильных ферм с учетом их включения в пространственную работу каркаса, которое, учитывая существенную жесткость фермы и локализацию в ее зоне больших нагрузок, оказывается весьма значимым.

Таким образом, для обеспечения высокой надежности при проектировании каркасов конвертерных цехов закладывались большие запасы и специальные конструктивные мероприятия, способствующие наиболее эффективной и безопасной работе конструкций. Однако подобные решения принимались исходя из опыта проектирования и с учетом результатов приближенных расчетов плоских рам, а не на основе точного анализа распределения усилий и перемещений в конструкциях каркаса.

Для наиболее корректной оценки несущей способности и определения НДС каркаса и всех его конструктивных элементов необходимо проведение пространственного расчета. В настоящее время с учетом развития численных методов расчета целесообразным представляется пространственный

расчет с использованием конечно-элементного моделирования [14–16].

В статье описан опыт практического расчета каркаса конвертерного отделения конвертерного цеха № 2 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (далее — НЛМК), выполненного при участии в реализации проекта реконструкции конвертерного цеха № 2 НЛМК: комплекс работ по замене конвертеров № 2, 3 с газоотводящим трактом и сооружением системы улавливания и очистки неорганизованной эмиссии. Генеральным проектировщиком являлся НЛМК-Инжиниринг.

В рамках реконструкции произведена замена двух конвертеров на современные агрегаты емкостью 330 т, для каждого из которых заменены газоотводящие тракты и установлено новое пылегазоулавливающее оборудование с двухступенчатой технологией мокрой газоочистки. По результатам проведенной модернизации производительность цеха увеличилась на 15 % (до 10 млн т стали в год) с одновременным снижением воздействия на окружающую среду — более эффективная система газоочистки обеспечила улавливание 99,9 % пыли, что соответствует лучшим мировым практикам и подтверждено гарантийными испытаниями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Здание конвертерного отделения конвертерного цеха № 2 ПАО «НЛМК» введено в строй в 1974 г. Автором исходного проекта в части металлических несущих конструкций каркаса являлся Центральный научно-исследовательский и проектный институт строительных металлоконструкций имени Н.П. Мельникова (ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова). Конвертерный цех — опасный производственный объект (класс сооружения КС-3, уровень ответственности — повышенный).

Конвертерное отделение имеет сложную форму в плане с размерами 340×132 м, является многопролетным и разнородным по высоте: от 30 м — одноэтажные ковшевой и скраповые пролеты, до 83 м — этажерка мокрой газоочистки и котла охладителя.

В конвертерном цехе эксплуатируются три конвертера, которые располагаются по одному из средних рядов колонн — ряду Г. Для возможности размещения конвертеров предусмотрены ППФ пролетом 36 м с нижним ездовым поясом на отм. +30,000 под пути заливочных кранов грузоподъемностью 400 т особо тяжелого режима работы 8К.

В рамках проведения работы по расчету каркаса на основе архивной проектной документации конструкций металлических (КМ) и конструкций металлических детализированных (КМД), а также данных обследования была разработана пространственная расчетная конечно-элементная модель стального каркаса конвертерного отделения конвертерного цеха № 2 НЛМК, включающая все основные несущие конструкции (рис. 1). Расчетная модель выполнена

с использованием программного комплекса SCAD Office 21.1.

Основные несущие конструкции цеха моделировались стержневыми конечными элементами (КЭ). Сдвиговой диск покрытия из металлических щитов, приваренных к стропильным фермам в четырех углах, учитывался со своей фактической жесткостью с использованием метода шарнирно-стержневой аппроксимации [17]. Аналогично учтены и сдвиговые диски перекрытий рабочих площадок, выполненные из стального настила либо железобетонной монолитной плиты.

Существенное влияние на работу каркаса оказывает наличие в его составе по средним рядам ППФ. Фермы имеют развитое в двух направлениях коробчатое сечение нижнего пояса, габаритами ширина $2000 \times$ высота 2880 мм, обладающее большой жесткостью, в том числе на кручение, решетка выполнена из сварных двутавров, высотой 1000 мм, ориентированных стенкой из плоскости фермы. Подкраново-подстропильная ферма обладает значительной изгибной жесткостью из плоскости и активно вовлекается в пространственную работу каркаса. Для моделирования нижнего пояса ППФ использовались плоские КЭ оболочки [18].

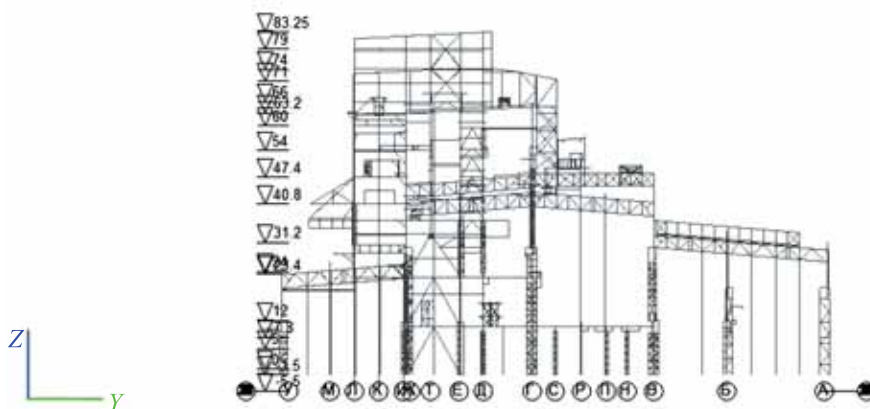
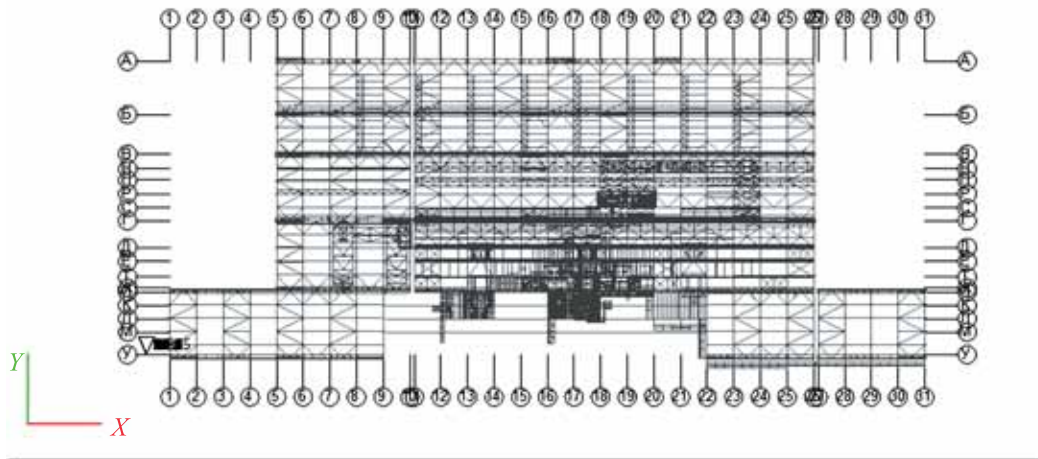
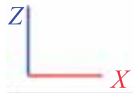
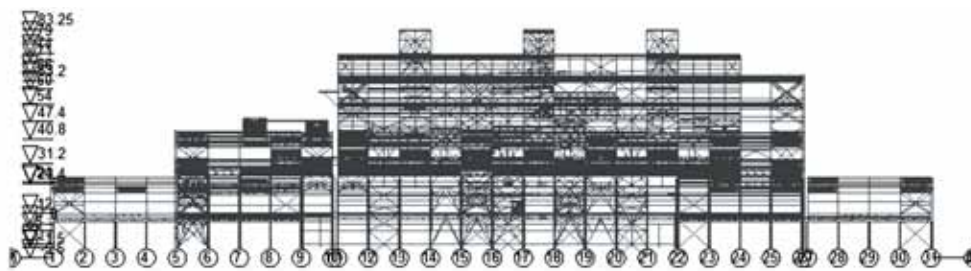
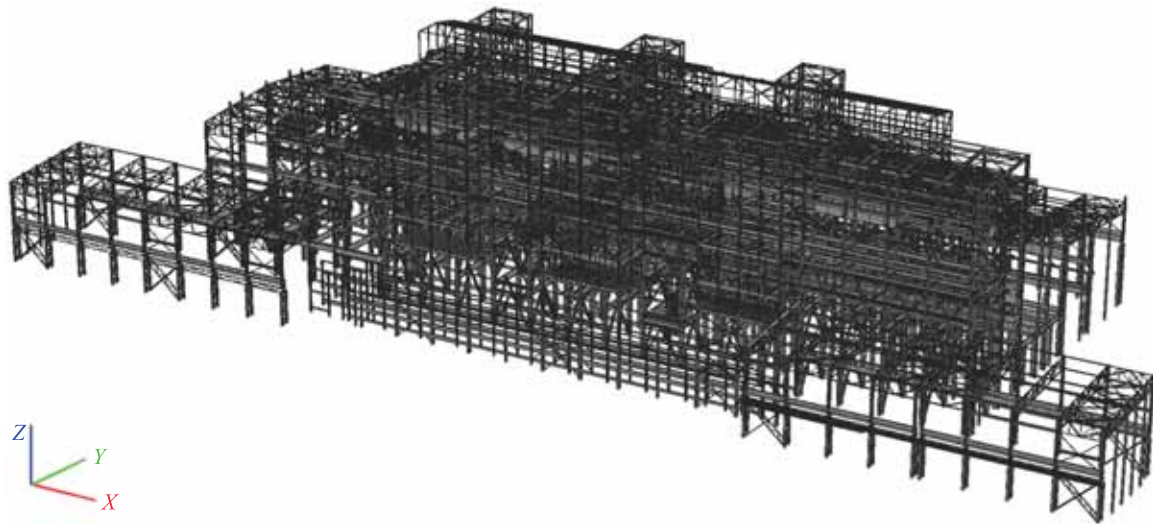
На рис. 2 показан фрагмент расчетной модели в зоне опирания ППФ на основные колонны каркаса.

Из-за внушительных размеров конвертерного отделения и насыщенности его конструкциями составленная расчетная модель обладает большой размерностью (около $141\,000$ КЭ и $102\,000$ узлов, 3542 типа жесткостей).

Разработанная пространственная модель конвертерного отделения использовалась проектировщиками НЛМК-Инжиниринг как основа при формировании совокупной информационной 3D-модели конвертерного цеха, включающей строительные конструкции, технологическое оборудование, трубопроводы, газоходы и т.д.

Применение такого комплексного BIM-подхода позволило снизить сроки проектирования и монтажа конструкций, выявить и устранить пространственные коллизии строительных конструкций и технологического оборудования. Составленная информационная модель является уникальной для подобного размера и сложности производственных сооружений.

На каркас конвертерного отделения действует немалое количество технологических нагрузок от различных машин и механизмов (мостовые краны, сцепки чугуновозов на рабочей площадке на отм. +11,500, машины подачи кислорода, машина футеровки конвертера, тележка отбора проб, тележка подачи ферросплавов и т.д.), оборудования мокрой газоочистки и котла-охладителя, трубопроводов, газоходов, конвейеров, бункеров и т.д. Некоторые из нагрузок являются знакопеременными и динамическими. Одни из наиболее влияющих на НДС каркаса — нагрузки от мостовых кранов.



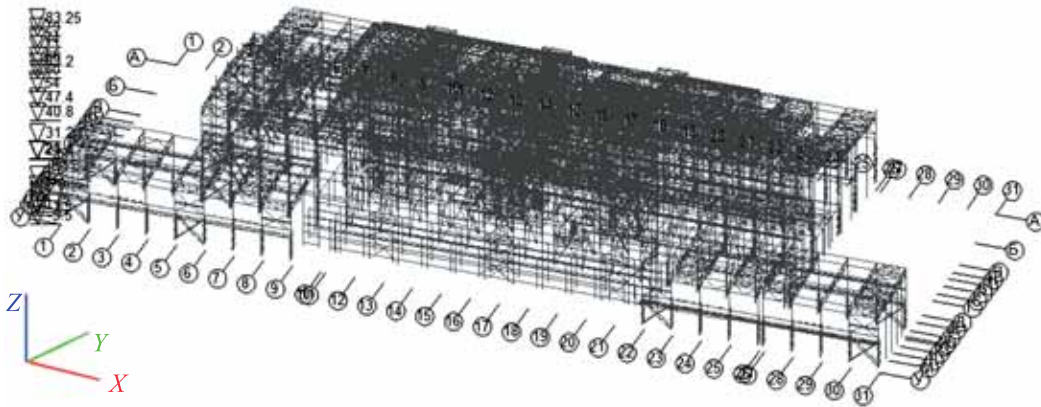


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы конвертерного отделения конвертерного цеха № 2

Fig. 1. General layout of the frame structure of converter shop No. 2

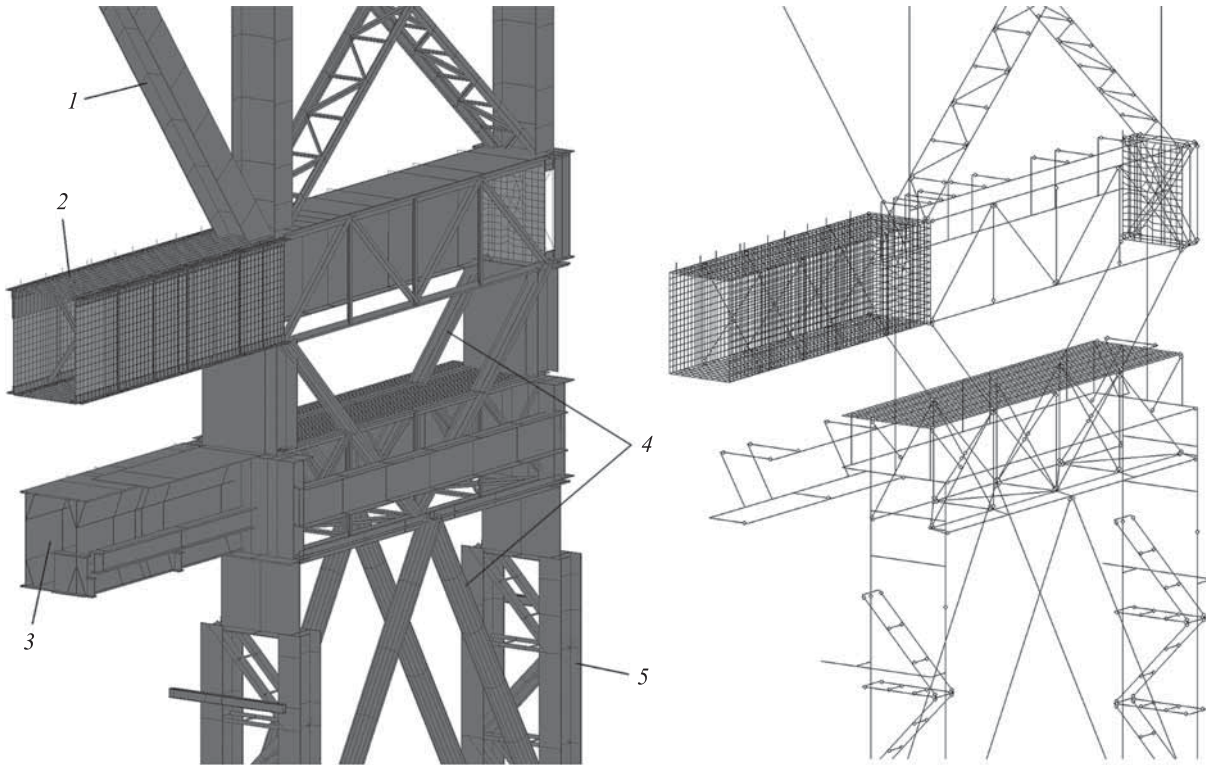


Рис. 2. Фрагмент расчетной модели в зоне опирания подкраново-подстропильных ферм на колонны каркаса: 1 — опорный раскос ППФ; 2 — нижний пояс ППФ; 3 — подкрановая балка завалочного крана; 4 — вертикальные связи; 5 — двухветвевая колонна каркаса

Fig. 2. Extract from the finite element model showing crane secondary trusses supported by the frame columns: 1 — support brace of the crane secondary truss; 2 — lower chord of the crane secondary truss; 3 — crane beam of charging crane; 4 — vertical braces; 5 — double frame column

В ковшевом (А-В) и шлаковом (Б-В) пролетах работают краны режима 7К грузоподъемностью 125 т. В загрузочном (В-Г) пролете работают заливочные краны режима 8К грузоподъемностью 400 т, а также полупортальные машины для завалки скрапа в конвертер грузоподъемностью 130 + 130 т режима рабо-

ты 8К. В конвертерном (Г-Д) пролете функционируют фурменные краны грузоподъемностью 80 и 100 т режима 5К. В скраповых пролетах (Ж-У) действуют краны грузоподъемностью 130 т режима работы 7К. Схема кранового оборудования конвертерного отделения конвертерного цеха № 2 приведена на рис. 3.

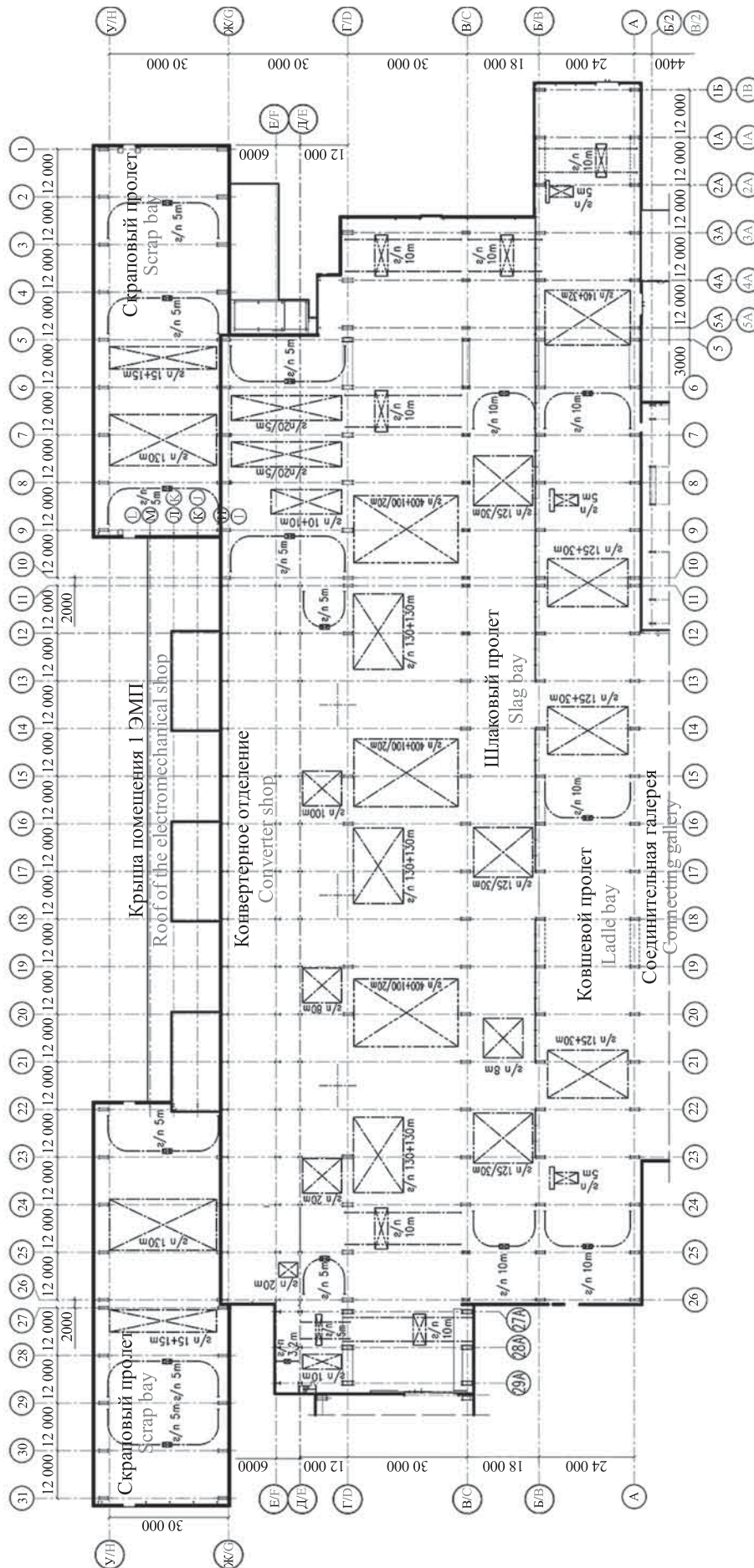


Рис. 3. Схема кранового оборудования конвертерного цеха № 2

Fig. 3. Crane equipment layout in converter shop No. 2

Учитывая значительное количество кранов (более четырех) тяжелого и особо тяжелого режимов работы, которые по условиям технологии производства могут находиться с грузами на одной поперечной раме, наличие кранов на разных отметках в одном пролете, были определены наиболее опасные для каркаса и соответствующие реальным условиям эксплуатации схемы действия крановых нагрузок на каркас.

С использованием технологических заданий на новое оборудование и архивных данных о действующем оборудовании выполнены сбор и анализ нагрузок, действующих на каркас конвертерного отделения. На основе анализа составлено необходимое количество загрузений (150 шт.), достаточное для наиболее полного учета всех возможных ситуаций, возникающих при эксплуатации, ремонте и замене оборудования конвертерного цеха, таким образом, чтобы обеспечить несущую способность каркаса цеха на всех этапах его реконструкции и эксплуатации.

Формирование расчетных сочетаний загрузений осуществлялось на базе действующих нормативных документов (СП 20.13330 «Нагрузки и воздействия») с учетом сведений службы эксплуатации цеха о возможности и вероятности совместной работы оборудования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам выполненного расчета на основные сочетания нагрузок установлено, что несущая способность ряда ключевых несущих конструкций каркаса не обеспечена (рис. 4).

Некоторые из следующих конструктивных элементов каркаса на отдельных участках перегружены:

- колонны (около 10 % основных колонн каркаса) — перенапряжение до 20 % по прочности и до 40 % по устойчивости;
- вертикальные связи по колоннам перегружены по критерию устойчивости до 2-х раз;
- горизонтальные и вертикальные связи по фермам перегружены по критерию устойчивости в 2,5 раза;
- раскосы и пояса стропильных ферм перегружены по устойчивости до 40 %;
- балки рабочих площадок (около 10–15 % балок во всем каркасе) перенапряжены по прочности до 20 %;
- подкраново-подстропильные фермы с учетом износа и усталостных повреждений перенапряжены до 1,5 раз.

Таким образом, получено, что из всего каркаса (общая металлоемкость основных несущих конструкций составляет около 13 600 т) не обеспечена несущая способность 1466 т конструкций — порядка 11 % всех конструкций перенапряжены.

Выявленная с помощью расчета недостаточная несущая способность конструкций объясняется изменением и перераспределением действующих на-

грузок, связанным с реконструкцией, изменением нормативных документов в части увеличения некоторых нагрузок и коэффициентов, а также особенностями конечно-элементного пространственного расчета, который позволил учесть включение в совместную работу всех конструкций каркаса при различных сочетаниях нагрузок. Так, например, по результатам проведенного расчета получено, что горизонтальные поперечные крестовые связи по покрытию, расположенные в торцах температурных блоков, призванные работать только на восприятие горизонтальных воздействий, включаются в работу также и на вертикальные нагрузки, действующие на покрытие (снеговая, постоянная и проч.), в результате чего в связях возникает сжатие [19]. Это сжатие может превосходить растяжение от действия горизонтальных нагрузок, и в таком случае обе диагонали связей в ячейке могут одновременно потерять устойчивость, что не соответствует принимаемому при проектировании допущению для крестовых связей, когда одна из диагоналей работает на растяжение. Крепление связей на обычных болтах нормальной точности обладает определенной податливостью за счет зазоров в отверстиях, в результате чего включение связей в работу на вертикальные нагрузки будет менее явным. Однако для зданий с кранами большой грузоподъемности и тяжелого режима работы крепление горизонтальных связей по нижним поясам ферм должно выполняться на монтажной сварке либо высокопрочных болтах с контролируемым натяжением, что указано в типовых сериях конструкций покрытий и справочниках проектировщиков [20]. Такое соединение является сдвигоустойчивым и малодеформативным, и связи полноценно включаются в работу на все нагрузки, теряют устойчивость, и тем самым формируется существенное отличие работы каркаса от расчетных предпосылок, принимаемых при его проектировании.

Тем не менее на практике полученное в результате выполненного пространственного расчета перенапряжение части конструкций не привело к разрушению каркаса и не нарушило его нормальную эксплуатацию. Это может быть обусловлено следующими причинами:

1. Конструктивные решения каркаса, насыщенность его связями и прочими конструкциями обеспечивают эффективное перераспределение усилий, которое происходит при выключении из работы какого-либо элемента, к примеру из-за его потери устойчивости. Необходимо отметить хорошее совпадение данных обследования с результатами расчета — например, диагонали крестовых связей, устойчивость которых по расчету не обеспечена, по факту также имеют искривленную форму, характерную для потери устойчивости (рис. 5).

2. Стальные конструкции из сталей с физическим пределом текучести обладают резервами в части возможной работы с учетом развития пластики.

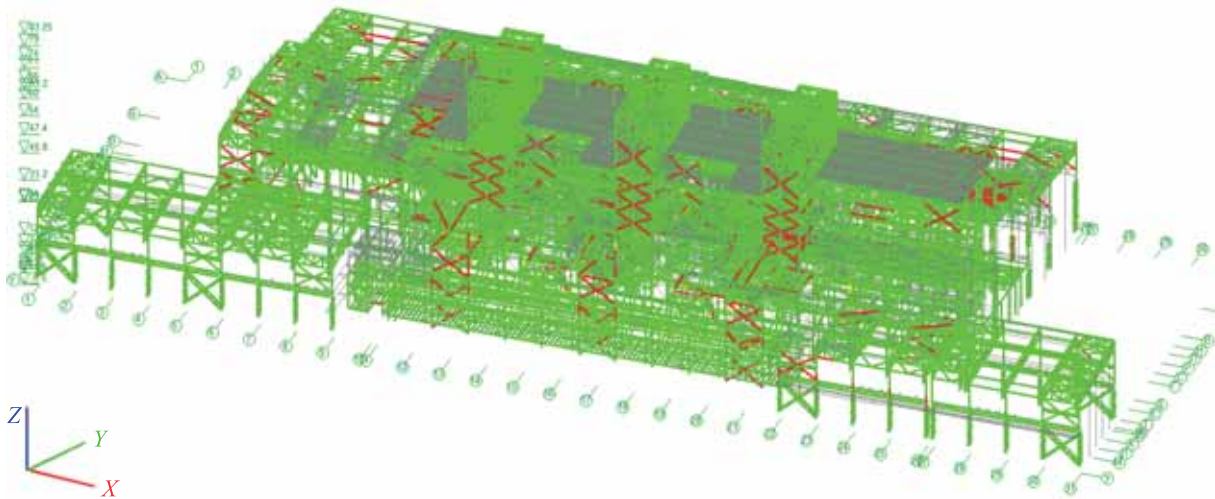
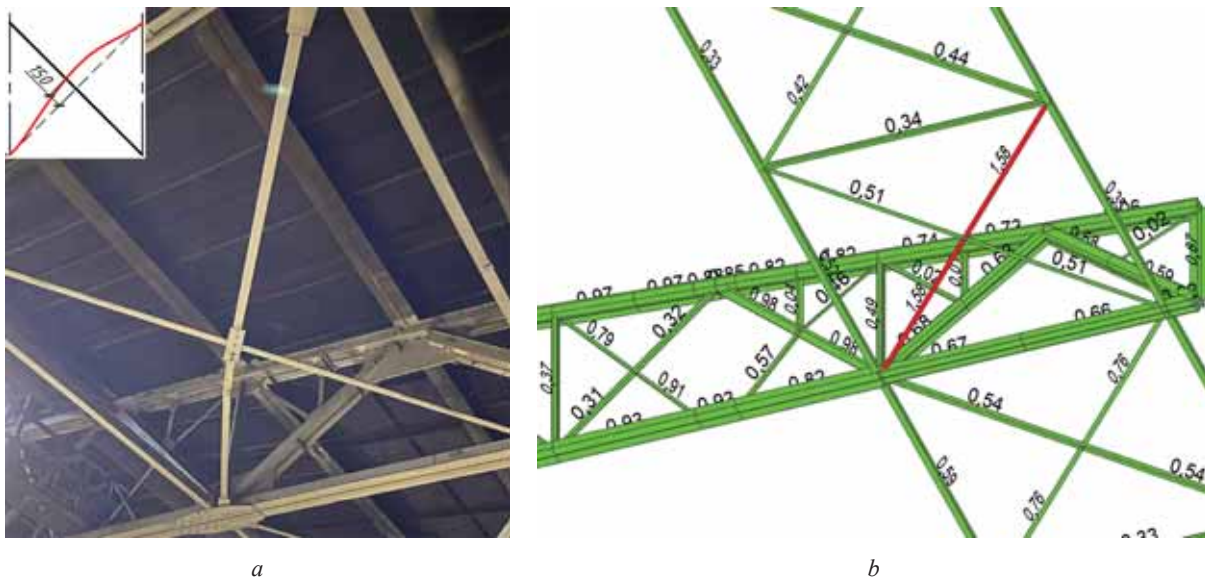


Рис. 4. Результаты расчета существующих конструкций каркаса конвертерного цеха № 2 на действующие и проектные нагрузки

Fig. 4. Results of analysis of actual and design loading of frame structures of converter shop No. 2



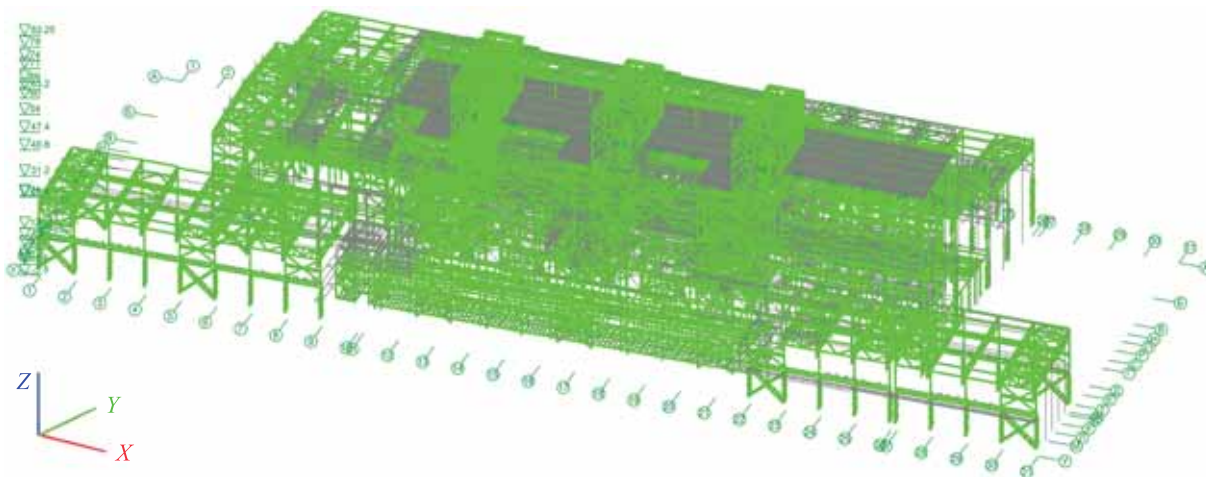


Рис. 6. Результаты расчета усиленного каркаса конвертерного цеха № 2 на действующие и проектные нагрузки, в том числе на прогрессирующее разрушение

Fig. 6. Results of analysis of the reinforced frame of converter shop No. 2, taking account of existing and design loads, including progressive collapse

Реконструкция проводилась в условиях действующего в цеху производства, когда остановке подвергался только один реконструируемый конвертер. В связи с этим, кроме расчетов на основные эксплуатационные нагрузки, выполнялись расчеты на различные монтажные ситуации, которые возникали при реконструкции, с учетом фактически действующих нагрузок. При этом непосредственно сами несущие конструкции каркаса и работающее в нем оборудование использовались при строительно-монтажных работах в процессе реконструкции. Так, например, монтаж конвертера осуществлялся с помощью двух мостовых заливочных цеховых кранов, которые перемещались по еще не целиком замененному нижнему поясу ППФ, находящейся в процессе усиления. Проведенные расчеты подтвердили возможность монтажа, и он был успешно выполнен.

Разработанная проектная документация по усилению каркаса получила положительное заключение Главгосэкспертизы. Реконструкция, включая усиление каркаса, успешно реализована в полном объеме в период с 2019 по 2021 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Большие, заложенные при проектировании и основанные на инженерном опыте запасы, грамотные конструктивные решения, хорошее качество изготовления и монтажа конструкций обеспечили фактическую надежность стального каркаса конвертерного цеха № 2 ПАО «НЛМК», что подтвердил опыт его длительной безаварийной эксплуатации. Рассмотренный каркас обладает высокой живучестью: как показали результаты расчетов на прогрессирующее разрушение, при всех исследуемых аварийных ситуациях, связанных с разрушением одного из несущих элементов каркаса (различные элементы колонн,

ферм, связей), не потребовалось выполнение каких-либо дополнительных конструктивных мероприятий для обеспечения устойчивости каркаса к прогрессирующему разрушению.

Однако по результатам пространственного расчета, проведенного с использованием метода конечных элементов с учетом действующих норм, получено, что несущая способность не всех существующих конструкций обеспечена, поэтому потребовалась разработка усиления перегруженных элементов каркаса. Результаты расчета хорошо совпали с данными обследования: зачастую дефекты и повреждения при обследовании отмечались именно на тех конструкциях, несущая способность которых по результатам расчета не обеспечена.

Таким образом, выполненный пространственный расчет стального каркаса конвертерного цеха позволил:

- учесть действительную совместную работу всех несущих конструкций каркаса и получить достаточно корректную для оценки ресурса конструкций картину распределения усилий и перемещений в элементах каркаса при действии различных сочетаний нагрузок;
- проверить несущую способность существующих конструкций каркаса на действующие и новые нагрузки после реконструкции с учетом требований актуальных нормативных документов;
- определить наиболее нагруженные конструкции и проблемные зоны каркаса, требующие усиления;
- разработать эффективное усиление каркаса и проверить его достаточность и соответствие действующим нормативным документам;
- провести необходимые дополнительные расчеты на различные монтажные ситуации, возникающие при реконструкции, принимаемые по заданию

заказчиков и строительно-монтажной организации, с учетом фактически действующих нагрузок при реализации реконструкции в условиях действующего в цеху производственного процесса;

- проверить устойчивость каркаса к прогрессирующему разрушению при возникновении различных аварийных ситуаций, связанных с начальным локальным разрушением элементов несущих конструкций.

Все допущения и упрощения при расчете принимались в запас несущей способности, в связи с этим выполненный расчет дает возможность гарантировать высокую обеспеченность результатов, требуемую надежность и безопасность принятых при усилении конструктивных решений.

Тем не менее усиление некоторых конструктивных элементов на практике оказывается тяжело реализуемым, а иногда и невозможным из-за труднодоступности конструкций или особенностей их эксплуатации в действующем производственном процессе. За счет выполнения более точного расчета и выявления всех резервов несущей способности конструкций можно добиться уменьшения объема

работ по усилению или разработать компенсирующие мероприятия для разгрузки перенапряженных конструкций. Важно правильно моделировать поведение несущей системы с учетом:

- фактической податливости узловых соединений (например, болтовых соединений на срезных болтах);
- эмпирического уточнения действующих на эти конструкции нагрузок;
- включения в работу ограждающих или внутренних ненесущих конструкций в этой зоне.

Следует отметить, что каркас и производственный процесс претерпевают постоянные изменения, в связи с чем расчетное сопровождение необходимо продолжать и после завершения реконструкции при дальнейшей эксплуатации цеха. При этом все изменения, происходящие с производственным зданием, должны учитываться и в расчетной, и в информационной модели сооружения. Уточнение расчетной схемы и учет дополнительных названных выше и иных факторов являются актуальным направлением дальнейших исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гладских В.И., Дробный О.Ф., Ласьков С.А., Черчинцев В.Д. Совершенствование систем промышленной и экологической безопасности ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» как обязательное условие его устойчивого развития // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 107–111.
2. Полторацкий Л.М., Барнаев И.А. Состояние и перспективы развития инновационного потенциала в металлургической отрасли России (Западно-Сибирский металлургический комбинат, Россия) // Металлургия-Интехэко-2008 : сб. докл. Междунар. конф. 2008. С. 51–53.
3. Кривоносов А.И. Автоматизированные системы управления технологическими процессами газоотводящих трактов конвертеров // XV Междунар. конгресс сталеплавильщиков : сб. тр. 2018. С. 512–518.
4. Сталинский Д.В., Пирогов А.Ю., Рыжавский А.З., Кривоносов А.И., Криволапов А.Е., Каплунов Ю.В. Обеспечение заданных экологических и энергетических показателей работы газоотводящих трактов конвертеров путем создания современных систем АСУ ТП // Экология и промышленность. 2009. № 3. С. 20–24.
5. Жужуев Р.А., Дорфман Н.Н. Выявление возможных аварийных ситуаций при производстве стали, их классификация и систематизация // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2017. Т. 1. С. 1025–1030.
6. Колобанов А.С., Тарасова Н.В., Сабитов Л.С. Возможности повышения коррозионной стойкости строительных конструкций, работающих в условиях агрессивных производственных сред // Строительство и архитектура. 2020. Т. 8. № 3 (28). С. 29–25. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-3-29-35
7. Пермяков М.Б., Мышинский М.И., Степочкин В.М., Гибадуллин Р.Ф., Сагитдинов Р.А. Повреждаемость и причины аварий в металлургической промышленности // Современные инновации. 2016. № 3 (5). С. 17–20.
8. Байбурун Д.А., Тупицына Д.С. Частотность дефектов и повреждений промышленных зданий // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2022. Т. 22. № 1. С. 23–32. DOI: 10.14529/build220103
9. Золина Т.В. Оценка остаточного ресурса промышленного здания с мостовыми кранами в процессе его эксплуатации // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. № 3 (29). С. 6–16.
10. Zolina T.V., Sadchikov P.N. Residual resource of a one-storey steel frame industrial building constructed with bridge cranes // Magazine of Civil Engineering. 2018. Vol. 84. Issue 8. Pp. 150-161. DOI: 10.18720/MCE.84.15
11. Беленя Е.И. Действительная работа и расчет поперечных рам стальных каркасов одноэтажных

производственных зданий : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1959. 26 с.

12. *Беленя Е.И.* Исследования действительной работы стальных каркасов производственных зданий — исходная база при реконструкции промзданий // *Промышленное строительство*. 1982. № 2. С. 12–14.

13. *Стрелецкий Н.С.* Стальные конструкции покрытий одноэтажных промышленных зданий. М. : Госстройиздат, 1952. 383 с.

14. *Cacho-Perez M.* Design and analysis of an industrial steel building. Limit states, stability check // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 153. Pp. 342–353. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.10.025

15. *Jayasidhan A.K., Joy A.* Analysis and design of a industrial building // *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*. 2015. Vol. V4. Issue 03. DOI: 10.17577/ijertv4is030444

16. *Patel A., Bajaj R.* Structural analysis and design of an industrial building // *International Journal for Scientific Research and Development (IJSRD)*. 2017. Vol. 5. Issue 04. Pp. 1543–1545.

17. *Tusnina O.* Shear stiffness of the steel roof panels // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Pp. 639–647. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_60

18. *Tusnina O.* Finite element analysis of crane secondary truss // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. Vol. 77. Issue 1. Pp. 68–89. DOI: 10.18720/MCE.77.7

19. *Туснина О.А.* Работа связей в покрытии промышленного здания со стальным каркасом // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 1. С. 37–42.

20. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Металлические конструкции промышленных зданий и сооружений / под ред. Н.П. Мельникова. М. : Госстройиздат, 1962. 618 с.

21. *Туснина О.А., Павлов С.А.* Оценка устойчивости к прогрессирующему обрушению каркаса конвертерного цеха // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 6 (77). С. 114–122. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-5-114-122

Поступила в редакцию 23 декабря 2022 г.

Принята в доработанном виде 30 декабря 2022 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Ольга Александровна Туснина** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26; РИНЦ ID: 7465-2846, Scopus: 55975424400, ResearcherID: U-7848-2018, ORCID: 0000-0002-5595-2784; tusninaOA@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Gladskikh V.I., Drobny O.F., Las'kov S.A., Cherkintsev V.D. Modernization of industrial and ecological safety systems at OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works as an obligatory condition for sustainable development. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2014; 1:107-111. (rus.).

2. Poltorackij L.M., Barnaev I.A. Status and prospects for the development of innovative potential in the metallurgical industry of Russia (West Siberian Iron and Steel Works, Russia). *Metallurgy-Intecheco-2008: Proceedings of the International Conference*. 2008; 51-53. (rus.).

3. Krivonosov A.I. Automated control systems for technological processes of gas exhaust tracts of converters. *XV International Congress of Steelmakers*. 2018; 512-518. (rus.).

4. Stalinskij D.V., Pirogov A.Ju., Ryzhavsikij A.Z., Krivonosov A.I., Krivolapov A.E., Kaplunov Ju.V. Ensuring the specified environmental and energy performance indicators of the operation of the gas exhaust paths of converters by creating modern automated process control systems. *Ecology and Industry*. 2009; 3:20-24. (rus.).

5. Zhuzhuev R.A., Dorfman N.N. Identification of possible emergency situations in the production of steel, their classification and systematization. *Problems of ensuring safety during liquidation of consequences of emergency situations*. 2017; 1:1025-1030. (rus.).

6. Kolobanov A.S., Tarasova N.V., Sabitov L.S. Possibilities of increasing the corrosion resistance of building structures operating in aggressive industrial environments. *Construction and Architecture*. 2020; 8(3):(28):29-25. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-3-29-35 (rus.).

7. Permjakov M.B., Myshinskij M.I., Stepochkin V.M., Gibadullin R.F., Sagitdinov R.A. Damage and causes of accidents in the metallurgical industry. *Modern Innovations*. 2016; 3(5):17-20. (rus.).

8. Baiburin D.A., Tupitsyna D.S. Frequency of Defects and Damage of Industrial Buildings. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2022; 22(1):23-32. DOI: 10.14529/build220103 (rus.).

9. Zolina T.V. Assessment of the residual resource of the industrial building with bridge cranes in the process

of its operation. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2019; 3(29):6-16. (rus.).

10. Zolina T.V., Sadchikov P.N. Residual resource of a one-storey steel frame industrial building constructed with bridge cranes. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 84(8):150-161. DOI: 10.18720/MCE.84.15

11. Belenja E.I. *Actual work and calculation of the transverse frames of steel frames of one-storey industrial buildings : abstract of the thesis. diss ... dr. tech. sciences*. Moscow, 1959; 26. (rus.).

12. Belenja E.I. Studies of the actual work of steel frames of industrial buildings initial base for the reconstruction of industrial buildings. *Industrial Engineering*. 1982; 2:12-14. (rus.).

13. Streleckij N.S. *Steel structure of one-storey industrial buildings roofing*. Moscow, Gosstroyizdat, 1952; 383. (rus.).

14. Cacho-Perez M. Design and analysis of an industrial steel building. Limit states, stability check. *Engineering Structures*. 2017; 153:342-353. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.10.025

15. Jayasidhan A.K., Joy A. Analysis and design of a industrial building. *International Journal of Engine-*

ering Research and Technology (IJERT). 2015; V4(03). DOI: 10.17577/ijertv4is030444

16. Patel A., Bajaj R. Structural analysis and design of an industrial building. *International Journal for Scientific Research and Development (IJSRD)*. 2017; 5(04):1543-1545.

17. Tushina O. Shear stiffness of the steel roof panels. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 639-647. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_60

18. Tushina O. Finite element analysis of crane secondary truss. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 77(1):68-89. DOI: 10.18720/MCE.77.7

19. Tushina O.A. Operation of bracing system in the roof of industrial building with steel frame. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 1:37-42. (rus.).

20. *Handbook for the designer of industrial, residential and public buildings and structures. Metal structures of industrial buildings and structures* / ed. N.P. Melnikov. Moscow, Gosstroyizdat, 1962; 618. (rus.).

21. Tushina O.A., Pavlov S.A. Evaluation of resistance to the progressive collapse of the converter shop frame. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 6(77):114-122. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-5-114-122 (rus.).

Received December 23, 2022.

Adopted in revised form on December 30, 2022.

Approved for publication on February 6, 2023.

BIONOTES: **Olga A. Tushina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal and Timber Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 7465-2846, Scopus: 55975424400, ResearcherID: U-7848-2018, ORCID: 0000-0002-5595-2784; tushinaOA@mgsu.ru.

Использование фосфогипса в сфере дорожного строительства: потенциал и проблемы

Анастасия Вадимовна Довыденко, Александр Александрович Лунёв

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ); г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В России остро стоит проблема с накоплением фосфогипса (ФГ) — отхода производства минеральных удобрений, которого в отвалах складировано порядка 300 млн т. Занимаемые этими отвалами площади более рационально применять в иных целях. Решением данной проблемы может быть многотоннажное использование ФГ в области строительства автомобильных дорог, что потенциально позволит снизить дефицит дорожно-строительных материалов в России.

Материалы и методы. Выполнены обзор исследований, посвященных возможности использования ФГ, и анализ литературных источников за последние 45 лет. Представлены выводы о перспективах использования ФГ.

Результаты. Установлено, что использование ФГ в строительстве не только возможно, но и подтверждено опытом. Полученные данные говорят о возможности многотоннажной утилизации ФГ при рекультивации карьеров, засыпки полигонов ТБО, а также применении для устройства земляного полотна автомобильных дорог в стабилизированном виде и в комбинации с неорганическим вяжущим для строительства укрепленных оснований дорожных одежд. Имеется ряд сдерживающих факторов применения этого материала, таких как радиоактивность, содержание примесей и высокая растворимость, которая ведет к низкой водостойкости материалов на его основе.

Выводы. Требуется совершенствование рецептур вяжущих на основе ФГ (в основном для повышения водо- и морозостойкости) с целью их использования в дорожно-климатических зонах с наиболее суровыми климатическими условиями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автомобильные дороги, стабилизация земляного полотна, стабилизация грунтов, фосфогипс

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Довыденко А.В., Лунёв А.А. Использование фосфогипса в сфере дорожного строительства: потенциал и проблемы // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 254–269. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.254-269

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Вадимовна Довыденко, anastasiacircus@yandex.ru.

Using phosphogypsum in roadbuilding: the potential and problems

Anastasiya V. Dovydenko, Aleksandr A. Lunev

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI); Omsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This article discusses the global environmental problem of phosphogypsum and its storage. Phosphogypsum is waste generated in the course of making mineral fertilizers. In Russia, the amount of this material in waste piles is about 300 million tons. It is more rational to use large areas, occupied by these dumps, for other purposes. The solution is its largescale use in highway construction, that will solve the problem of shortage of roadbuilding construction materials in Russia.

Materials and methods. Our task was to analyze the current research into the applicability of phosphogypsum. Towards this end, a brief review and analysis of literary sources, published over the past 45 years, was performed, and conclusions were drawn about the prospects for using this material.

Results. As a result it was found that phosphogypsum is used in construction, and its applicability is confirmed by its practical application. The data obtained as part of the review confirm that stabilized phosphogypsum is widely used to reclaim quarries, fill landfills, and construct embankments. Besides, phosphogypsum, with an inorganic binder added, is used to build reinforced foundations of roadbeds.

Conclusions. It is necessary to improve formulations of phosphogypsum binders (mainly to improve their water and frost resistance) to use them in the climate zones having the most severe climatic conditions. Numerical modeling of structures, made of phosphogypsum dihydrate, is needed, and phosphogypsum dihydrate stabilization methods are to be developed.

KEYWORDS: building, highway engineering, roads, soil stabilization, phosphogypsum

FOR CITATION: Dovydenko A.V., Lunev A.A. Using phosphogypsum in roadbuilding: the potential and problems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):254-269. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.254-269 (rus.).

Corresponding author: Anastasiya V. Dovydenko, anastasiacircus@yandex.ru.

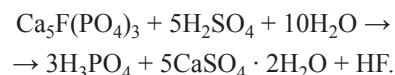
ВВЕДЕНИЕ

При получении фосфорной кислоты, фосфорных и комбинированных минеральных удобрений в Российской Федерации в качестве сырья преимущественно используют апатиты. Главной разновидностью апатита в большинстве горных пород являются фторапатит $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$ и фтор-гидроксилапатит $\text{Ca}_{10}\text{F}(\text{PO}_4)_6\text{OH}$ [1]. Побочным продуктом переработки фосфатных пород кислотным методом для производства фосфорной кислоты и удобрений служит фосфогипс (ФГ).

Образование 1 т основного продукта приводит к получению 4–5 т ФГ (в пересчете на сухое вещество) влажностью 15–56 % [1, 2]. В мире объекты складирования ФГ расположены в 52 государствах.

Общий объем ФГ в отвалах составляет порядка 5,6–7,0 млрд т. Только на территории России, по разным данным, хранится в отвалах от 300 до 500 млн т ФГ, а в странах СНГ — 140 млн т [1, 3].

Процесс кислотной переработки фторапатита с образованием ФГ описывается реакцией [4]:



Однако наличие в апатитах включений прочих минералов приводит к появлению в составе ФГ примесей неразложившихся фосфатов, остатков фосфорной кислоты, полторных оксидов, соединений стронция, фтора, микропримеси редкоземельных элементов и проч. [2]. Примерный химический состав ФГ представлен в табл. 1.

Табл. 1. Химический состав фосфогипса по данным работ [1, 2, 4–6]

Table 1. Chemical composition of phosphogypsum according to [1, 2, 4–6]

Главные компоненты Main components	Содержание, % по массе [1, 2, 4] Content, % by weight [1, 2, 4]	Тяжелые металлы Heavy metals	Миллионные доли [4] Parts per million [4]	
SiO_2	0,82–2,87	Ba	98 ± 23	
Al_2O_3	0,19–0,93	Cd	6 ± 1	
Fe_2O_3	0,21–1,74	Cr	20 ± 2	
CaO	30,20–39,2	Cu	21 ± 2	
SO_3	41,10–59,15	Ga	1 ± 0,2	
K_2O	0,01–0,10	La	86 ± 19	
Na_2O	0,04–0,42	Nb	1 ± 0,2	
P_2O_5	0,69–1,56	Ni	< 1	
TiO_2	0,01–0,4	Pb	6,2 ± 1,7	
Потери при прокаливании Ignition loss	17–22	Rb	2 ± 0,1	
<i>Радионуклиды</i> <i>Radionuclides</i>				
Страна Country	Активность распада компонентов, Бк/кг Component decay activity, Bk/kg			
	^{238}U	^{226}Ra	^{40}K	^{232}Th
Хорватия [5] / Croatia [5]	–	811	13	8
Северная Африка [4] North Africa [4]	35 ± 18	515 ± 150	< 20	< 15
Египет [6] / Egypt [6]	150	466	66	18
Россия [7] / Russia [7]	–	600	110	5

Как видно из табл. 1, основу ФГ составляет сульфат кальция CaSO_4 , содержание которого достигает 98 %. Сульфат кальция в зависимости от количества воды в соединении может существовать в трех разновидностях:

- ангидрит (CaSO_4);
- полугидрат сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$);
- дигидрат сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

В местах хранения ФГ обычно находится в форме дигидрата [8] (гранулометрический состав представлен в табл. 2 [9]). При нагревании гипса он может быть преобразован в полугидрат сульфата кальция, который имеет α - и β -модификации. Отличие модификаций в том, что α -модификацию получают нагреванием дигидрата сульфата кальция в растворах хлорида натрия, азотной кислоты

и др., а β -модификацию — в результате нагревания α -полугидрата в растворе гидроксида натрия 2%-ной концентрации [10].

В естественном виде фосфодигидрат сульфата кальция, как правило, вяжущими свойствами не об-

ладает, поэтому перед применением материал подвергается полной или частичной дегидратации [11]. Самые высокие вяжущие свойства имеет ангидрит, однако энергозатраты на производство делают этот вид ФГ малоиспользуемым [12].

Табл. 2. Гранулометрический состав фосфогипса [9]

Table 2. Granulometric composition of phosphogypsum [9]

Материал Material	Полный остаток, %, на сите с размером ячейки, мм Total residue, %, in a sieve with the cell size in mm				
	0,63	0,28	0,14	0,071	Мельче 0,071 Smaller than 0.071
Фосфодигидрат Phosphogypsum dihydrate	2	72	88	96	100
Фосфополуогидрат Phosphogypsum semihydrate	8	28	60	85	100

В настоящее время ФГ используют для снижения эмиссии парниковых газов в сельском хозяйстве [8], в качестве добавки или наполнителя в составе комплексных вяжущих веществ, а также в производстве материалов для промышленного и гражданского строительства, таких как декоративные и облицовочные плитки, стеновые блоки, сухие строительные смеси и др. [9]. Ежегодный объем его образования превышает производственные мощности предприятий, изготавливающих материалы на его основе (лишь 1,5 % всей массы получаемого фосфогипса находят применение в вышеупомянутых отраслях [13]).

В связи с этим возникает проблема хранения ФГ: отвалы занимают большие площади, которые можно использовать в наиболее рациональных целях. Н.А. Кутепова в статье [14] отмечает, что при хранении материала на сравнительно небольшой для его объема площади ФГ в отвалах имеет свойство деформироваться, это влечет за собой существенные осадки и оползневые смещения. В результате оползневых смещений может происходить нарушение целостности гидроизоляционного слоя на подошве отвала, что потенциально способно привести к загрязнению грунтовых вод и окружающих земель тяжелыми металлами [15].

Только расширение областей применения ФГ поможет справиться с данной проблемой. Результаты многолетних исследований СоюзДорНИИ [9] показали, что этот материал имеет свойства, позволяющие использовать его в сфере дорожного строительства, однако многими авторами отмечаются негативные аспекты его применения, такие как: радиоактивность, содержание примесей и высокая растворимость, которая ведет к низкой водостойкости материалов на его основе [9, 16], а также низкой прочности вяжущих на основе фосфогипса.

Цель данного обзора — обобщение имеющихся разработок и опыта полезного использования побоч-

ных продуктов производства фосфорных удобрений (фосфогипса) в строительной отрасли для поиска наиболее перспективных направлений его многотоннажного использования, а также их краткий анализ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведен литературный поиск отечественных и англоязычных источников информации с 1980 г. по настоящее время. Одновременно выполнялся анализ литературных источников с целью выявления проблематики использования ФГ и осуществлялся поиск наиболее удачных решений для его дальнейшего применения в дорожном строительстве.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе анализа литературных источников установлено, что особое внимание специалисты уделяют нескольким основным направлениям:

- получение вяжущих на основе ФГ с повышенной прочностью и водостойкостью;
- разработка рецептур укрепленных природных малокондиционных грунтов для строительства дорожных одежд на дорогах с низкой интенсивностью движения (НИД);
- использование фосфогипса в качестве техногенного грунта в составе земляных сооружений.

В поисках наиболее рационального применения ФГ именно получение гипсовых вяжущих является самой распространенной темой исследования. Однако такие вяжущие имеют ряд недостатков, связанных как со свойствами самого ФГ, так и наличием в нем примесей, влияющих на характеристики получаемого вяжущего.

В России и за рубежом выделяют три способа производства, с помощью которых можно получить обжиговое, автоклавное или ангидритовое вяжущее [17]. Благодаря этим методам возможно получить

очищенное от примесей гипсовое вяжущее. Но самый главный недостаток — денежные и трудовые затраты [17].

Кроме того, согласно П.Ф. Гордашевскому [18], при тепловой обработке, происходящей в каждом из всех вышеуказанных способов, за счет повышения кислотности под влиянием высоких температур из ФГ начинают выделяться фтористые газы, приводящие к повышению кислотности, что приводит к усилению коррозии оборудования. Автор предлагает изменить технологии производства за счет внесения добавок в вяжущее. Так, было установлено:

- повысить прочность вяжущего возможно с помощью внедрения в его состав 0,5 % растворимых фосфатов;
- добавки, содержащие соединения фтора (NaF и Na_2SiF_6), при внесении их в вяжущее в количестве 0,1 % снижают его прочность, если увеличить содержание до 0,4 % прочность снижается практически вдвое. Объясняется это тем, что фосфорная и серная кислоты, содержащиеся в ФГ, в реакции с данными добавками создают кислую среду;
- незначительно ускоряют сроки схватывания вяжущего 0,1–0,3 % ортофосфорной кислоты или двузамещенный фосфат кальция, ускоряющий реакцию гидратации [18].

Работа [19] посвящена обзору методов получения вяжущих из ФГ путем их обжига и обработки в автоклавах. Особо отмечается необходимость нейтрализации кислотных остатков при помощи 1–3 % негашеной извести перед приготовлением вяжущего для улучшения его физико-механических свойств. В публикации [17] также указывается на необходимость проведения нейтрализации кислых соединений, однако большее внимание уделяется методам промывки ФГ или комбинации этого способа с химической нейтрализацией вредных примесей и связыванием их в малорастворимые вещества.

Предлагается внесение добавок NaCl , MgSO_4 , Na_2SiF_6 , $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, Na_2SO_4 , СДБ для улучшения свойств вяжущих из ФГ [20]. Авторами экспериментально доказано, что внесение 1,0 % NaCl и 0,5 % сульфитно-дрожжевой бражки (СДБ) позволяет повысить прочность такого вяжущего до четырех раз. Этот эффект во многом связан со снижением водовязущего отношения при внесении СДБ, а кроме того, в работе не проведена оценка водо- и морозостойкости вяжущего.

Э.А. Карпович и соавт. в патенте SU 1723066A1 [21] предлагают прототип известного способа получения гипсового вяжущего из ФГ путем его нейтрализации в водной суспензии известковым молоком с отделением от жидкой фазы и последующей дегидратацией. Особенность способа по сравнению с указанным в труде [19] заключается в введении кварцевого песка в соотношении с фосфодигидратом 1:0,05–1,7. Данное нововведение дает возможность улучшить качество гипсового вяжущего.

Повышать водостойкость гипсового вяжущего предлагается и посредством прессования фосфогипса, модифицированного добавками микрокремнезема (6,7 %) и гидроксида алюминия (1,7 %) [22]. Было отмечено, что, во-первых, с увеличением давления в ФГ имеется тенденция к повышению рН, которое способствует лучшим условиям твердения. Во-вторых, добавки способствуют образованию в ходе твердения нерастворимых соединений — гидрогранатов кальция. Однако итоговая прочность составила всего порядка 3,5 МПа.

А.В. Волженский и соавт. [23] для повышения водо- и морозостойкости рекомендовали использовать вместо чистого гипса смесь гипса, португандцемента и активной минеральной добавки (пуццолановой), т.е. гипсоцементнопуццолановые вяжущие (ГЦПВ). Аналогичным образом в статье [24] было разработано ГЦПВ, состоящее из таких компонентов, как португандцемент, фосфогипс полугидрат, карбонат щелочного металла, силикагель + гидроксид кальция, вода и ПАВ. Это вяжущее показало высокие значения коэффициента водостойкости, прочность до 30 МПа и скорость ее набора.

Для повышения водостойкости [25] в гипсовое вяжущее марки Г7 из фосфодигидрата внедряли латексные порошки до 1,6 % по массе вяжущего с целью повысить водостойкость и выявить оптимальное количество данной добавки. Эксперимент проводился для сухих и водонасыщенных образцов. По результатам испытаний можно сказать о том, что:

- при внесении в вяжущее 0,7–1,2 % латексного порошка наблюдается значительное увеличение показателей прочности: для сухих образцов — от 8 до 10,9 МПа, для водонасыщенных образцов — от 5 до 9,2 МПа;
- латексный порошок в содержании от 1,2 до 1,6 % массы вяжущего также дает высокие показатели прочности, но с меньшей динамикой их роста: разница показателей прочности сухих образцов равна 0,9 МПа. Прочность водонасыщенных образцов остается на данном участке неизменной, что говорит о снижении водостойкости этого вяжущего;
- в интервале 0,2–0,7 % содержания добавки отмечено падение свойств вяжущего. Так, минимальное значение прочности на указанном промежутке составило 5,1 МПа для сухих образцов и 3,8 МПа для водонасыщенных. При отсутствии добавки эти образцы имели показатели прочности соответственно 7,1 и 4,9 МПа.

Ряд исследований направлен на то, чтобы получать требуемые свойства гипсовых вяжущих путем их обжига в различных режимах. Установлено, что максимальные значения прочности на сжатие 28–34 МПа достигаются при обжиге ФГ при температуре 900–950 °С, продолжительность обжига — 1,2–1,5 ч, с добавкой известняка 10–15 % по массе [26].

Повышение прочности в указанном температурном интервале обжига происходит в результате

уменьшения размера кристаллических блоков нерастворимого ангидрита (ангидрита II). При этом отмечается, что повышение температуры обжига приводит к «пережогу» и ухудшению эксплуатационных свойств ангидритового вяжущего. Показано, что при спекании ангидритового вяжущего с минерализующими добавками (пыль электрофильтров, стеклобой, природная соль) происходит активация формирования ангидрита II и цементных клинкерных фаз, в частности белита, алюмоферритов кальция. Повышению водостойкости гипсового камня при совместном введении добавок извести, керамзитовой пыли и суперпластификатора способствует образование труднорастворимых низкоосновных гидросиликатов кальция, а также карбоната кальция, уплотняющих поровую структуру гипсового камня [27].

В работе [28] рассмотрен рост эффективности производства водостойких композиционных гипсовых вяжущих (КГВ), отмечено, что этого можно достичь следующим образом:

- повысить эффективность КГВ возможно за счет поочередного помола компонентов, каждому из них дано оптимальное время помола;
- к повышению прочности и водостойкости может привести синтез дигидрата и гидроалюмосиликата кальция, что возможно при внедрении кремне-содержащих компонентов в КГВ;
- предел прочности КГВ возможно повысить на 24 %, если повлиять на его структуру и состав, а также условия его эксплуатации;
- при внедрении в состав КГВ армирующих волокон возможно получение строительного материала с классом по прочности B5–B30 и классом по морозостойкости F20–F50;
- под воздействием серной кислоты в фосфогипсе в дигидрате проходит реакция дегидратации, что позволяет получить гипсовое вяжущее безобжиговым способом.

Вопросам производства композиций укрепленных грунтов для оснований дорожных одежд посвящена целая линейка изобретений.

Н.Ф. Сасько и соавт. в патенте SU 1470830A1 [29] используют ФГ как один из главных компонентов композиции для устройства оснований дорожных одежд. Композиция содержит (в процентах по массе): 5–10 % цемента, 2–4 % доломитовой пыли, 0,5–1 % кубовых остатков производства кремнийорганических соединений, 40–60 % горелой породы и 25–52,5 % ФГ. В патенте рассмотрено 5 различных процентных соотношений материала в композиции. Авторами экспериментально установлено, что представленные смеси позволяют повысить морозостойкость и прочность в водонасыщенном состоянии (1989).

С.Я. Азарова и соавт. (патент SU 1551765A1 [30]) изобрели композицию для устройства покрытий и оснований автомобильных дорог, состоящую из 12–20 % ФГ, 5–8 % кислого гудрона, 8–12 % молодого доменного гранулированного шлака, оставшу-

юся массу составил грунт. Данное изобретение позволяет повысить водостойкость композиции по сравнению с аналогами за счет добавки кислого гудрона (1990).

В патенте SU 1652419A1 [31] М.И. Кучма и соавт. представили композицию из полугидрата (51,1–77,7 %), дигидрата (6,9–38,9 %) и ангидрита (13,1 %), в качестве увлажнителя применяли водный раствор поташа с пластификатором. Данная композиция обеспечила возможность выполнения работ по строительству дорожной одежды при небольших отрицательных температурах (1991).

Смешивать верхний слой грунта с фосфодигидратом в количестве 3–15 % от массы грунта и вводить в данную смесь лигносульфаты 3–5 % в пересчете на сухое вещество от массы грунта предложили И.В. Карпова и соавт. (патент SU 1698339A1 [32]). Такой подход привел к обеспыливанию и укреплению автомобильных дорог с дорожной одеждой низшего типа (1991).

Все эти работы направлены на использование ФГ в конструкциях оснований дорог с НИД, хотя возможности этого материала значительно шире, что доказывает опыт современных ученых.

Min Yang и соавт. [33] изучали возможность улучшения грунтов добавкой прогретого до 400 градусов и помолотого фосфогипса в комбинации с известью, золой уноса и добавкой 1,2 % NaOH. Ими были разработаны рецептуры, содержащие 6–9 % ФГ. При 6 % ФГ авторами отмечено лучшее сопротивление влиянию намокания-сушки, а при 9 % наблюдалась меньшая эрозия слоя из этих материалов (2010).

То, что фосфополугидрат является хорошей заменой другим материалам для земляного полотна и устройства конструктивных слоев дорожной одежды утверждают А.В. Кочетков и соавт. [34]. Авторы высказываются о преимуществах использования ФГ, однако в статье не представлены расчеты конструкций, данные испытаний, не проведена оценка экономической эффективности и т.д. В то же время ими приведен пример успешного практического опыта возведения участка автомобильной дороги в Балаковском районе Саратовской области (2019) с применением ФГ.

В.П. Кожухов и соавт. [35] изучили смесь фосфогипса с добавкой 5–30 % золы уноса, вносимой с целью уменьшения вредного влияния фосфорной кислоты в составе ФГ. По результатам испытаний было подобрано рациональное количество добавки золы уноса в количестве 10 % (выступающей еще и как регулятор водопотребности ФГ) для изготовления вяжущего при строительстве оснований дорожных одежд.

В работе [36] Ling-Ling Zeng, Lun Zhao и соавт. исследовано влияние на глинистый грунт повышенной влажности, укрепленный цементом в количестве 7–21 %, добавок фосфогипсового порошка (0–8,6 %). Добавка ФГ способствует повышению плотности

и прочности материала, по данным испытаний наиболее рациональное количество добавки фосфогипса в укрепленный грунт составляет 2–5 % (2021).

Автор статьи J. Mater [37] сравнивал механические характеристики (химический состав, стандартное уплотнение, предел прочности на сжатие, динамическое трехосное сжатие) полугидрата и дигидрата путем их смешивания с тропическим грунтом, известью и цементом. По результатам испытаний лучшие механические свойства показала смесь с тропическим грунтом, цементом (9 %) и полугидратом сульфата кальция (91 %) (2017).

Заменить минеральный порошок в составе асфальтовязующего фосфогипсом в количестве 84 % по массе рекомендуют И.В. Голиков и соавт. (патент RU 2701007C1 [38]). В качестве связующего — битум с добавкой полиэтилентерефталата 15–20 % массы для повышения водостойкости. Такое вяжущее показало высокую прочность и водостойкость, а благодаря ФГ в составе снижается себестоимость смеси (2019).

Сходным образом Ю.Г. Борисенко и соавт. в патенте RU 2436819C1 [39] предлагают использовать в качестве минерального наполнителя в битумно-минеральной композиции смесь ФГ фракции менее 0,16 мм в количестве 3,7–3,9 % по массе. В композицию также входит битумное вяжущее 6,5–7 % и песок из плотных горных пород 74,3 % как минеральный наполнитель. Согласно сведениям авторов, данная смесь обладает повышенной прочностью, тепло- и трещиностойкостью (2010).

В.А. Кашлач и Т.Л. Лазарева [40] предложили композицию для укрепления грунтов и щебеночных смесей оснований дорожной одежды. В работе совершена попытка разработать КГВ на основе фосфогипса полугидрата, цемента, извести и золы уноса.

Полученные вяжущие показали коэффициент размягчаемости (водостойкость) лучшей рецептуры всего 0,76. Однако прочность полученного вяжущего составляла практически 20 МПа, что может говорить о целесообразности использования таких вяжущих для стабилизации грунтов. По результатам испытаний было установлено, что композиция с применением полугидрата сульфата кальция имеет высокие показатели прочности и водостойкости. Авторы рекомендуют применять данную композицию для обработки слоев оснований, а также покрытий дорог IV–V категорий в III–V дорожно-климатических зонах (2019).

Помимо применения ФГ для производства вяжущих и в качестве компонента слоев дорожных одежд актуально его использование для земляного полотна и прочих земляных сооружений в первую очередь благодаря простоте технологии производства работ и большому объему утилизации материала.

Специалисты из Индии провели исследование [41] с целью оценить целесообразность использования ФГ, собранного компанией Paradeep Phosphates Limited, штат Орисса, для строительства насыпей земляного полотна. Выполнен анализ устойчивости откосов при различных условиях насыщения материала водой и учета влияния землетрясений. Для оценки устойчивости определены значения характеристик ФГ (табл. 3).

В результате авторами сделан вывод о том, что ФГ является потенциально пригодным материалом для строительства земляного полотна автомобильных дорог. Причем наилучшие результаты дает конструкция с откосом насыпи из фосфогипса, присыпанным грунтом (хотя различия в коэффициенте устойчивости составляют всего около 1 %, в то время как устойчивость откоса из местного грунта ниже на 2–4 %).

Табл. 3. Общие геотехнические характеристики фосфогипса и местного грунта [46]

Table 3. General geotechnical characteristics of phosphogypsum and local soil [46]

Характеристика Engineering properties	Фосфогипс Phosphogypsum	Грунт Soil
Максимальная плотность скелета грунта при стандартном уплотнении, г/см ³ Maximum dry density, g/cm ³	1,51	2,00
Оптимальная влажность, % Optimal moisture content, %	17,0	12,0
Предел текучести, % Liquid limit, %	49,0	28,0
Число пластичности Plasticity index	Не обладает Doesn't have	Не обладает Doesn't have
Калифорнийское число несущей способности (CBR), % California bearing ratio, %	26	8
Коэффициент фильтрации, м/сут Permeability coefficient, m/day	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$

В работе специалистов из Греции [42] рассматривается возможность использования ФГ в качестве материала земляных насыпей (в том числе ядра насыпи второстепенных автомобильных дорог). Для этих целей были определены: зерновой состав, прочностные и деформационные характеристики материала в условиях трехосного сжатия, калифорнийское число несущей способности, максимальная плотность скелета грунта и оптимальная влажность (а также в сравнении с исследованиями других специалистов), особенности выщелачивания тяжелых металлов в процессе фильтрации воды (2020).

Данные, касающиеся механических свойств, показывают пригодность ФГ для сооружения любых насыпей, особенно при использовании методов гидроизоляции ядра из фосфогипса. Однако при анализе этой работы обнаружено, что пробоподготовка материала осуществлялась при температуре 105 °С, что несомненно вело к образованию полугидрата сульфата кальция β-модификации, это и объясняет высокие механические характеристики исследуемого фосфогипса. Следовательно, эти данные не могут быть применены к сырому ФГ, отобранному из отвала путем его экскавации без просушки.

Публикация [43] посвящена оценке устойчивости отвалов ФГ, размещенных в городах Туниса Сфакс и Сехира, без дамб обвалования по различным технологиям захоронения (сухой и влажной). Авторами установлено, что механические характеристики ФГ лучше проявляют себя при мокром способе удаления, но такой способ (используемый и в РФ) менее безопасен с точки зрения экологии, поскольку загрязняет грунтовые воды.

В отличие от труда [42], в статье [43] для оценки устойчивости хранилища применялись данные проведенных ранее экспериментов по оценке механических характеристик ФГ без сушки, которая вы-

зывает образование полугидрата. Полученные результаты говорят о допустимости использования ФГ мокрого хранения в насыпях с заложением откоса не менее 1:1,5 (2018).

Теми же авторами позднее были опубликованы работы [44, 45], которые содержат параметры ФГ сухого и мокрого хранения, подтверждающие неправоту выводов авторов из Греции [42], и показывают значения параметров прочности, сопоставимые с некоторыми видами глинистых грунтов (2019–2020).

Рассматривается исследование ФГ из отвала ООО «Производственная группа “Фосфорит”», расположенного в г. Кингисепп [46]. Группой авторов проанализированы свойства нейтрализованного строительной известью фосфогипса при различных степенях уплотнения (K_v от 0,80 до 0,95) и в интервалах влажности от оптимальной до полного водонасыщения. Результаты, полученные авторами [46], сведены в табл. 4.

Проанализировав данные, можно сделать вывод о том, что ФГ является слабоводопроницаемым грунтом с прочностными и деформационными характеристиками, позволяющим с некоторыми допущениями отнести его к супесям. В отличие от природных глинистых грунтов, наличие в составе сульфата кальция обуславливает необходимость полной защиты насыпных сооружений из ФГ от фильтрации воды и воздействия водных потоков на откосы сооружений из него.

В статье [47] рассматривается влияние на окружающую среду жизненного цикла дорожной насыпи с применением ФГ. Авторы не дали однозначного ответа на вопрос, какой из трех путей использования (строительство насыпей, захоронение в свалках или сбор для утилизации) наилучший, но отметили низкую перспективность захоронения ФГ в отвалах.

Табл. 4. Механические характеристики фосфогипса

Table 4. Mechanical characteristics of phosphogypsum

Тип испытания Type of test	Условия Conditions	Значения угла внутреннего трения, град / удельного сцепления, кПа, в зависимости от коэффициента уплотнения Values of the angle of internal friction, grad / cohesion, kPa, depending on compaction coefficient		
		0,95	0,90	0,80
Одноплоскостной срез (КД) Direct Shear Test (CD)	W_{opt}	35,2 / 6,7	34,1 / 7,2	32,4 / 7,6
	W_{sat}	32,3 / 6,3	30,4 / 4,7	29,0 / 5,6
Одноплоскостной срез (НН) Direct Shear Test (UU)	W_{opt}	32,9 / 6,0	32,0 / 5,8	29,0 / 7,4
	W_{sat}	29,6 / 5,9	28,9 / 5,7	28,4 / 5,7
Компрессионное сжатие Oedometer test	Влажность Humidity	Значения модуля деформации E_{oed} , МПа Values of deformation modulus E_{oed} , MPa		
		0,95	0,90	0,80
	W_{opt}	10,9	8,6	4,3
	W_{sat}	11,3	4,2	3,6

Окончание табл. 4 / End of the Table 4

Трехосное сжатие (НН) Triaxial compression (UU)	Давление реконсолидации Reconsolidation pressure	Сопротивления недренированному сдвигу c_u , кПа в зависимости от коэффициента уплотнения Unconfined compression strength c_u , kPa depending on compaction coefficient		
		0,95	0,90	0,80
	100	110,8	53,0	24,4
	200	147,4	74,0	24,6
	300	185,6	88,1	39,5
ГОСТ 25584-2016 GOST 25584-2016	Давление на образец Pressure on the specimen	Коэффициент фильтрации, м/сут Permeability coefficient, m/day		
		0,95	0,90	0,80
	0	0,091	0,165	0,431
	25	0,063	0,119	0,182
	50	0,056	0,096	0,146
	100	0,056	0,089	0,138
	200	0,056	0,074	0,112
	300	0,039	0,055	0,104
ГОСТ 12248.5-2020 GOST 12248.5-2020	Давление на образец Pressure on the specimen	Относительная вертикальная деформация образца/ относительное суффозионное сжатие грунта в зависимости от коэффициента уплотнения/начального давления Relative vertical deformation of the specimen / relative suffusion compression of soil depending on compaction coefficient / initial pressure		
		0,95/>300	0,90/30	0,80/<25
	25	0,001/0,004	0,002/0,006	0,035/0,022
	50	0,001	0,003/0,011	0,037/0,028
	100	0,003	0,007/0,018	0,043/0,035
	200	0,003	0,020/0,020	0,044/0,046
	300	0,003	0,027/0,021	0,049/0,058

Исходя из этого ФГ целесообразно применять в качестве материала насыпей земляного полотна и защитных слоев полигонов ТБО. Однако исследования С.И. Солдаткина и А.Е. Хохлова [48] показали, что дороги с использованием ФГ могут подвергаться несвоевременному разрушению при его применении без стабилизации. Поэтому при возведении насыпей земляного полотна из ФГ обязательным условием является обеспечение гидроизоляции слоя с помощью геосинтетических материалов.

В то же время имеется ряд работ, содержащих технические решения, позволяющие нивелировать негативные особенности ФГ и увеличить его прочность, необходимую для инженерных сооружений.

Так, специалистами из Institute of Geology and Geophysics of CAS [49] предложен способ строительства насыпи с использованием ФГ в смеси с цементом в соотношении 90:10, затворенной водным раствором силиката натрия (2–4 %). Смесь, приготовленную путем перемешивания в смесительных установках, рекомендуется применять в качестве ядра насыпи,

изолированного геосинтетическими материалами и защищенного с откоса слоями грунтов, которые препятствуют просачиванию фильтрата. Очевидно, что подобное решение за счет включения цемента с раствором силиката натрия и использования установок будет дороже, нежели природные грунты, однако эффективность этого решения невозможно оценить, поскольку в патенте не приведены свойства получаемого материала (2020).

Н.Ф. Сасько и соавт. поставили цель повысить прочность конструкции земляного полотна путем создания насыпи из дигидрата сульфата кальция и защитного слоя из дигидрата сульфата кальция, обработанного щелочью в количестве 1–3 % сухого вещества (рис. 1) (патент SU 1700145A1 [50]). Данное решение было предложено авторами в качестве альтернативы приведенному в работе [51] с изолирующим слоем из суглинистых грунтов (рис. 1).

По данным испытаний сравнительных объектов первый вариант конструкции с защитным слоем из дигидрата, обработанного щелочью в количестве

2 %, показал преимущество над вторым вариантом конструкции, так как имеет более высокие механические характеристики, а также обладает более низ-

кими значениями коэффициента фильтрации, следовательно, препятствует попаданию фосфорных и фтористых кислотных соединений в грунт (1991).

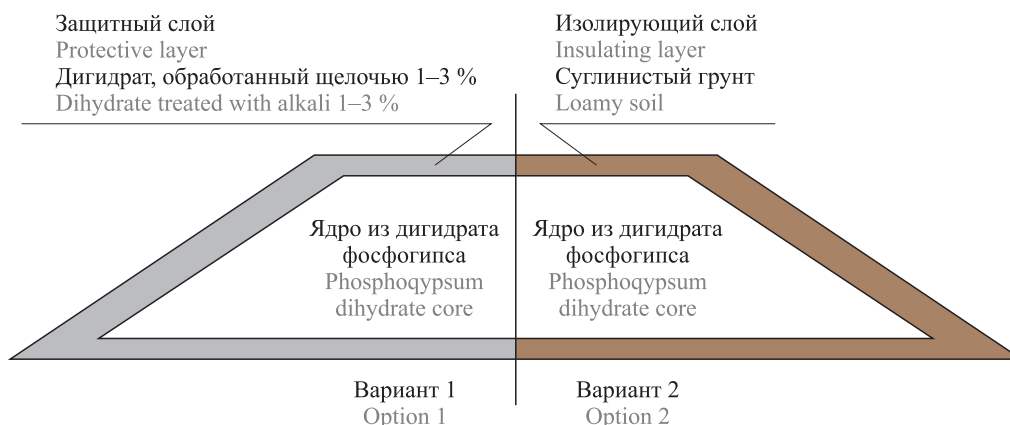


Рис. 1. Конструкции земляного полотна с применением фосфогипса

Fig. 1. Roadbed constructions made using phosphogypsum

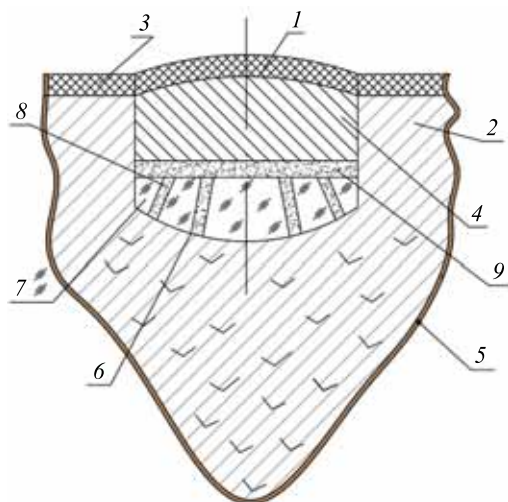


Рис. 2. Профиль карстовой воронки после рекультивации: 1 — карстовая воронка; 2 — траншея; 3 — площадки срезанного плодородного слоя; 4 — плодородный слой; 5 — плотная почва, не поддающаяся проседанию; 6 — сферическое дно; 7 — фосфогипс; 8 — скважины; 9 — слой песка

Fig. 2. Sink hole profile after reclamation: 1 — sinkhole; 2 — trench; 3 — sites of the cut fertile layer; 4 — fertile layer; 5 — dense soil that doesn't succumb to subsidence; 6 — spherical bottom; 7 — phosphogypsum; 8 — earth bores; 9 — sand layer

Применение фосфогипсу при рекультивации земель нашли В.Л. Звягинцев и соавт. в патенте SU 1605957A1 [52]. Сущность изобретения состоит в том, что слой ФГ толщиной не менее 1 м укладывают в траншею (позиция 2 на рис. 2) и уплотняют. Также сверлят скважины (позиция 8 на рис. 2) диаметром не более 10 мм с целью улучшения дренажа и предотвращения заболачивания. Этот способ ре-

культивации эффективен за счет повышения несущей способности фосфогипсового слоя. Существенным плюсом можно считать количество необходимого для рекультивации ФГ — на 1 га расходуется ориентировочно 2500 т материала.

Отдельно стоит описать экологический аспект применения этого материала, который является побочным продуктом производства. Статья [53] посвящена мониторингу удельной эффективной активности природных радионуклидов в фосфогипсе, производимом в Салониках (Северная Греция), за период с 1966 по 2006 г. Авторами была отмечена неоднородность этого параметра, который менялся от 261 до 688 Бк/кг, а также то, что при внесении ФГ в почву полей ее радиоактивность повышается в 1,4–12,9 раз. Такое повышение, хотя и несет повышение естественного облучения при потреблении риса и прочих культур, выращенных на таких полях, но не позволяет выйти за пределы естественного уровня радиоактивного излучения.

Аналогично из результатов работы [42], сведенных в табл. 5, видно, что концентрации вредных веществ и тяжелых металлов в фильтрате на 2–3 порядка ниже величин ПДК, предложенных для безопасности окружающей среды агентством по охране окружающей среды США (US EPA).

В исследовании [54] определена возможность использования переработанного ФГ в качестве материала для насыпи с почвой путем проведения периодических и колоночных экспериментов по экотоксичности. Четыре вида организмов (*A. salina*, *D. magna*, *O. latipes* и *S. capricornutum*) были отобраны для эксперимента. Эффективная концентрация (EC50) *D. magna* была самой низкой и составила 1,29 мг/л. Выживаемость *A. salina*, *D. magna* и *O. latipes* составила более 90 % в присутствии фильтрата PG в колонке. Единица токсичности (TU) для трех ор-

ганизмов (*A. salina*, *D. magna* и *O. latipes*) составила менее 1, что указывает на отсутствие значительного эффекта экотоксичности. Соответствующее значение рН с РГ было важным фактором для роста трех ор-

ганизмов. Эти результаты показали, что РГ можно перерабатывать для использования в качестве насыпи и материала для захоронения отходов в смеси с почвой (табл. 6).

Табл. 5. Концентрации тяжелых металлов и вредных веществ в фосфогипсе

Table 5. Concentrations of heavy metals and harmful substances in phosphogypsum

Параметр Parameter	As, мг/л mg/l	Ba, мг/л mg/l	Cd, мг/л mg/l	Cr, мг/л mg/l	Pb, мг/л mg/l	Se, мг/л mg/l	Ag, мг/л mg/l
По нормам США According to US standards	5,0	100,0	1,0	5,0	5,0	1,0	5,0
Фосфогипс Phosphogypsum	0,021	0,07	0,004	0,014	0,034	< 0,1	< 0,01

Табл. 6. Концентрации веществ в фосфогипсе и составе грунтовых смесей

Table 6. Concentrations of substances in phosphogypsum and composition of soil mixtures

Параметр Parameter	TN, мг/л mg/l	TP, мг/л mg/l	рН	Cd, мг/л mg/l	Cr, мг/л mg/l	As, мг/л mg/l	U-238, пКи pCi	Ra-226, пКи pCi
По норма США According to US standards	–	–	–	1,0	5,0	5,0	–	–
Грунт Soil	42,2	0,003	5,77	0,011	0,004	НО ND	0,567	0,783
ФГ 30 % PG 30 %	21,1	0,038	5,49	0,001	0,001	НО ND	1,188	4,131
ФГ 50 % PG 50 %	14,8	0,059	5,39	0,010	0,003	НО ND	1,485	7,965
ФГ 100 % PG 100 %	–	–	3,42	0,010	0,003	0,01	1,647	13,122

Примечание: TN — общая концентрация азота; TP — общая концентрация фосфора; НО — не обнаружено.

Note: TN is the total concentration of nitrogen; TP is the total concentration of phosphorus; ND is not detected.

Таким образом, можно утверждать, что ФГ хотя и имеет ограничения по применению для рекультивации земель, в чистом виде может быть безопасно применен для строительства автомобильных дорог.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Возможность использования ФГ для строительства автомобильных дорог подтверждается результатом анализа публикаций, представленных в настоящей работе. Исходя из этого, можно сказать о пригодности материала для строительства различных конструктивных слоев автомобильных дорог как в составе инертного материала, так и вяжущего.

Самое распространенное направление исследований — создание вяжущих из ФГ. Получить вяжущее из ФГ возможно несколькими способами, одним из которых является тепловая обработка с добавлением известняка для нейтрализации кислот, но большинство авторов считают проведение этой операции нецелесообразным. Помимо обжига, в ФГ вводят

добавки, приводящие к его самодегидратации, например, в качестве такой добавки может выступать серная кислота.

Для повышения водостойкости фосфогипсовых вяжущих можно использовать добавки 0,5 % растворимых фосфатов, от 0,7 до 1,2 % латексного порошка или кремнесодержащих компонентов (пыль электрофильтров, стеклобой, кварцевый песок) в количестве 5 %. Также можно обеспечить прочность до 30 МПа, используя ФГ в составе гипсоцементнопуццоланового вяжущего.

Фосфогипс возможно применять и в качестве материала для строительства дорожных одежд: чаще всего оснований или покрытий низшего типа на дорогах 3–4 (согласно СП 34.13330.2021) категорий. Этот материал обладает низкими показателями морозостойкости и прочностью в водонасыщенном состоянии, в связи с этим строительство дорог с применением ФГ допустимо только в 3–4 дорожно-климатической зоне, более суровые условия снижают эксплуатационные характеристики.

Морозостойкость возможно повысить двумя способами: внесение водоотталкивающих добавок в ФГ (таких как лигносульфонаты, жировой гудрон или смесь битума с добавкой полиэтилентерефталата) или создание композиций из ФГ с другими дорожно-строительными материалами (молотый доменный шлак, цемент, зола уноса). Добавка ФГ к грунтам, укрепленных цементом, может повысить прочность материала в 1,7–9,4 раз. Смесь ФГ с золой уноса приводит к обеспыливанию, уменьшению эрозии, сопротивлению влияния намокания-сушки, а также позволяет уменьшить вредное воздействие фосфорной кислоты в составе ФГ.

Допускается использовать ФГ и в качестве материала насыпей земляного полотна. Но для обеспечения экологической безопасности необходимо предотвратить попадание в грунтовые воды вредных веществ, которые содержит ФГ. Поэтому при возведении насыпей земляного полотна из ФГ обязательным условием служит обеспечение гидроизоляции слоя с помощью геосинтетических материалов.

Гидроизоляции можно добиться, если смешать ФГ с гидроксидом натрия в количестве 1–3 %, благо-

даря этому увеличиваются показатели прочности и значительно снижается коэффициент фильтрации, не давая вредным веществам загрязнить окружающую среду. Земляное полотно возможно возвести из отвального ФГ мокрого хранения, задействованного в России, но при заложении откоса не менее 1:1,5. В противном случае земляное полотно следует возводить с ФГ, прошедшим термообработку. Водородный показатель рН материала позволяет применять его в большом объеме при рекультивации карьеров и в качестве материала для почв.

Результаты анализа показывают, что наиболее целесообразным является применение ФГ в комбинации с неорганическим вяжущим (и отходами производства) для стабилизации грунтов земляного полотна и строительства укрепленных оснований дорожных одежд. Однако в дальнейшем требуется усовершенствование рецептур вяжущих на основе ФГ (в основном повышение водо- и морозостойкости) с целью их использования в дорожно-климатических зонах с наиболее суровыми климатическими условиями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Манжина С.А., Денисов В.В., Денисова И.А. Использование крупнотоннажного отхода фосфогипса для снижения SO₂-содержащих выбросов угольной теплоэлектростанции // Инженерный вестник Дона. 2014. № 1 (28). С. 77.
2. Капустин Ф.Л., Афанасьева М.А., Митюшов Н.А., Беднягин С.В. Особенности состава и свойства продукта переработки фосфогипса // Инновации в материаловедении и металлургии : мат. IV Междунар. интерактивной науч.-практ. конф. 2015. С. 401–404.
3. Мтибаа М. Гипсовое вяжущее на основе фосфогипса Туниса : дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2009. 203 с.
4. Tsioka M., Voudrias E.A. Comparison of alternative management methods for phosphogypsum waste using life cycle analysis // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 266. P. 121386. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121386
5. Bituh T., Petrinec B., Skoko B., Babić D., Rašeta D. Phosphogypsum and its Potential Use in Croatia: Challenges and Opportunities // Archives of Industrial Hygiene and Toxicology. 2021. Vol. 72. Issue 2. Pp. 93–100. DOI: 10.2478/aiht-2021-72-3504
6. Эль-Дидамони Х., Али М.М., Аввад Н.С., Аммалла М.Ф., Фавзи М.М. Радиологические характеристики и переработка радиоактивно загрязненных отходов фосфогипса // Радиохимия. 2013. Т. 55. № 4. С. 378–383.
7. Едаменко А.С. К вопросу об экологической безопасности гипсовых вяжущих // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 1–1 (8). С. 55–56.
8. Kumar S.S., Kumar A., Singh S., Malyan S.K., Baram S., Sharma J. et al. Industrial wastes: Fly ash, steel slag and phosphogypsum- potential candidates to mitigate greenhouse gas emissions from paddy fields // Chemosphere. 2020. Vol. 241. P. 124824. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124824
9. Исаев В.С., Юмашев В.М., Гребеневич Н.П. Основные направления исследований СоюзДорНИИ по применению фосфогипса для строительства дорожной одежды // Сборник трудов СоюзДорНИИ. 1986. С. 5–13.
10. Копылев Б.А. Технология экстракционной фосфорной кислоты. Л. : Химия, 1981. 224 с.
11. Каганович Е.В., Асматулаев Б. Результаты исследований по применению фосфогипса в качестве компонента вяжущих для укрепления грунтов и каменных материалов // Сборник трудов СоюзДорНИИ. 1986. С. 35–44.
12. Герасимов Д.В., Игнатъев А.А., Готовцев В. Фосфогипс как компонент дисперсно-упрочненного композита на примере гранулированной асфальтобетонной смеси // Вестник Евразийской науки. 2020. Т. 12. № 5. С. 35.
13. Кукин Л.А., Околелова Э.Ю., Кукина О.Б., Волокитина О.А. Инновационный способ увеличения жизненного цикла использования фосфогипса как

фактор импортозамещения и экономического роста // *Фундаментальные исследования*. 2020. № 5. С. 95–99. DOI: 10.17513/fr.42753

14. *Кутепова Н.А., Коробанова Т.Н.* Особенности развития деформаций отвалов фосфогипса в г. Балаково Саратовской области // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 10. С. 132–140. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-132-140

15. *Tayibi H., Choura M., López F.A., Alguacil F.J., López-Delgado A.* Environmental impact and management of phosphogypsum // *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 90. Issue 8. Pp. 2377–2386. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007

16. *Сагдатуллин Д.Г.* Высокопрочное гипсоцементнопуццолановое вяжущее : дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2010. 210 с.

17. *Удалова Е.А., Габитов А.И., Шуваева А.Р., Недосеко И.В., Чернова А.Р., Ямилова В.В.* Современное состояние и перспективные возможности использования фосфогипса для производства вяжущих материалов // *История и педагогика естествознания*. 2016. № 4. С. 55–58.

18. *Гордашевский П.Ф., Долгоров А.В.* Производство гипсовых вяжущих материалов из гипсо-содержащих отходов. М. : Стройиздат, 1987. 105 р.

19. *Деревянко В.Н., Тельянов В.А.* Технологии производства гипсовых вяжущих материалов из фосфогипса // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. № 2–3 (143–144). С. 68–73.

20. *Голик В.И., Разоренов Ю.И., Полухин О.Н.* Использование композитных вяжущих в горном производстве // *Сухие строительные смеси*. 2014. № 6. Р. 17–20.

21. Патент SU 1723066A1. Способ получения гипсового вяжущего из фосфогипса / *Э.А. Карнович, Г.Л. Звягинцев, А.Г. Касьян, Р.А. Ващенко*. № 4854279/26; заявл. 26.07.90; опубл. 30.03.92. Бюл. № 12, 4 с.

22. *Михеенков М.А.* Прессование как способ повышения водостойкости гипсового вяжущего // *Вестник МГСУ*. 2009. № 4. С. 158–166.

23. *Галаутдинов А.Р., Мухаметрахимов Р.Х.* Особенности гидратации модифицированного гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Строительные материалы*. 2019. № 10. С. 58–63. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-775-10-58-63

24. *Козлов С.Д., Коридзе В.Г.* Водостойкие гипсовые вяжущие с применением промышленных отходов // *Бюллетень науки и практики*. 2017. № 4 (17). С. 135–138. DOI: 10.5281/zenodo.546276

25. *Иващенко Ю.Г., Страхов А.В., Евстигнеев С.А.* Влияние наличия водорастворимых полимеров на водостойкость композиционного вяжущего // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2018. № 5 (31). С. 30–33.

26. *Игленкова М.Г.* Физико-химические закономерности получения композиционных материалов на основе фосфогипса : дис. ... канд. хим. наук. Саратов, 2013. 170 р.

27. *Абишев А.Т.* Композиционные ангидритовые вяжущие и бетоны из фосфогипса : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Алматы, 2010. 25 с.

28. *Чернышева Н.В.* Водостойкие гипсовые композиционные материалы с применением техногенного сырья : дис. ... д-ра техн. наук. Белгород, 2015. 434 с.

29. Патент SU 1470830A1. Композиция для устройства оснований дорожных одежд / *Н.Ф. Сасько, И.П. Гаркавенко, А.А. Борисенко, Н.Г. Свиначенко, Е.С. Евстигнеева*. № 4274917/29-33; заявл. 01.07.87; опубл. 07.04.89. Бюл. № 13. 2 с.

30. Патент SU 1551765A1. Композиция для устройства покрытий и оснований автомобильных дорог / *Ч.Я. Азарова, И.В. Глуховский, В.М. Ткачук, А.Н. Феценко*. № 4348295/31-33; заявл. 22.12.87; опубл. 23.03.90. Бюл. № 11. 2 с.

31. Патент SU 1652419A1. Способ устройства дорожной одежды / *М.И. Кучма, Т.А. Мельник, И.А. Груздев, Н.Б. Гладкая*. № 4660399/33; заявл. 10.03.89; опубл. 30.05.91. Бюл. № 20. 2 с.

32. Патент SU 1698339A1. Способ устройства дорожного покрытия / *И.В. Карнова, Х.А. Аронович, А.Н. Аминов, М.Я. Гринберг*. № 4751334/33; заявл. 23.10.89; опубл. 15.12.91. Бюл. № 46. 2 с.

33. *Yang M., Xie Y., Pang Y.* Durability of Lime-Fly Ash Stabilized Soil Activated by Calcined Phosphogypsum // *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 168–170. Pp. 133–138. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.168-170.133

34. *Кочетков А.В., Щеголева Н.В., Коротковский С.А.* Устройство слоев транспортных сооружений из фосфогипса полугидрата (отхода побочного продукта производства азотно-фосфорных удобрений) // *Транспортные сооружения*. 2019. Т. 6. № 1. С. 1–10.

35. *Кожухов А.Г., Коновалов С.В., Ратинов В.Б.* Особенности использования смешанного вяжущего на основе фосфогипса в дорожном строительстве // *Сборник трудов СоюзДорНИИ*. 1986. С. 79–86.

36. *Zeng L.-L., Bian X., Zhao L., Wang Y.-J., Hong Z.-S.* Effect of phosphogypsum on physiochemical and mechanical behaviour of cement stabilized dredged soil from Fuzhou, China // *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2021. Vol. 25. P. 100195. DOI: 10.1016/j.gete.2020.100195

37. *De Rezende L.R., da Silva Curado T., Silva M.V., dos Anjos Mascarenha M.M., Metogo D.A.N., Neto M.P.C. et al.* Laboratory Study of Phosphogypsum, Stabilizers, and Tropical Soil Mixtures // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. Vol. 29. Issue 1. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001711

38. Патент RU 2701007C1. Способ получения гранулированного асфальтовяжущего на основе фосфогипса / И.В. Голиков, В.М. Готовцев, А.А. Игнатьев, Д.В. Герасимов. № 2018124579; заявл. 04.07.18; опубл. 24.09.2019. Бюл. № 27. 10 с.
39. Патент RU 2436819C1. Битумно-минеральная композиция / Ю.Г. Борисенко, С.О. Яшин, А.А. Солдатов. № 2010121284/05; заявл. 25.05.2010; опубл. 20.12.2011. Бюл. № 35. 5 с.
40. Каишач В.А., Лазарева Т.Л. Исследование комплексных гипсовых вяжущих для устройства автомобильных дорог // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. № 1–3. С. 337–340.
41. Havanagi V.G., Sinha A., Parvathi G.S. Characterization of Phosphogypsum waste for Road construction // Indian Geotechnical Conference. 2018. Pp. 1–5.
42. Anagnostopoulos A., Gaidajis G. Laboratory investigation of the potential use of phosphogypsum as embankment construction material // The 9th International Concrete Conference, Environment, Efficiency and Economic Challenges for Concrete. 2020.
43. Maazoun H., Bouassida M. Phosphogypsum Management Challenges in Tunisia // Contemporary Issues in Soil Mechanics. 2019. Pp. 88–104. DOI: 10.1007/978-3-030-01941-9_7
44. Karoui H., Maazoun H., Bouassida M. Numerical simulation of wet deposited Phosphogypsum embankment resting on dry deposited one // Arabian Journal of Geosciences. 2020. Vol. 13. Issue 16. DOI: 10.1007/s12517-020-05783-z
45. Maazoun H., Bouassida M. Phosphogypsum Management Perspectives. Massive Valorization or Massive Storage // Acta Scientific Agriculture. 2019. Vol. 3. Issue 8. Pp. 184–189. DOI: 10.31080/ASAG.2019.03.0584
46. Saenko Y.V., Shiranov A.M., Nevzorov A.L. Properties of phosphogypsum as technogenic soil // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945. Issue 1. P. 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012067
47. Broers J.W., Hoefnagels F.E.T., Roskamp H.L. Life Cycle Assessment of a Road Embankment in Phosphogypsum Preliminary Results // Studies in Environmental Science. 1994. Pp. 539–542. DOI: 10.1016/S0166-1116(08)71486-9
48. Солдаткин С.И., Хохлов А.Е. К вопросу о возможности использования фосфогипса в дорожном строительстве // Недра Поволжья и Прикаспия. 2018. № 93. С. 73–76.
49. Patent US 11319676B2. Construction method for using phosphogypsum in embankment improvement / Li Zhiqing. 2019.
50. Патент SU 1700145A1. Дорожная насыпь / Н.Ф. Сасько, А.А. Борисенко, В.П. Любацкий, В.К. Вырожемский. № 4705850/03; заявл. 15.06.89; опубл. 23.12.91. Бюл. № 47. 3 с.
51. Schaffner M. Premiers resultats relatifs aux conditions de stockage et d'utilisation du phosphogypse dans les remblais rentiers // Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussees. Numero special VII, 197. Pp. 80-90.
52. Патент SU 1605957A1. Способ рекультивации нарушенных земель / В.Л. Звягинцев, Г.Л. Звягинцева, Т.Г. Звягинцева. № 4659789; заявл. 07.03.89; опубл. 15.11.90. Бюл. № 42. 4 с.
53. Papastefanou C., Stoulos S., Ioannidou A., Manolopoulou M. The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 89. Issue 2. Pp. 188–198. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2006.05.005
54. Park S.-H., Han B., Lee W.-B., Kim J. Environmental Impact of Phosphogypsum on the Ecotoxicity of A. salina, D. magna, O. latipes, and S. capricornutum // Journal of Soil and Groundwater Environment. 2016. Vol. 21. Issue 2. Pp. 15–21. DOI: 10.7857/jsge.2016.21.2.015

Поступила в редакцию 13 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 4 декабря 2022 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2023 г.

О Б АВТОРАХ: Анастасия Вадимовна Довыденко — студентка, лаборант центра компетенций в сфере использования вторичных материальных ресурсов в строительной отрасли; **Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)**; 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5; ORCID: 0000-0003-0119-7127; anastasiacircus@yandex.ru;

Александр Александрович Лунёв — кандидат технических наук, директор центра компетенций в сфере использования вторичных материальных ресурсов в строительной отрасли; **Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)**; 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5; РИНЦ ID: 2836-4151, Scopus: 57198893763, ResearcherID: AAZ-4755-2021, ORCID: 0000-0001-5857-1891; lunev.al.al@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Manzhina S.A., Denisov V.V., Denisova I.A. Using of large-scale waste phosphogypsum to reduce emissions of SO₂-containing coal power plant. *Engineering journal of Don*. 2014; 13(28):1-11. (rus.).
2. Kapustin F.L., Afanas'eva M.A., Mityushov N.A., Bednyagin S.V. Features of the composition and properties of the phosphogypsum processing product. *Innovations in materials science and metallurgy : materials of the IV International Interactive Scientific and Practical Conference*. 2015; 401-404. (rus.).
3. Mtibaa M. *Gypsum binder based on Tunisian phosphogypsum : thesis ... candidate of technical sciences*. Belgorod, 2009; 203. (rus.).
4. Tsioka M., Voudrias E.A. Comparison of alternative management methods for phosphogypsum waste using life cycle analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 266:121386. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121386
5. Bituh T., Petrinc B., Skoko B., Babić D., Rašeta D. Phosphogypsum and its Potential Use in Croatia: Challenges and Opportunities. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 2021; 72(2):93-100. DOI: 10.2478/aiht-2021-72-3504
6. El-Didamoni H., Ali M.M., Avvad N.S., Attalla M.F., Fawzi M.M. Radiological characteristics and processing of radioactively contaminated phosphogypsum waste. *Radiochemistry*. 2013; 55(4):378-383. (rus.).
7. Edamenko A.S. On the issue of environmental safety of gypsum binders. *International Research Journal*. 2013; 1-1(8):55-56. (rus.).
8. Kumar S.S., Kumar A., Singh S., Malyan S.K., Baram S., Sharma J. et al. Industrial wastes: Fly ash, steel slag and phosphogypsum- potential candidates to mitigate greenhouse gas emissions from paddy fields. *Chemosphere*. 2020; 241:124824. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124824
9. Isaev V.S., Yumashev V.M., Grebenevich N.P. The main directions of research of Soyuzdornii on the use of phosphogypsum for the construction of pavement. *Collection of works of Soyuzdornii*. 1986; 5-13. (rus.).
10. Kopylev B.A. *Phosphoric Acid extraction technology*. Leningrad, Khimiya, 1981; 224. (rus.).
11. Kaganovich E.V., Asmatulaev B. Results of research on the use of phosphogypsum as a component of binders for strengthening soils and stone materials. *Collection of works of Soyuzdornii*. 1986; 35-44. (rus.).
12. Gerasimov D.V., Ignatev A.A., Gotovtsev V.M. Phosphogypsum as a component of a dispersed-reinforced composite on the example of a granulated asphalt-concrete mix. *Bulletin of Eurasian Science*. 2020; 12(5):35. (rus.).
13. Kukin L.A., Okolelova E.Yu., Kukina O.B., Volokitina O.A. An innovative way to increase the life cycle of phosphogypsum use as an import substitution and economic growth factor. *Fundamental Research*. 2020; 5:95-99. DOI: 10.17513/fr.42753 (rus.).
14. Kutepova N.A., Korobanova T.N. Features of deformation development in phosphogypsum dumps near the Balakovo town in the Saratov region. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017; 10:132-140. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-132-140 (rus.).
15. Tayibi H., Choura M., López F.A., Alguacil F.J., López-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum. *Journal of Environmental Management*. 2009; 90(8):2377-2386. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007
16. Sagatullin D.G. *High-strength gypsum cement puzzolan binder : thesis ... candidate of technical sciences*. Kazan, 2010; 210. (rus.).
17. Udalova E.A., Gabitov A.I., Shuvaeva A.R., Nedoseko I.V., Chernova A.R., Yamilova V.V. Current status and perspective of using of phosphogypsum for producing of cementing materials. *History and Pedagogy Natural Science*. 2016; 4:55-58. (rus.).
18. Gordashevskii P.F., Dolgorev A.V. *Production of gypsum binders from gypsum-containing waste*. Moscow: Stroyizdat, 1987; 105. (rus.).
19. Derevaynko V.N., Telianov V.A. The methods of high temperature porous heat-insulation materials production. *Bulletin of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2010; 2-3(143-144):68-73. (rus.).
20. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Poluxin O.N. The use of composite binders in mining. *Dry Building Mixes*. 2014; 6:17-20. (rus.).
21. Patent SU 1723066A1. *Method for obtaining gypsum binder from phosphogypsum* / E.A. Karpovich, G.L. Zvyagintsev, A.G. Kasyan, R.A. Vashchenkov. No. 4854279/26; dec. 07/26/90; publ. 03/30/92. Bull. No. 12; 4. (rus.).
22. Miheenkov M.A. Pressing as a way to increase the water resistance of gypsum binder. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2009; 4:158-166. (rus.).
23. Galautdinov A.R., Mukhametrakhimov R.Kh. Features of hydration of modified gypsum-cement-pozzolan binder. *Construction Materials*. 2019; 10:58-63. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-775-10-58-63 (rus.).
24. Kozlov S., Koridze V. Water-resistant gypsum binders with the use of industrial wastes. *Bulletin of Science and Practice*. 2017; 4(17):135-138. DOI: 10.5281/zenodo.546276 (rus.).
25. Evstigneev S.A., Strakhov A.V., Ivashchenko Yu.G. Influence of availability of water-soluble polymers on water resistance of composite binding. *Technical Regulation in Transport Construction*. 2018; 5(31):30-33. (rus.).
26. Iglenkova M.G. *Physico-chemical regularities of obtaining composite materials based on phosphogyp-*

sum : dissertation ... candidate of chemical sciences. Saratov, 2013; 170. (rus.).

27. Abishev A.T. *Composite anhydrite binders and concretes from phosphogypsum : thesis ... candidate of technical sciences.* Almaty, 2010; 25. (rus.).

28. Chernysheva N.V. *Water-resistant gypsum composite materials with the use of technogenic raw materials : thesis ... candidate of technical sciences.* Belgorod, 2015; 434. (rus.).

29. Patent SU 1470830A1. *Composition for the device of pavement foundations* / N.F. Sasko, I.P. Garkavenko, A.A. Borisenko, N.G. Svinarenko, E.S. Evstigneeva. No. 4274917/29-33; dec. 07/01/87; publ. 04/07/89. Bull. No. 13; 2. (rus.).

30. Patent SU 1551765A1. *Composition for the device of coverings and bases of automobile roads* / Ch.Ya. Azarova, I.V. Glukhovskiy, V.M. Tkachuk, A.N. Feshchenko. No. 4348295/31-33; dec. 12/22/87; publ. 03/23/90. Bull. No. 11; 2. (rus.).

31. Patent SU 1652419A1. *Way of the device of pavement* / M.I. Kuchma, T.A. Melnik, I.A. Gruzdev, N.B. Smooth. No. 4660399/33; dec. 03/10/89; publ. 05/30/91. Bull. No. 20; 2. (rus.).

32. Patent SU 1698339A1. *Way of the device of a pavement* / I.V. Karpova, H.A. Aronovich, A.N. Aminov, M.Ya. Greenberg. No. 4751334/33; dec. 10/23/89; publ. 12/15/91. Bull. No. 46; 2. (rus.).

33. Yang M., Xie Y., Pang Y. Durability of Lime-Fly Ash Stabilized Soil Activated by Calcined Phosphogypsum. *Advanced Materials Research.* 2010; 168-170:133-138. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.168-170.133

34. Kochetkov A.V., Shchegoleva N.V., Korotkovskiy S.A. Arrangement of layers of transport structures from phosphogypsum semihydrate (waste-a by-product of the production of nitrogen-phosphorus fertilizers). *Transport Structures.* 2019; 6(1):1-10. (rus.).

35. Kozhuhov A.G., Konovalov S.V., Ratinov V.B. Features of the use of a mixed binder based on phosphogypsum in road construction. *Collection of works of Soyuzdornii.* 1986; 79-86. (rus.).

36. Zeng L.-L., Bian X., Zhao L., Wang Y.-J., Hong Z.-S. Effect of phosphogypsum on physiochemical and mechanical behaviour of cement stabilized dredged soil from Fuzhou, China. *Geomechanics for Energy and the Environment.* 2021; 25:100195. DOI: 10.1016/j.gete.2020.100195

37. De Rezende L.R., da Silva Curado T., Silva M.V., dos Anjos Mascarenha M.M., Metogo D.A.N., Neto M.P.C. et al. Laboratory Study of Phosphogypsum, Stabilizers, and Tropical Soil Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering.* 2017; 29(1). DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001711

38. Patent RU 2701007C1. *The method of obtaining granulated asphalt binder based on phosphogypsum* / I.V. Golikov, V.M. Gotovtsev, A.A. Ignatiev,

D.V. Gerasimov. No. 2018124579; dec. 07/04/18; publ. 09/24/2019; Bull. No. 27; 10. (rus.).

39. Patent RU 2436819C1. *Bitumen-mineral composition* / Yu.G. Borisenko, S.O. Yashin, A.A. Soldiers. No. 2010121284/05; dec. May 25, 2010; publ. 12/20/2011. Bull. No. 35; 5. (rus.).

40. Kushluch V.A., Lazareva T.L. Research of complex gypsum binders for device car roads. *Far East: Problems of Development of Architectural and Construction Complex.* 2019; 1-3:337-340. (rus.).

41. Havanagi V.G., Sinha A., Parvathi G.S. Characterization of Phosphogypsum waste for Road construction. *Indian Geotechnical Conference.* 2018; 1-5.

42. Anagnostopoulos A., Gaidajis G. Laboratory investigation of the potential use of phosphogypsum as embankment construction material. *The 9th International Concrete Conference, Environment, Efficiency and Economic Challenges for Concrete.* 2020.

43. Maazoun H., Bouassida M. Phosphogypsum Management Challenges in Tunisia. *Contemporary Issues in Soil Mechanics.* 2019; 88-104. DOI: 10.1007/978-3-030-01941-9_7

44. Karoui H., Maazoun H., Bouassida M. Numerical simulation of wet deposited Phosphogypsum embankment resting on dry deposited one. *Arabian Journal of Geosciences.* 2020; 13(16). DOI: 10.1007/s12517-020-05783-z

45. Maazoun H., Bouassida M. Phosphogypsum Management Perspectives. Massive Valorization or Massive Storage. *Acta Scientific Agriculture.* 2019; 3(8):184-189. DOI: 10.31080/ASAG.2019.03.0584

46. Saenko Y.V., Shiranov A.M., Nevzorov A.L. Properties of phosphogypsum as technogenic soil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020; 945(1):012067. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012067

47. Broers J.W., Hoefnagels F.E.T., Roskamp H.L. Life Cycle Assessment of a Road Embankment in Phosphogypsum Preliminary Results. *Studies in Environmental Science.* 1994; 539-542. DOI: 10.1016/s0166-1116(08)71486-9

48. Soldatkin S.I., Hohlov A.E. On the possibility of using phosphogypsum in road construction. *The bowels of the Volga and Caspian regions.* 2018; 93:73-76. (rus.).

49. Patent US 11319676B2. *Construction method for using phosphogypsum in embankment improvement* / Li Zhiqing. 2019.

50. Patent SU 1700145A1. *Road embankment* / N.F. Sasko, A.A. Borisenko, V.P. Lubatsky, V.K. Vyrozhemsky. No. 4705850/03; dec. 06/15/89; publ. 12/23/91. Bull. No. 47; 3. (rus.).

51. Schallfner M. Premiers resultats relatifs aux conditions de stochage et d utjlsatlon du phosphogupse dans les remblals rentiers. *Bulletin de liaison des laboratolres des ponts et chaussees.* Numero special VII, 197; 80-90.

52. Patent SU 1605957A1. *The method of reclamation of disturbed lands* / V.L. Zvyagintsev, G.L. Zvyagintsev, T.G. Zvyagintsev. No. 4659789; dec. 03/07/89; publ. 11/15/90. Bull. No. 42; 4. (rus.).

53. Papastefanou C., Stoulos S., Ioannidou A., Manolopoulou M. The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact. *Journal of*

Environmental Radioactivity. 2006; 89(2):188-198. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2006.05.005

54. Park S.-H., Han B., Lee W.-B., Kim J. Environmental Impact of Phosphogypsum on the Ecotoxicity of *A. salina*, *D. magna*, *O. latipes*, and *S. capricornutum*. *Journal of Soil and Groundwater Environment*. 2016; 21(2):15-21. DOI: 10.7857/jsge.2016.21.2.015

Received September 13, 2022.

Adopted in revised form on December 4, 2022.

Approved for publication on February 6, 2023.

B I O N O T E S : **Anastasiya V. Dovydenko** — student, laboratory assistant of the Competence Center in the Use of Secondary Material Resources in the Construction Industry; **Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)**; 5 Mira ave., Omsk, 644080, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0119-7127; anastasiacircus@yandex.ru;

Aleksandr A. Lunev — Candidate of Technical Sciences, Director of the Competence Center in the Use of Secondary Material Resources in the Construction Industry; **Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)**; 5 Mira ave., Omsk, 644080, Russian Federation; ID RSCI: 2836-4151, Scopus: 57198893763, ResearcherID: AAZ-4755-2021, ORCID: 0000-0001-5857-1891; lunev.al.al@gmail.com.

Contribution of the author: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors have no conflicts of interest to declare.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.51

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282

Развитие внедрения технологий информационного моделирования при реализации жилищных инвестиционно- строительных проектов

Аркадий Николаевич Ларионов, Антон Викторович Приходько

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Показано, что для оптимизации и последующего развития жилищного строительства необходимо создание единой цифровой платформы, базирующейся на среде общих данных, введении электронного документооборота между всеми участниками инвестиционно-строительного проекта (ИСП). Продемонстрировано, что внедрение этих процессов в проект позволит осуществлять наблюдение и контроль над экономическими составляющими строительного проекта, а также создаст единое информационное пространство, используемое для хранения документов, с разделенными правами доступа к информации, что обеспечит единообразие, истинность информации, связанной с проектом.

Материалы и методы. В процессе поиска рациональных вариантов технико-экономических решений при реализации ИСП жилищного профиля использованы методы оптимизации, возможность применения которых обеспечивается многовариантностью решений при внедрении цифровых технологий BIM, используемых для оптимизации проектов.

Результаты. Основным результатом представленных исследований заключается в формировании с опорой на функцию потерь по Г. Тагути модели оценки экономической эффективности вариантов ИСП жилищного профиля, в которой учтены суммарные потери экономической эффективности при реализации различных вариантов технологий ИСП жилищного профиля.

Выводы. Полученные результаты обеспечивают возможность определения с помощью предложенной модели оценки экономической эффективности: вариантов ИСП жилищного профиля области допустимых вариантов технологий реализации проекта, целесообразных с экономической точки зрения, а также областей недопустимых вариантов технологий реализации проекта «слишком плохо для потребителя» и «слишком дорого для производителя»; наилучшего варианта проекта; совершенствования обобщенного алгоритма применения технологии BIM в практике жилищного строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: развитие, использование потенциала, цифровые технологии проектирования BIM, реализация, инвестиционно-строительные проекты, жилищный профиль

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ларионов А.Н., Приходько А.В. Развитие внедрения технологий информационного моделирования при реализации жилищных инвестиционно-строительных проектов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 270–282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282

Автор, ответственный за переписку: Антон Викторович Приходько, prihodkoanvik@yandex.ru.

Further introduction of information modelling technologies in the course of implementation of investment projects in the field of housing construction

Arkady N. Larionov, Anton V. Prikhodko

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

ABSTRACT

Introduction. Modern housing construction requires (1) a single digital platform that has a common data environment, (2) workflow digitization, involving all stakeholders of an investment and construction project. The authors demonstrate that the implementation of this approach will ensure not only the monitoring and control of financial values of construction, including disbursement schedules and a single consolidated database for all documents on each construction project showing access rights to information, but it will also ensure the integrity and reliability of information required for the implementation of day-to-day urban planning activities, as well as quick and flexible integration with state information systems.

Materials and methods. Optimization methods were used to find rational engineering and economic solutions for investment and residential housing construction projects. Multivariate analysis was employed to substantiate the applicability of solutions in the process of introducing digital BIM technologies aimed at identifying the most effective project options.

Results. The main result of the presented research is the application of the G. Taguchi loss function to devise a model for assessing the economic efficiency of options of an investment and construction project, that take into account the total loss of economic efficiency in the course of implementing various technologies of an investment and housing construction project.

Conclusions. The results enable the co-authors to use the proposed model to evaluate the economic efficiency and to identify (1) options of an investment and housing construction project, (2) the range of acceptable options of project implementation that are economically feasible, as well as (3) ranges of unacceptable project implementation options that are “too bad for the consumer” and “too expensive for the producer”; (4) the best project option; (5) the way to improve the generalized algorithm of BIM technology application in practical housing construction.

KEYWORDS: development, use of potential, digital technologies, BIM design, implementation, investment and construction projects, housing construction

FOR CITATION: Larionov A.N., Prikhodko A.V. Further introduction of information modelling technologies in the course of implementation of investment projects in the field of housing construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):270-282. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.270-282 (rus.).

Corresponding author: Anton V. Prikhodko, prihodkoanvik@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проводимых в настоящее время исследований по изучению и последующему практическому использованию возможностей цифровых технологий при реализации инвестиционно-строительных проектов (ИСП) жилищного профиля обусловлена значительным потенциалом этого перспективного инструментария.

В ряде работ [1] авторами данной статьи выявлено и обосновано, что в современном жилищном строительстве необходима реализация единого информационного пространства для оптимизации взаимодействия между участниками проекта¹. Создание такой системы не только позволит улучшить контроль над экономическими составляющими проекта, упорядочить документооборот, но и обеспечит единообразие, истинность информации, связанной с проектом [1].

Современные цифровые технологии, с точки зрения К. Шваба [2], составившие технологическое ядро четвертой промышленной революции, все глубже проникают в производственные и социальные сферы деятельности человека. При этом, если еще пять лет назад (в 2017 г.), по оценкам McKinsey Global Institute, строительная отрасль характеризовалась низким уровнем цифровизации, опережая по этому показателю только сельскохозяйственную отрасль (рис. 1), то в последние годы уровень цифровизации строительства существенно возрос.

О темпах роста цифровизации строительной сферы можно судить, например, по мировой динамике объема (емкости) центров (хранения) обработки данных (ЦОД), увеличившейся за последние 5 лет в 8 раз (рис. 2).

Сейчас в рамках ИСП, в том числе относящихся к жилищной сфере, участники проектов все чаще внедряют в цикл реализации BIM (ТИМ) технологии, объединяющие целый комплекс базовых сквозных цифровых технологий (рис. 3).

Следует отметить, что развитие процессов реализации в строительной сфере BIM-технологий также стимулируется принимаемыми законодательными и распорядительными документами, в частности Постановлением Правительства РФ от 05.03.2021 № 331², в котором установлены случаи, когда ведение информационной модели (ИМ) объекта капитального строительства (ОКС) становится обязательным.

При всей очевидности преимуществ, обеспечиваемых использованием BIM-технологий в строительстве^{3,4}, в таких конструктивно и технологически сложных отраслях материального производства всегда возникает вопрос о том, в какой мере можно допустить замену части материальных процессов на этапе проектирования зданий и сооружений (и не только) надежной информацией, предоставляемой ТИМ. То есть существует проблема определения области ограничения возможностей использования BIM-технологий. Это, с одной стороны.

¹ Ларионов А.Н., Уварова С.С., Канхва В.С. и др. Отчет «Цифровизация строительной отрасли на всех этапах жизненного цикла объекта капитального строительства». М.: НИУ МГСУ, 2022. 135 с.

² Об установлении случая, при котором застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства: Постановление Правительства Российской Федерации от 05.03.2021 № 331. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202103100026>

³ 14 основных преимуществ BIM перед CAD. URL: <https://www.bimtechnology.pro/preimushhestva-bim/>

⁴ Трёхмерные преимущества. Строительство. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4613764#:~:text=Основными%20преимуществами%20использования%20BIM-технологий%20в,любой%20сложности%2C%20из%20любого%20материала>

	Общая цифровизация General digitalization	Распространенность цифровизации Digitalization outspread	Цифровизация активов Digitalization of assets	Транзакции Transactions	Взаимодействие Interactions	Бизнес-процессы Business processes	Маркетинг Marketing	Распространение цифровизации среди работников Dissemination of digitalization among employees	Цифровой капитал Digital capital	Цифровизация рабочих процессов Digitalization of work processes
Медиа Media	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Профессиональные сервисы Professional services	Green	Green	Green	Orange	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Финансы Finance	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Оптовый бизнес Wholesale business	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Производство Production	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow
Горнодобывающая промышленность Mining industry	Red	Red	Yellow	Green	Red	Orange	Red	Orange	Yellow	Red
Химическое производство Chemical production	Yellow	Red	Yellow	Green	Yellow	Green	Red	Yellow	Green	Yellow
Купля/продажа недвижимости Purchase/sale of real estate	Yellow	Yellow	Red	Green	Red	Orange	Green	Green	Yellow	Yellow
Образование Education	Yellow	Green	Orange	Orange	Green	Red	Red	Yellow	Yellow	Yellow
Ретейл Retail business	Yellow	Green	Green	Orange	Green	Green	Green	Orange	Orange	Red
Локальные сервисы Local services	Yellow	Green	Green	Orange	Green	Orange	Green	Orange	Orange	Yellow
Здравоохранение Healthcare	Orange	Yellow	Orange	Red	Yellow	Orange	Yellow	Red	Red	Orange
Строительство Construction	Red	Red	Yellow	Red	Red	Red	Yellow	Red	Red	Orange
Аграрная промышленность Agriculture	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red

Рис. 1. Сравнение отраслей экономики по индексу цифровизации, выполненное McKinsey Global Institute⁵

Fig. 1. Comparison of industries according to the digitalization index, made by McKinsey Global Institute⁵

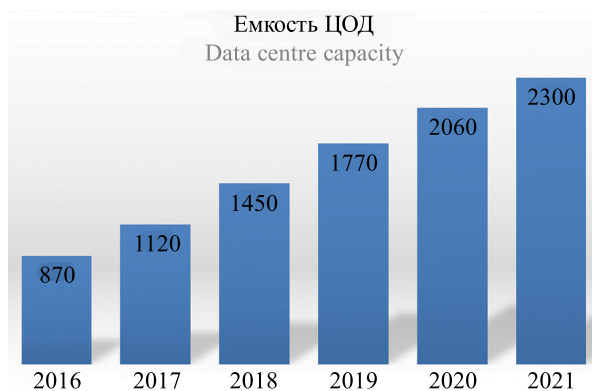


Рис. 2. Динамика емкости ЦОД в мире в период с 2016 по 2021 гг. (в эксабайтах) [3]

Fig. 2. Global behaviour of data centres in 2016 to 2021 (in exabytes) [3]

С другой стороны, имеется проблема поиска путей наращивания возможностей использования потенциала BIM-технологий, а также внедрения этих технологий на всех этапах реализации проекта. В качестве одной из таких задач стоит рассматривать поиск рациональных вариантов технико-экономических решений при реализации ИСП жилищного профиля, обеспечиваемых многовариантностью решений при применении BIM-технологий. Решение указанной оптимизационной задачи и предопределило актуальность темы данного исследования.

Цель исследования — разработка подхода к определению с использованием цифровых технологий проектирования BIM рациональных вариантов технико-экономических решений при реализации ИСП жилищного профиля, обеспечивающих их эффективность.

⁵ AR Solutions for Construction on the Rise — 2017 Industry Report Overview, January 9, 2018. URL: <https://www.intellectsoft.net/blog/ar-solutions-for-construction/>

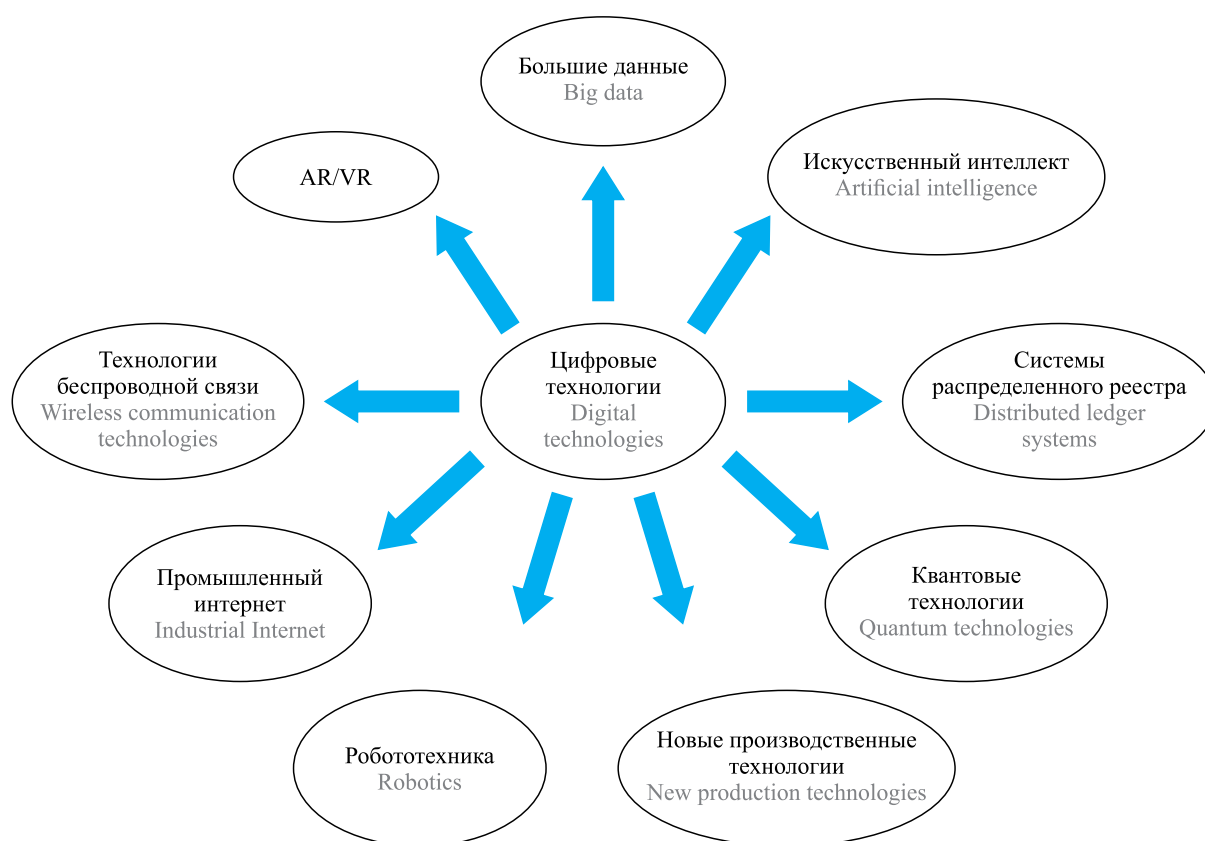


Рис. 3. Состав базовых сквозных цифровых технологий современной экономики [4]

Fig. 3. Breakdown of basic end-to-end digital technologies in the modern economy [4]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованы материалы известных научных трудов, а также информационно-аналитические материалы, посвященные методам применения цифровых технологий проектирования BIM для эффективной реализации ИСП, таких авторов, как Р.Г. Абакумов, А.Е. Наумов, А.Г. Зобова [5]; Е.Г. Анисимов [6]; С.С. Бачурина [7]; К.К. Бородулин [8]; В.Н. Владыкин [9]; Т.С. Голосова [10]; А.М. Горшков, С.А. Железнов, Р.А. Лемешко,

С.В. Пойда [11]; В.П. Грахов [12]; С.А. Губарев [13]; К.И. Кожевников, А.Д. Нуждин [14]; З.У. Кужакова, А.Х. Байбурун [15]; В.С. Рашев, Н.С. Астафьева, Л.С. Рогожкин, В.Ю. Григорьев [16]; О.Г. Скрыпник [17]; С.С. Уварова, А.А. Паненков, Я.Л. Сонин [18]; В.В. Черняев [19]; Н.П. Четверик [20] и др.

Методическую базу исследований составили руководящие документы по вопросам применения цифровых технологий проектирования BIM в строительстве^{1, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11}.

⁶ BIM-Стандарт инфраструктура. Руководство по информационному моделированию инфраструктурных объектов и формированию стандарта проектной организации с применением решений компании Autodesk. Версия 2.0. М., 2017. URL: <https://infrabim.csd.ru/upload/news/bim-standart-infrastruktury.pdf>

⁷ BIM-Эксперт. Информационный ресурс о BIM-моделировании. URL: <https://1-bim.ru/нормативная-документация-по-bim/>

⁸ О типовых вопросах, в части применения положений Постановления Правительства РФ от 05.03.2021 № 331 : письмо Минстроя России от 07.04.2022 № 14710-КМ/16.

⁹ Руководство по информационному моделированию (BIM) для заказчиков на примере промышленных объектов. Рекомендации по применению технологии информационного моделирования службами заказчика при организации, планировании и управлении инвестиционно-строительными проектами. Методические материалы по разработке технического задания на проектирование. Версия 1.0. М. : ООО «КОНКУРАТОР», 2019. 100 с.

¹⁰ СП 333.1325800.2017. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 18.09.2017 № 1227/пр и введен в действие с 19.03.2018.

¹¹ Требования к информационным моделям объектов капитального строительства. Часть 1. Общие требования к цифровым моделям зданий для прохождения экспертизы при использовании технологии информационного моделирования. Редакция 4.0. М. : Государственное автономное учреждение города Москвы «Московская государственная экспертиза», 2019. URL: <https://www.npmaap.ru/images/docs/bim/01.pdf>

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный анализ известных литературных источников позволил сформировать следующий обобщенный алгоритм применения технологии BIM в практике жилищного строительства, представленный на рис. 4.

Алгоритм применения BIM-технологий в практике жилищного строительства (рис. 4) подразумевает использование:

- новых производственных технологий (рис. 3) при разработке 3D-модели (блок 1 алгоритма на рис. 4);
- нейронных технологий и технологий искусственного интеллекта (рис. 3) при анализе результатов моделирования в процессе проектирования (блок 2 на рис. 4);
- технологий систем распределенного реестра (рис. 3) при организации взаимодействия участников проекта в рамках единого информационного пространства (блок 3 на рис. 4);

- технологий больших данных (рис. 3) при разработке справочников, содержащих характеристики элементов и рабочих процессов, используемых в проекте (блок 4 на рис. 4);

- технологий промышленного интернета вещей (рис. 3) при создании исполнительной модели (цифрового двойника) (рис. 5) возведенных в рамках ИСП конструкций здания и сравнение ее с проектной 3D-моделью (блок 5 на рис. 4);

- технологий виртуальной и дополненной реальности (рис. 3) при формировании облака точек конструкции зданий (блок 6 на рис. 4).

Область использования зависит от детализации проработки BIM, которую условно делят на три уровня (рис. 5).

Конечно, алгоритм применения BIM-технологий в практике жилищного строительства, представленный на рис. 4, включает и другие базовые сквозные цифровые технологии современной экономики (рис. 3).

Блок 1. Разработка 3D-модели Block 1. Development of a 3D model	Отражает архитектуру, инженерные сети, территорию строительства Conveys architecture, utilities, construction area
Блок 2. Анализ результатов моделирования в процессе проектирования Block 2. Analysis of simulation results in the design process	Поиск коллизий для дальнейшей экономии ресурсов Search for collisions to save resources
Блок 3. Организация единого информационного пространства для всех участников ИСП Block 3. Establishment of a unified information space for all participants in an investment and construction project	В рамках единого информационного пространства происходит обмен информацией между всеми участниками ИСП Information exchange between all project participants takes place within a single information space
Блок 4. Разработка справочников, содержащих характеристики элементов и рабочие процессы, используемые в проекте Block 4. Development of reference books containing characteristics of elements and work processes used in the project	Справочники составляются для автоматизации формирования спецификаций и смет Reference books are compiled to automate the formation of specifications and budgets
Блок 5. Создание исполнительной (фактической) модели Block 5. Creation of an executive (actual) model	Для создания фактической модели используется лазерное сканирование Laser scanning is used to create the actual model
Блок 6. Формирование облака точек фасада Block 6. Development of the point cloud of the facade	Для формирования используется БПЛА с установленными 3D-сканерами A UAV (drone), having 3D scanners, is used for shaping
Блок 7. Формирование документации в автоматическом режиме Block 7. Document generation in the automated mode	

Рис. 4. Результаты формирования обобщенного алгоритма применения технологий BIM в практике жилищного строительства на основе анализа известных литературных источников

Fig. 4. Development of a generalized algorithm for the application of a BIM technology in the practice of housing construction based on the analysis of available literary sources

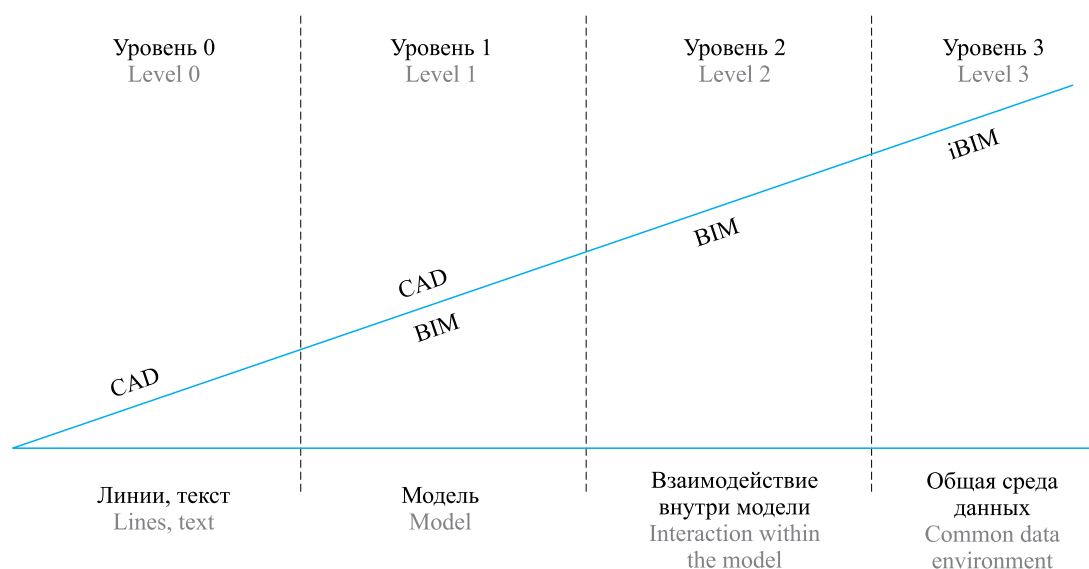


Рис. 5. Уровни детализации процесса создания цифрового двойника в рамках технологии BIM¹²

Fig. 5. Levels of detail of the process of creating a digital twin within the framework of the BIM technology¹²

Проектирование Design	Конструктивное бюро Design bureau
Привлечение инвестиций Fundraising	Инвестиционные группы, фондовые рынки и другие инвесторы Investment groups, stock markets and other investors
Согласование Approval	Федеральные и региональные органы исполнительной власти, органы местного самоуправления Federal and regional executive authorities, local authorities
Строительство Construction	Подрядчики, субподрядчики Contractors, subcontractors
Сдача объекта Facility commissioning	Государственный орган строительного контроля, пожарного надзора State building control, fire supervision authorities
Заселение Accommodation	Агентства недвижимости, государственные органы Real estate agencies, government authorities
Эксплуатация Operation	Управляющие компании Management companies
Техническое обслуживание Maintenance	Обслуживающие компании Service companies
Ремонт Repair	Обслуживающие компании, девелоперы Service companies, developers
Снос Demolition	Специальные организации Special organizations

Рис. 6. Этапы жизненного цикла объекта жилищного строительства и экономических субъектов хозяйствования, участвующих в реализации инвестиционно-строительного проекта жилищного профиля на каждом этапе его реализации

Fig. 6. Stages of the life cycle of a housing construction facility and entities involved in the implementation of an investment project in the field of housing construction at each stage of its implementation

¹² New Manchester base to meet growing demand for Building Information Modelling (BIM) solutions, MagiCAD and MagiCloud. URL: <https://www.magicad.com/en/blog/2016/05/progman-opens-uk-office/>

Общепризнано, что применение BIM-технологий в практике жилищного строительства позволяет экономить все виды ресурсов (временные, людские, материальные, финансовые) как на этапах проектирования, так и на этапе непосредственного строительства.

Многие специалисты отмечают, что существующие подходы к реализации BIM-технологий достаточно проблематично использовать для оценки даже стоимости ИСП жилищного профиля, несмотря на наличие в создаваемых базах данных справочников (блок 4 на рис. 4) спецификаций на материалы, элементы строительных конструкций и т.д., используемых для формирования смет расходов, не говоря уже об оценке эффективной реализации ИСП жилищного профиля.

С одной стороны, сложность внедрения в технологии BIM методов оценки эффективной реализации ИСП жилищного профиля заключается в том, что каждый объект жилищного профиля в определенной степени уникален и в его реализации на каждом этапе жизненного цикла (ЖЦ) (рис. 6) задействовано значительное количество экономических субъектов хозяйствования.

С другой стороны, в реализуемых алгоритмах использования цифровых технологий проектирования BIM (рис. 4) экономическая оценка эффективности реализации ИСП жилищного профиля не заложена в принципе.

В результате возникает ситуация, при которой при применении цифровых технологий проектирования BIM, как правило, не решается задача выбора рационального с экономической точки зрения варианта ИСП жилищного профиля, при том, что сама технология проектирования BIM на основе цифрового моделирования позволяет анализировать различные варианты реализации проекта.

В связи с этим целесообразно обратиться к методам надежного планирования по Г. Тагути [21].

Графическая модель экономических оценок эффективности реализации различных вариантов создания продукции по Г. Тагути, приведенная на рис. 7, наглядно свидетельствует о том, что любое отклонение в выборе варианта модели продукции от оптимума (в отличие от традиционного подхода, также представленного на рис. 7) несет в себе дополнительные издержки для производителя, а следовательно, и потери экономической эффективности (в нашем случае ИСП жилищного профиля).

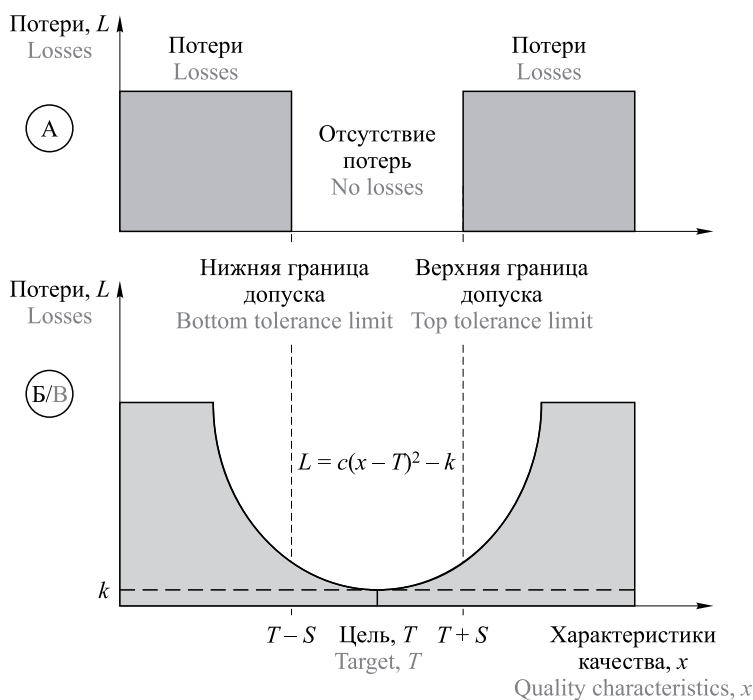


Рис. 7. Графическая модель экономических оценок эффективности реализации различных вариантов создания продукции по Г. Тагути

Fig. 7. Graphical model showing evaluations of efficiency of implementation of various product generation options according to G. Taguchi

Таким образом, методы надежного планирования по Г. Тагути предполагают выбор наилучшего варианта решения в условиях их возможной многовариантности (см. точку зрения Г. Тагути на потери

(рис. 7)) в отличие от подхода, при котором лица, принимающие решения, ограничиваются оценкой попадания результата в заданные границы допуса (см. традиционную точку зрения на потери (рис. 7)),

не фиксируя изменения эффективности вариантов решений в пределах между нижней и верхней границами допуска (т.е. считают все решения, попадающие в пределы указанных границ, равноценными, поскольку оценка их эффективности просто не проводится).

За основу для формирования модели оценки экономической эффективности вариантов ИСП жилищного профиля может быть принята функция потерь по Г. Тагути:

$$L = k(m - m_0)^2, \quad (1)$$

где L — суммарные потери для общества (включая производителя и потребителей) при производстве и реализации рассматриваемой продукции; k — постоянная функции потерь; m — фактическое значение характеристик продукции, определяющих ее потребительскую стоимость; m_0 — целевое значение характеристик продукции, соответствующее минимуму функции потерь (рис. 7).

Опираясь на функцию потерь по Г. Тагути (1), сформируем модель оценки экономической эффективности вариантов ИСП жилищного профиля в виде:

$$L_{\Sigma}(S(t_i)) = \Delta MP(S(t_i)) + \Delta CP(S(t_i)) + CO, \quad (2)$$

где $L_{\Sigma}(S(t_i))$ — суммарные потери экономической эффективности при реализации i -го варианта технологий (t_i) ИСП жилищного профиля; $S(t_i)$ — себестоимость реализации i -го варианта технологий (t_i) ИСП жилищного профиля; $\Delta MP(S(t_i))$ — потери экономической эффективности при реализации i -го варианта технологий (t_i) ИСП жилищного профиля, выражаемые в потере части рыночной стоимости при реализации проекта, достигающей существенных значений при использовании слишком дешевых технологий (экономия средств, затрачиваемых на технологии); $\Delta CP(S(t_i))$ — потери экономической эффективности при реализации i -го варианта технологий (t_i) ИСП жилищного профиля, выражаемые в потере



Рис. 8. Графическое представление модели оценки экономической эффективности вариантов t_i ИСП жилищного профиля

Fig. 8. Graphical representation of a model for assessing the economic efficiency of options t_i of an investment project in the field of housing construction

части прибыли по проекту в результате опережающего роста используемых технологий над ростом цены реализации проекта, достигающей существенных значений при использовании слишком дорогих технологий (т.е. в результате неоправданного роста себестоимости проекта), не имеющих адекватной оценки ценности потребительских свойств (ситуация недооценки потребителем «избыточного качества»); CO — издержки осуществления ИСП жилищного профиля, не зависящие от варианта технологий его реализации.

В данном рассмотрении под вариантом технологии ИСП жилищного профиля t_i понимается использование в рамках проекта различных вариантов строительных материалов, комплектующих, строительных конструкций, существенно влияющих на себестоимость реализации проекта $S(t_i)$.

Поскольку в основе модели оценки экономической эффективности вариантов ИСП жилищного профиля (2) лежит оценка суммарных потерь экономической эффективности при реализации i -го варианта технологий t_i ИСП жилищного профиля $L_{\Sigma}(S(t_i))$,



Рис. 9. Модифицированный вариант обобщенного алгоритма применения технологии BIM в практике жилищного строительства, учитывающий возможности оценки экономической эффективности вариантов ИСП жилищного профиля по предложенной модели

Fig. 9. A modified version of the generalized algorithm for applying BIM technology in practical housing construction, taking into account the evaluability of the economic efficiency of options of an investment and housing construction project according to the proposed model

то очевидно, что для поиска наилучшего варианта проекта $L_{\Sigma}^{opt}(S(t_i))$ необходимо найти минимум рассматриваемой функции:

$$L_{\Sigma}^{opt}(S(t_i)) = [\Delta MP(S(t_i)) + \Delta CP(S(t_i)) + CO] \rightarrow \min. \quad (3)$$

Графическое представление модели оценки экономической эффективности вариантов ИСП жилищного профиля (2) представлено на рис. 8.

В отличие от функции потерь по Г. Тагути (1) модель оценки экономической эффективности вариантов t_i ИСП жилищного профиля (2) описывается дискретными вариантами технологий, набор которых в рамках проекта всегда ограничен. Но это не мешает разработчикам ИСП жилищного профиля определить область допустимых вариантов технологий t_i реализации проекта (рис. 8), целесообразных с экономической точки зрения.

При этом область недопустимых вариантов технологий t_i реализации проекта «слишком плохо для потребителя» (рис. 8) может быть установлена с учетом как запросов потребителей, так и требований нормативной документации по обеспечению качества строительства, осуществляемого в рамках проектов жилищного профиля.

Область недопустимых вариантов технологий t_i реализации проекта «слишком дорого для производителя» (рис. 8) может быть определена с учетом требований по прибыльности и рентабельности ИСП жилищного профиля.

Предложенный модифицированный вариант обобщенного алгоритма применения технологии BIM в практике жилищного строительства (рис. 4), учитывающий возможности оценки экономической эффективности вариантов t_i ИСП жилищного профиля по предложенной модели, показан на рис. 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данном исследовании в рамках проблемы поиска путей наращивания возможностей использования потенциала BIM-технологий решалась задача поиска рациональных вариантов технико-экономических решений при реализации ИСП жилищного профиля, обеспечиваемых многовариантностью при применении BIM-технологий и направленных на поиск наиболее эффективных вариантов проектов.

Установлено, что на текущий момент технологии информационного моделирования большинством участников строительного рынка применяются лишь на этапе проектирования. Связано это с тем, что с течением ЖЦ ИСП количество участников, вовлеченных в проект, увеличивается, из-за чего становится сложнее структурировать взаимодействие участников и информационной модели. На текущем этапе внедрения технологий информационного моделирования в строительные процессы не определены четкие рекомендации по их использованию как на этапе строительного-монтажных работ (СМР), так и на этапе эксплуатации. Соответственно, ориентиром в раз-

витии ТИМ является связь ИМ и исполнителей СМР, а также связь цифрового двойника с эксплуатационными службами объекта (после его сдачи). Особенно важно обучение персонала, чтобы при работе с информационной моделью все участники понимали, какие преимущества она дает.

Сформирован обобщенный алгоритм применения технологии BIM в практике жилищного строительства, включающий блоки: разработки 3D-модели; анализа результатов моделирования в процессе проектирования; организации взаимодействия участников ИСП в рамках единого информационного пространства; разработки справочников, содержащих характеристики элементов и рабочих процессов, используемых в проекте; создания исполнительской (фактической) модели возведенных в рамках ИСП конструкций здания и сравнения ее с проектной 3D-моделью; формирования облака точек фасадов; формирования документации проекта в автоматическом режиме.

Показано, что представленный алгоритм применения технологии BIM в практике жилищного строительства подразумевает использование комплекса базовых сквозных цифровых технологий современной экономики, включая: новые производственные технологии; нейронные технологии и технологии искусственного интеллекта; технологии систем распределенного реестра; технологии больших данных; технологии промышленного интернета вещей; технологии виртуальной и дополненной реальности и др.

Обосновано, что внедрение новых стандартов скорости обмена информации позволит любым исполнителям в кратчайшие сроки с минимальной задержкой получать обновленные данные с цифрового двойника, что так же сократит время и ресурсы, однако для этого нужно подготовить нормативную базу оперативного одобрения правок в ИМ, для чего нужно развивать системы электронного документооборота (чем уже занимаются ответственные государственные органы в Российской Федерации). Помимо взаимодействия исполнителей СМР и проектировщиков, отрасль стремится к автоматическому формированию сметных документов, основываясь на обновляемой информационной модели. В этой области также нет единых стандартов, так как для того, чтобы начать формировать сметные документы, необходимо создать классификатор элементов, внедрить его в программный комплекс, на котором проектируется цифровой двойник объекта. Осложняется внедрение этой технологии тем, что экономическая сторона вопроса слишком значительна, и очень малая доля застройщиков готова брать на себя риск внедрения новой, непроверенной технологии вместо способов, которые проверены десятилетиями.

Кроме того, внедрение технологий информационного моделирования в этап эксплуатации тоже связано с внедрением новых стандартов связи и развития таких технологий, как умный дом, а также

формированием стандартов, позволяющих на предшествующих этапах создавать цифрового двойника объекта такой детализации, которой будет достаточно для внедрения в ИМ эксплуатирующих параметров устройств объекта.

Несмотря на то что применение технологии BIM в практике жилищного строительства дает возможность экономить все виды ресурсов (временные, людские, материальные, финансовые) как на этапах проектирования, так и на этапе непосредственного строительства, существующие подходы к реализации технологии BIM достаточно проблематично использовать для оценки даже стоимости ИСП жилищного профиля, не говоря уже об оценке эффективной реализации ИСП жилищного профиля.

Установлено, что, с одной стороны, сложность внедрения в технологии BIM методов оценки эффективной реализации ИСП жилищного профиля заключается в том, что каждый объект жилищного профиля в определенной степени уникален и в его реализации на каждом этапе ЖЦ задействовано значительное количество экономических субъектов хозяйствования. С другой стороны, в реализуемых алгоритмах использования цифровых технологий проектирования BIM экономическая оценка эффективности реализации ИСП жилищного профиля не заложена в принципе.

В результате возникает ситуация, что при использовании цифровых технологий проектирования BIM, как правило, не решается задача выбора рационального с экономической точки зрения варианта ИСП жилищного профиля, притом что сама технология проектирования BIM на основе цифрового моделирования позволяет анализировать различные варианты реализации проекта.

С опорой на функцию потерь по Г. Тагути в работе сформирована модель оценки экономической эффективности вариантов ИСП жилищного профиля, в которой суммарные потери экономической эффективности при реализации i -го варианта технологий t_i ИСП жилищного профиля определяются суммой:

- потерь экономической эффективности при реализации i -го варианта технологий t_i ИСП жилищ-

ного профиля, выражаемых в потере части рыночной стоимости при реализации проекта, достигающей существенных значений при использовании слишком дешевых технологий (экономия средств, затрачиваемых на технологии);

- потерь экономической эффективности при реализации i -го варианта технологий t_i ИСП жилищного профиля, выражаемых в потере части прибыли по проекту в результате опережающего роста используемых технологий над ростом цены реализации проекта, достигающей существенных значений при использовании слишком дорогих технологий (т.е. в результате неоправданного роста себестоимости проекта), не имеющих адекватной оценки ценности потребительских свойств (ситуация недооценки потребителем «избыточного качества»);

- издержек осуществления ИСП жилищного профиля, не зависящих от варианта технологий его реализации.

Продемонстрировано, что поскольку в основе модели оценки экономической эффективности вариантов ИСП жилищного профиля лежит оценка суммарных потерь экономической эффективности при реализации i -го варианта технологий t_i ИСП жилищного профиля, то для поиска наилучшего варианта проекта необходимо найти минимум рассматриваемой функции.

Показана возможность определения с помощью предложенной модели оценки экономической эффективности вариантов t_i ИСП жилищного профиля области допустимых вариантов технологий t_i реализации проекта, целесообразных с экономической точки зрения, а также областей недопустимых вариантов технологий t_i реализации проекта «слишком плохо для потребителя» и «слишком дорого для производителя».

Предложен модифицированный вариант обобщенного алгоритма применения технологии информационного моделирования в хозяйственной практике жилищного строительства, учитывающий возможности оценки экономической эффективности вариантов t_i ИСП жилищного профиля по предложенной модели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ларионов А.Н., Карачева А.А. Цифровизация как инновационный фактор снижения сроков и повышения качества жилищного строительства в Московской области // Журнал исследований по управлению. 2020. Т. 6. № 6. С. 30–57.
2. Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2016. 138 с.
3. Парикова Д.С. Темпы цифровизации в мире строительства и увеличение потребности в мощностях ЦОД // Научный аспект. 2021. Т. 3. № 4. С. 475–479.

4. Тебекин А.В., Тебекин П.А., Егорова А.А. Анализ перспектив развития национальной экономики при внедрении сквозных цифровых технологий // Журнал экономических исследований. 2020. Т. 6. № 4. С. 3–18.
5. Абакумов Р.Г., Наумов А.Е., Зобова А.Г. Преимущества, инструменты и эффективность внедрения технологий информационного моделирования в строительстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 171–181. DOI: 10.12737/article_590878fb8be5f0.72456616

6. Тебекин А.В., Анисимов Е.Г., Тебекин П.А., Егорова А.А. Обеспечение качества жизни в городской среде с помощью технологий «Умный город» // Транспортное дело России. 2020. № 2. С. 11–17.

7. Бачурина С.С., Голосова Т.С. Инвестиционная составляющая в проектах внедрения BIM-технологий // Вестник МГСУ. 2016. № 2. С. 126–134. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.2.126-134

8. Бородулин К.В. Внедрение технологий информационного моделирования в процесс эксплуатации зданий и сооружений // Молодой ученый. 2019. № 2 (240). С. 200–202.

9. Владыкин В.Н., Абакумов Р.Г. Применение технологии «Building Information Modelling» при развитии строительной индустрии в России // Инновационная наука. 2016. № 12–2. С. 33–36.

10. Голосова Т.С. Модель выбора стратегии перехода к BIM-технологиям // Градостроительство. 2016. № 5 (45). С. 25–27.

11. Гориков А.М., Железнов С.А., Лемешко Р.А., Пойда С.В. Внедрение BIM технологий в строительство // Alfabuild. 2019. № 4 (11). С. 70–81.

12. Грахов В.П., Мохначев С.А., Манохин П.Е., Иштряков А.Х. Совершенствование организации проектных работ путем внедрения технологий информационного моделирования зданий // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1.

13. Губарев С.А., Абакумов Р.Г. Аналитический обзор современных технологий строительства, строительных материалов, строительных конструкций, отвечающих современным требованиям инвесторов в строительстве // Инновационная наука. 2016. № 11–1. С. 48–51.

14. Кожевников К.И., Нуждин А.Д. Разработка системы управления инвестиционными проектами в строительстве с помощью внедрения технологий

информационного моделирования // Научные труды вольного экономического общества России. 2020. Т. 222. № 2. С. 219–225. DOI: 10.38197/2072-2060-2020-222-2-219-225

15. Кужакова З.У., Байбурин А.Х. Обзор нормативной документации в области BIM-моделирования в Российской Федерации // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Т. 20. № 3. С. 70–79. DOI: 10.14529/build200309

16. Рашев В.С., Астафьева Н.С., Рогожкин Л.С., Григорьев В.Ю. Анализ внедрения технологий информационного моделирования в российских строительных компаниях по проектированию и строительству инженерных систем // Вестник Евразийской науки. 2020. Т. 12. № 3. URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN320.pdf>

17. Скрыпник О.Г., Абакумов Р.Г. Обеспечение безопасности и эксплуатационной надежности зданий и сооружений // Инновационная наука. 2016. № 5–3 (17). С. 199–200.

18. Уварова С.С., Паненков А.А., Сонин Я.Л. Цифровизация строительства в проекции теории организационно-экономических изменений // Экономика строительства. 2020. № 1. С. 31–39.

19. Черняев В.В., Абакумов Р.Г. Проблемы внедрения инновационных технологий в строительство // Инновационная наука. 2017. № 2–1. С. 245–247.

20. Четверик Н.П. Поэтапное внедрение технологий информационного моделирования (BIM) в строительной сфере // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. № 12 (191). С. 44–47.

21. Тебекин А.В. Иерархическая структура технологий управления качеством // Журнал технических исследований. 2019. Т. 5. № 1. С. 15–25.

Поступила в редакцию 26 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 23 ноября 2022 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Аркадий Николаевич Ларионов** — доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики и управления в строительстве, член Экспертного совета Комитета Государственной Думы РФ по строительству и ЖКХ; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655750, Scopus: 55817390000, ResearcherID: I-2797-2013, ORCID: 0000-0001-9706-5131; lariонов@mgisu.ru;

Антон Викторович Приходько — аспирант кафедры экономики и управления в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; prihodkoanvik@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Larionov A.N., Karacheva A.A. Digitalization as an innovative factor of reducing the time and increasing the quality of housing construction in the Moscow region. *Journal of Management Studies*. 2020; 6(6):30-57. (rus.)

2. Schwab K. *The fourth industrial revolution*. Moscow, Eksmo, 2016; 138. (rus.)

3. Parshkova D.S. The pace of digitalization in the world of construction and the increase in demand for

data center capacities. *Scientific Aspect*. 2021; 3(4):475-479. (rus.).

4. Tebekin A.V., Tebekin P.A., Egorova A.A. Analysis of the prospects for the development of the national economy when introducing end-to-end digital technologies. *Journal of Economic Research*. 2020; 6(4):3-18. (rus.).

5. Abakumov R.G., Naumov A.E., Zobova A.G. Advantages, tools and efficiency of implementation of information modeling technologies in construction. *Bulletin of BSTU Named After V.G. Shukhov*. 2017; 5:171-181. DOI: 10.12737/article_590878fb8be5f0.72456616 (rus.).

6. Tebekin A., Anisimov E., Tebekin P., Egorova A. Ensuring the quality of life in an urban environment using smart city technology. *Transport business of Russia*. 2020; 2:11-17. (rus.).

7. Bachurina S.S., Golosova T.S. Investment Component in BIM Implementation Projects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 2:126-134. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.2.126-134 (rus.).

8. Borodulin K.V. Implementation of information modeling technologies in the operation of buildings and structures. *Young Scientist*. 2019; 2(240):200-202. (rus.).

9. Vladykin V.N. Application of "Building Information Modeling" technology in the development of the construction industry in Russia. *Innovation Science*. 2016; 12-2:33-36. (rus.).

10. Golosova T.S. Model of transition to BIM strategy selection. *Urban Planning*. 2016; 5(45):25-27. (rus.).

11. Gorshkov A.M., Zheleznov S.A., Lemeshko R.A., Poyda S.V. The introduction of BIM technologies in construction. *Alfabuild*. 2019; 4(11):70-81. (rus.).

12. Grakhov V.P., Mokhnachev S.A., Manokhin P.E., Ishtryakov A.Kh. Improving the organization of design works by introducing building information modeling technologies. *Modern Problems of Science and Education*. 2015; 1-1. (rus.).

13. Gubarev S.A., Abakumov R.G. Analytical review of modern construction technologies, building materials, building structures that meet modern requirements of investors in construction. *Innovative Science*. 2016; 11-1:48-51. (rus.).

14. Kozhevnikov K.I., Nuzhdin A.D. Development of investment project management system in construction through the introduction of information modeling technologies. *Scientific Works of the Free Economic Society of Russia*. 2020; 222(2):219-225. DOI: 10.38197/2072-2060-2020-222-2-219-225 (rus.).

15. Kuzhakova Z.U., Baiburin A.Kh. Review of the BIM regulatory documentation in the Russian Federation. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and architecture*. 2020; 20(3):70-79. DOI: 10.14529/build200309 (rus.).

16. Rashev V.S., Astafeva N.S., Rogozhkin L.S., Grigorev V.Iu. Analysis of the implementation of information modeling technology in Russian construction companies for the design and construction of engineering systems. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020; 3(12). URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN320.pdf> (rus.).

17. Skrypnyk O.G., Abakumov R.G. Ensuring the safety and operational reliability of buildings and structures. *Innovation Science*. 2016; 53(17):199-200. (rus.).

18. Uvarova S.S., Panenkov A.A., Sonin Ya.L. Digitalization of construction in the projection of the theory of organizational and economic changes. *Economics of Construction*. 2020; 1:31-39. (rus.).

19. Chernyaev V.V., Abakumov R.G. Problems of introduction of innovative technologies in construction. *Innovative Science*. 2017; 2-1:245-247. (rus.).

20. Chetverik N.P. Phased introduction of technologies information modeling (BIM) in building industry. *Building materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2014; 12(191):44-47. (rus.).

21. Tebekin A.V. Hierarchical structure of quality management technologies. *Journal of Technical Research*. 2019; 5(1):15-25. (rus.).

Received September 26, 2022.

Adopted in revised form on November 23, 2022.

Approved for publication on February 6, 2023.

B I O N O T E S : **Arkady N. Larionov** — Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Economics and Management in Construction, Member of the Expert Council of the State Duma Committee on Construction and Housing; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 655750, Scopus: 55817390000, ResearcherID: I-2797-2013, ORCID: 0000-0001-9706-5131; larionovan@mgsu.ru;

Anton V. Prikhodko — postgraduate 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; prikhodkoanvik@yandex.ru.

Contribution of the authors: all the authors contributed to this article equivalently.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК [005.8:69]:51

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.283-292

Организационно-технические решения по обеспечению качества строительно-монтажных работ на различных этапах жизненного цикла объекта строительства

Дмитрий Владимирович Топчий

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В действующей нормативной литературе указана необходимость обеспечения качества проводимых работ на различных этапах реализации строительных проектов. Функции контроля качества, согласно градостроительному кодексу, возложены на структуры технического заказчика, а также организации, осуществляющие работы. Некоторые утвержденные своды правил содержат основные принципы, которыми необходимо руководствоваться соответствующим структурам при выполнении подобных работ. В научной литературе подробно изучены и описаны ключевые проблемы, возникающие при реализации объектов капитального строительства, а также методы и способы предотвращения и устранения выявленных отклонений. При этом научных исследований, посвященных изучению основ организации и технологии работ по обеспечению качества при проведении инженерных изысканий, разработке проектно-сметной документации, осуществлении строительно-монтажных работ (СМР), эксплуатации, сносе и утилизации строительных отходов, крайне мало, они являются фрагментарными и разрозненными элементами единой системы обеспечения качества и требуют дополнительного изучения.

Материалы и методы. Проанализирована действующая нормативная документация, в которой приведены главные аспекты обеспечения качества на различных этапах жизненного цикла объекта строительства. Предложены принципы системного подхода к организации и технологии производства по обеспечению заданных параметров. Рассмотрены специфические условия осуществления строительного контроля (СК) на этапе инженерных изысканий и СМР (в том числе при реконструкции, реставрации, капитальном ремонте) различных классов капитальности объектов.

Результаты. Действующая нормативная документация и научные исследования, с применением которых проводятся СК, обследование зданий и сооружений, а также различные виды мониторинга, не позволяют достичь единообразия при формировании организационных структур, выполняющих работы по обеспечению качества.

Выводы. Предложенный системный подход к организации работ по обеспечению качества на различных этапах жизненного цикла строительного объекта позволит в кратчайшие сроки сформировать единые принципы функционирования организационных структур, гарантирующих качество, предотвращающих и своевременно выявляющих различные отклонения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обеспечение качества, организация строительства, строительный контроль, обследование зданий и сооружений, технология строительства, систематизация строительства

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Топчий Д.В. Организационно-технические решения по обеспечению качества строительно-монтажных работ на различных этапах жизненного цикла объекта строительства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 283–292. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.283-292

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Владимирович Топчий, topchiydv@mgsu.ru.

Managerial and engineering solutions made to ensure the quality of construction and installation work at various stages of the life cycle of a construction facility

Dmitry V. Topchiy

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

ABSTRACT

Introduction. Current regulations indicate the need to ensure the quality of work performed at various stages of construction projects. Pursuant to the Urban Planning Code, quality control functions are assigned to a technical coordinator, as well as organizations that perform the work themselves. A number of approved sets of rules describe basic principles to be complied with by the companies performing this work. Research literature also focuses on and describes in detail the main problems that arise during the implementation of capital construction projects, as well as methods and techniques used to prevent and eliminate any deviations thus identified. At the same time, very few research works address fundamentals of work performance

procedures and quality assurance technologies applied in the course of engineering surveying, development of design documentation and project budgets, performance of construction and installation work, operation, demolition and disposal of construction waste. These works are fragmented and disparate elements of a consolidated quality assurance system, and they need more research.

Materials and methods. The author analyzed current regulations that ensure principal aspects of quality assurance at various stages of the life cycle of a construction facility. Principles of the systems approach to construction procedures and technologies, needed to ensure the pre-set parameters, are proposed. Specific conditions of construction control at the stage of engineering surveys and implementation of construction and installation works (including reconstruction, restoration, major repairs) of various classes of reliability and durability are considered.

Results. Current regulations, documentation and scientific research projects, used to perform construction control, inspection of buildings and structures, as well as various types of monitoring, do not allow for the uniformity of companies responsible for quality assurance.

Conclusions. The proposed systems approach to the arrangement of quality assurance work at various stages of the life cycle of a construction facility will in the shortest possible time allow for the development of uniform principles underlying the operation of entities that guarantee quality, prevent and timely identify various deviations.

KEYWORDS: quality assurance, construction arrangement, construction control, inspection of buildings and structures, construction technology, systematization of construction

FOR CITATION: Topchiy D.V. Managerial and engineering solutions made to ensure the quality of construction and installation work at various stages of the life cycle of a construction facility. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):283-292. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.283-292 (rus.).

Corresponding author: Dmitry V. Topchiy, topchiydv@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Предпосылки организации и технологии работ по проведению строительного контроля (СК), обследованию и мониторингу зданий и сооружений

Обеспечение качества — один из базовых элементов производства, формирующих основы долгосрочной и безаварийной эксплуатации строительных объектов вне зависимости от класса капитальности, уровней ответственности и функционального назначения. Исходя из этого, при реализации любых строительных проектов необходим системный комплексный подход организационного, методологического, научного и экспертного характера.

Цель данной статьи — систематизация действующей нормативной и научной литературы, формирование ключевых векторов для дальнейшего изучения в области организации и технологии производства и системотехники в строительстве. Проанализировав регулярно публикуемую отчетную документацию Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, Ростехнадзором, территориальными структурами государственного строительного надзора (ГСН), а также опираясь на опыт экспертов, являющихся организаторами строительства при реализации различных объектов капитального строительства (ОКС), можно сформулировать ряд проблемных вопросов по организации строительства при обеспечении качества строительной продукции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В соответствии с принципами создания любых производственных организационных структур, описанных в монографии основоположника системотехники в строительстве проф. А.А. Гусакова, эффективное функционирование подобных структур вне

зависимости от специфики их деятельности базируется на симбиозе определенных элементов (рис. 1), характерных, в том числе и для систем СК в строительстве, обследованию и мониторингу зданий и сооружений.

Основой нормативного законодательства в области обеспечения качества с 2010 г. служит Постановление Правительства РФ № 468, в котором было закреплено понятие «строительный контроль», а также его состав. Таким образом, к главным функциям СК относятся контрольные мероприятия, приведенные на рис. 2. Стоит учесть, что функции обеспечения качества при строительстве возложены как на застройщика, так и на подрядчика (рис. 3), осуществляющего строительство.

В настоящее время происходит пересмотр Постановления Правительства РФ от 21.06.2010 № 468 «О порядке проведения строительного контроля при осуществлении строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов капитального строительства» и с марта 2023 г. планируется ввести новые принципы формирования структуры по обеспечению качества строительной продукции.

В соответствии с Градостроительным кодексом (ГК) РФ с изменениями и дополнениями, вступившими в силу 01.09.2022, предметом СК является не только сам процесс возведения здания или сооружения, но и анализ проектной документации в ходе ее разработки и приемки. Специалисты СК должны обладать не только необходимыми знаниями и умениями для обеспечения качества при выполнении строительно-монтажных работ (СМР), но и специальными познаниями в области инженерных изысканий и проектирования [1].

Стоит обратить внимание еще на один казус, касающийся обеспечения качества и состоящий в наличии сразу двух действующих нормативных документов, — ГОСТ 31937-2011 «Здания и соору-

жения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» и СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений». Эти нормы многие годы не пересматривались и не дополнялись и, как следствие, на сегодняшний день не гармонизированы между собой и иной нормативной документацией, а также входят в противоречие с отдельными пунктами ГК РФ.

Даже эти указанные выше нормативные документы вместо того, чтобы дополнять, отчасти противоречат друг другу. В частности, это касается структуры технических отчетов; требований к обменным чертежам; выявлению, фиксации и классификации дефектов; оформлению графической части;

а также применяемым терминам и определениям. Следует констатировать, что пересмотр и гармонизация данных документов давно назрели.

Немаловажный фактор обеспечения качества при реализации проектов, подпадающих под классификацию уникальных и технически сложных, — осуществление научно-технического сопровождения реализуемого проекта на стадии изысканий, проектирования и строительства [2]. Эксперты, имеющие дополнительные знания, умения и опыт реализации аналогичных проектов, должны своевременно анализировать предоставляемую застройщиком информацию и предотвращать развитие неблагоприятных процессов [3].

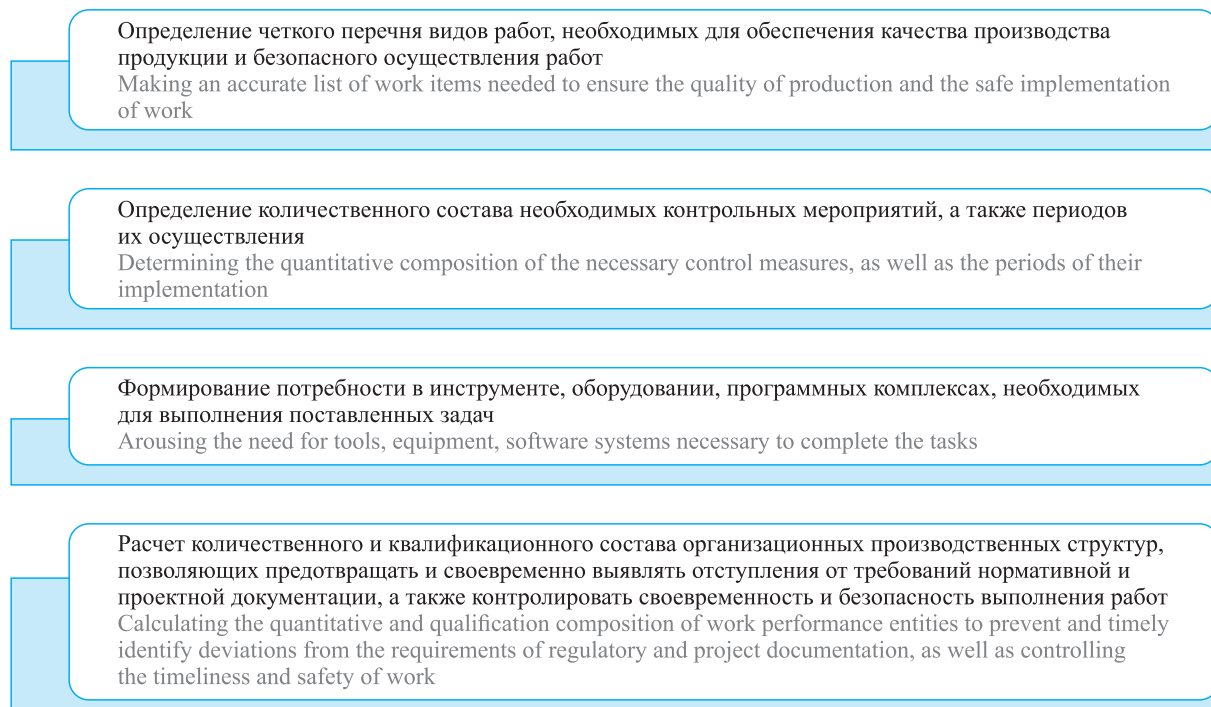


Рис. 1. Элементы формирования организационной структуры

Fig. 1. Elements of organizational structure



Рис. 2. Мероприятия строительного контроля, проводимые застройщиком на этапе строительства

Fig. 2. Construction control measures taken by the developer at the construction stage



Рис. 3. Мероприятия строительного контроля, проводимые подрядчиком на этапе строительства

Fig. 3. Construction control measures taken by the contractor at the construction stage

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Системные принципы формирования структуры СК

Формирование программы работ по обеспечению качества при реализации проектов капитального строительства, реконструкции и ремонта, а также благоустройства территорий, разрабатываемой техническим заказчиком или генеральным подрядчиком и утверждаемой заказчиком, может содержать широкий спектр рассматриваемых вопросов [4]. Четкой методики, из каких элементов должен состоять данный процесс, и что является оптимальным составом работ, обеспечивающим качество и безопасность, не существует [5].

К тому же при создании программы СК генеральным подрядчиком в процессе выполнения СМР проектно-изыскательская документация зачастую уже завершена и передана подрядчику в производство работ, и осуществляется данный процесс без привлечения строительного контроля.

Все это происходит из-за наличия достаточно большого перечня различных методических рекомендаций, ведомственных регламентов и иных рекомендательных документов, что позволяет сформулировать гипотезу о необходимости создания единого системного подхода к строительному контролю на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) объекта, являющуюся основой обеспечения качества и безопасности строительства и дальнейшей эксплуатации объекта [6].

Структура регламентируемых работ по СК формируется из ряда действующей нормативной документации. Потребность в создании единых принципов, базирующихся на формализованном описании процесса строительства в виде сложной организационно-технической системы, обусловлена основными положениями системотехники в строительстве, позволяющими сформировать адекватную научно обоснованную модель строительного контроля [7].

Создание производственной подсистемы, описывающей состав проводимых работ при осуществлении СК, осуществляется при декомпозиции процесса на этапах изысканий, строительства и эксплуатации возводимого объекта [8].

Строительный контроль при выполнении инженерных изысканий

Строительный контроль на этапе инженерных изысканий зачастую игнорируется заказчиком, и функцию по анализу получаемых результатов и сопоставлению их требованиям технического задания выполняет технический заказчик. Часто данные работы проводятся по формальному признаку и оцениваются исключительно по количественному составу работ, не рассматривая полученную информацию по существу и корректности. Однако именно на этом этапе ЖЦ объекта закладывается основа безопасности будущего объекта строительства, и скорректировать возникшие ошибки очень затратно, а зачастую невозможно.

Внимательно изучив нормативную документацию, действующую в статусе обязательного или добровольного применения, невозможно прийти к единому мнению о составе работ, требований к специалистам, а также понять юридический статус тех замечаний, которые представители строительного контроля должны формировать по результату анализа результатов инженерных изысканий. К примеру, не ясно, должен ли представитель СК присутствовать при бурении скважин в ходе инженерно-геологических изысканий для контроля факта осуществления работ, глубины бурения, а также фиксации корректности отбора и маркировки образцов. Особенно остро этот вопрос стоит при проведении инженерных изысканий в удаленных регионах, поскольку логистические затраты [8], а также финансовые издержки на фонд оплаты труда специалистов существенные.

Обеспечение качества строительства при возведении зданий и сооружений

Состав работ по обеспечению качества в ходе производства строительного цикла, как и на иных этапах ЖЦ, обширен и, к сожалению, в настоящий период времени не может быть однозначно сформирован [9]. Вариативность формирования программы и объема проведения подобных работ зависят от особенностей, поставленных задач перед организаторами строительства (рис. 4). Однако основные виды и объемы работ по обеспечению качества возможно определить, опираясь на действующую нормативную документацию [10]. В основе подобных работ заложена парадигма о недопущении, своевременном выявлении и устранении возникающих дефектов, а также документировании всех имеющихся отклонений, не превышающих допуски.

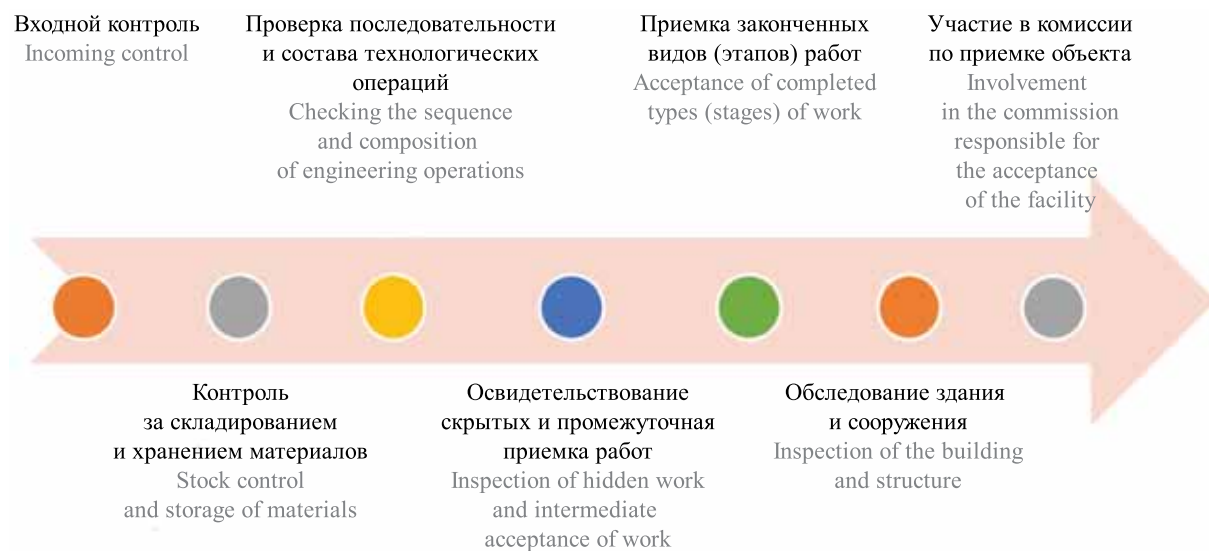


Рис. 4. Основные этапы работ по обеспечению качества при выполнении строительного цикла объектов строительства
Fig. 4. The main stages of quality assurance during construction and installation works

Задачам обеспечения качества строительной продукции посвящено много научных исследований, но подавляющее их большинство формируют представление о воздействии различных дефектов на конструкции и производственные процессы [11, 12].

Технологии информационного моделирования при строительном контроле

В сентябре 2020 г. впервые были описаны и закреплены конкретные действия, предписывающие переход строительной деятельности на информационную структуру, Постановлением Правительства РФ № 1431 «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». Использование утвержденной системы информационного моделирования учитывало в том числе и активное взаимодействие со специалистами, отвечающими за безопасность строительного производства, качество продукции и ведение исполнительной документации [9]. Специалисты СК и ГСН должны обладать должной квалификацией, а также знаниями, умениями и навыками для работы в подобных системах [10]. Первоначально предполагалось, что переход на технологию информационного моделирования (ТИМ) произойдет с 1 января 2022 г. Но в конце 2021 г. стало понятно, что отрасль не была должным образом подготовлена к подобной транс-

формации. Основная проблема заключалась в отсутствии необходимого количества специалистов, свободно владеющих ТИМ [11, 12]. А с февраля 2022 г. к этой проблеме добавилась еще одна, с российского рынка ушли все ключевые проектировщики BIM-технологий. При этом отечественных программных продуктов, обеспечивающих полноценное импортозамещение ушедших иностранных компаний, до сих пор нет.

Несмотря на это, в России созданы и успешно применяются отдельные отечественные программы, позволяющие осуществлять оперативное взаимодействие участников строительства при входном и текущем контроле, формировать и вести реестры выявляемых дефектов и предписаний СК, вести реестры и хранить исполнительную документацию.

Специалист строительного контроля

В июне 2020 г. вышел приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 15.06.2020 № 330н «Об утверждении профессионального стандарта «Специалист по строительному контролю качества строительно-монтажных работ на объектах использования атомной энергии»». Фактически этот документ стал первым, описывающим профессиональ-

ные критерии к людям, занимающимся данной деятельностью. В настоящее время заканчивается утверждение профессионального стандарта строительного контроля при возведении зданий и сооружений. Документ предполагает подробное описание трудовых функций специалистов, а также критерии к их образованию, знаниям и умениям. Очевидно, что при тестировании в центрах оценки квалификации (ЦОК) не все действующие специалисты будут соответствовать утвержденным критериям. Поэтому в ближайшее время необходимо пройти переподготовку для получения возможности в дальнейшем продолжать свою работу по СК, что положительно скажется на качестве и безопасности СМР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на планы Правительства по дальнейшей гармонизации нормативной базы, а также существенный уровень развития научной школы в области обеспечения качества, остаются пробелы, которые еще предстоит изучить.

Рассматривая структуру СК как единую производственную систему, стоит обратить внимание на развитие следующих аспектов (рис. 5).

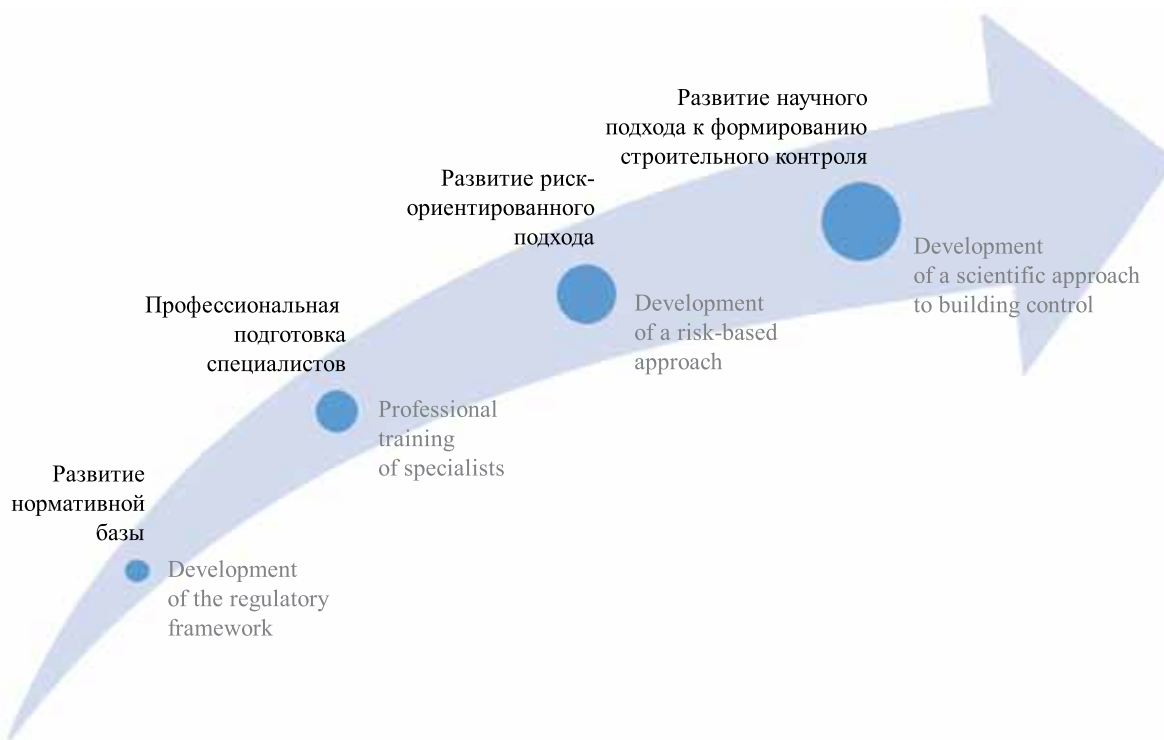


Рис. 5. Основные аспекты развития строительного контроля

Fig. 5. The main aspects of construction control development

Развитие нормативной базы

До конца года должно быть выпущено новое Постановление Правительства РФ о порядке проведения строительного контроля. Документ разрабатывается

Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ взамен морально устаревшего и не отвечающего сегодняшним реалиям Постановления Правительства РФ № 468 «О порядке проведения

строительного контроля при осуществлении строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов капитального строительства». Главные изменения коснутся затрат на осуществление СК и приведение их в соответствие с реальными затратами застройщика. Также предполагается прописать исчерпывающий состав мероприятий при выполнении входного и операционного контроля, указать основания о необходимости проведения натурных лабораторных измерений. В Постановлении будет учтена возможность участников строительства использовать различные цифровые технологии, как отдельные программные комплексы, так и в составе ТИМ. Так, при формировании заказчиком единой информационной модели объекта капитального строительства результаты СК следует интегрировать в данную модель. Также новыми правилами предусматривается возможность применения средств автоматизированного контроля и мониторинга, в том числе с помощью технологии аэромониторинга.

Профессиональная подготовка специалистов

Переход на систему профессиональных стандартов потребует не только массового осуществления оценочных мероприятий действующих специалистов СК, но и кардинального пересмотра обучения. Причем структуры обучения не только в качестве дополнительного образования перед сдачей экзаменов в ЦОК, но и формирования базового высшего и специального образования. Стоит заметить, что в настоящее время в высших учебных заведениях РФ существует единственная кафедра, готовящая специалистов по СК. В 2021 г. в НИУ МГСУ воссоздана кафедра испытания сооружений. Имеется еще несколько вузов, на кафедрах которых читают отдельные курсы, посвященные строительному контролю и государственному строительному надзору. Но это не специализированные кафедры и курс лекций по СК читается в рамках образовательной деятельности конструкторских кафедр. Аналогичная ситуация и со средним специальным образованием. Единичные колледжи дают не только базовое образование, но и навыки и умения пользоваться современной приборной базой.

При этом в упомянутых ранее профессиональных стандартах специалистов СК четко указаны требования к базовому высшему и среднему специальному образованию.

Развитие риск-ориентированного подхода при осуществлении строительного контроля

В настоящей статье приведено описание функций застройщика (технического заказчика) и производителя работ при осуществлении СК в соответствии с требованиями градостроительного кодекса. Часть функций по обеспечению качества у данных

организационных структур тождественна, но традиционно считается, что подрядчик должен выполнять сплошной контроль за качеством и технологией проведения работ, а застройщик (технический заказчик) выборочные измерения [13]. Однако объем этой выборки, также как и периодичность проведения подобных работ, нигде не описаны. Существуют отдельные научные исследования, посвященные выборке и назначению контрольных процедур на основе статистического анализа. Но эти исследования являются разрозненными и не могут быть применены в качестве методик в практической деятельности строительных организаций.

Аналогичная проблема и с осуществлением своих профессиональных функций специалистами ГСН. В 2016 г. вышло Постановление Правительства РФ № 806 об использовании риск-ориентированного подхода при проведении надзорной деятельности. Четко прописано, что является риском, на каких этапах СМР необходимо не допускать и своевременно выявлять отклонения от требований норм и проектной документации, а также предложена классификация объектов в зависимости от типов и количества возможных рисков [14]. Это позволило не только сократить излишнее госрегулирование за счет взаимодействия участников строительства с Госстройнадзором, но и более эффективно использовать возможности ГСН, при этом не теряя качество самого надзора. Но в 2021 г. были внесены изменения в Постановление № 806 и отменены требования применения риск-ориентированного подхода при осуществлении государственного строительного надзора [15].

Целесообразно сформировать систему подготовки научных кадров при обучении в магистратуре и аспирантуре, результатом деятельности которых станут разработка методик по СК, ГСН, а также обследования зданий и сооружений участниками строительства [16–20].

Развитие научного подхода к формированию строительного контроля

Несмотря на существующую научно обоснованную базу и подробно рассмотренные в статьях вопросы дефектоскопии, мониторинга, влияния различных дефектов на конструкции, проектирования различных усилений зданий и сооружений, исследований по организации работ при СК, ГСН, лабораторном контроле и обследовании строительных конструкций крайне мало. Таким образом, в настоящее время практически выпала из научного изучения проблематика, посвященная формированию эффективных организационных структур СК и ГСН. Недостаточно научных работ, описывающих организационно-технические мероприятия как единую систему, направленную на достижение заданного качества строительной продукции. Необходимы на-

учные исследования по прогнозированию и оптимизации параметров технологических процессов проведения натурных измерений и лабораторных испытаний строительных конструкций, поскольку именно они лежат в основе системы СК. В условиях санкционной политики требуется разработка конкурентоспособных новых и совершенствование существующих технологий и методов осуществления работ, систем контроллинга и средств мониторинга различных организационно-технологических процессов.

Следует отметить потребность строительной отрасли и в изучении организации строительства при проведении работ, направленных на обеспечение качества. Формирование теоретических, методологических и системотехнических подходов при создании организационных структур, ресурсном планировании, исследовании логистических и информационных взаимодействий среди участников строительства в ходе осуществления строительного контроля или обследования зданий и сооружений еще предстоит изучить.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмина Т.К., Волков Р.В., Карнаухова Д.О. Комплексная методология оценки рисков строительных проектов в современных условиях // Строительное производство. 2022. № 2. С. 37–42. DOI: 10.54950/26585340_2022_2_37

2. Lapidus A., Topchiy D. Construction supervision at the facilities renovation // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 91. P. 08044. DOI: 10.1051/E3SCONF/20199108044

3. Yu T., Man Q., Wang Y., Shen G.Q., Hong J., Zhang J. et al. Evaluating different stakeholder impacts on the occurrence of quality defects in offsite construction projects: A Bayesian-network-based model // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 241. P. 118390. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118390

4. Qin H., Stewart M.G. Construction defects and wind fragility assessment for metal roof failure: A Bayesian approach // Reliability Engineering & System Safety. 2020. Vol. 197. P. 106777. DOI: 10.1016/j.res.2019.106777

5. London K., Pablo Z., Gu N. Explanatory defect causation model linking digital innovation, human error and quality improvement in residential construction // Automation in Construction. 2021. Vol. 123. P. 103505. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103505

6. Ларионов А.Н., Аль-Рубайе С.Д. Обоснование практических рекомендаций по совершенствованию системы управления строительной организацией: аспект качества // Строительное производство. 2021. № 2. С. 41–48. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_41

7. Kapyrin P., Sevryugina N. The procedural approach to reliability of objects of the raised level of responsibility // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 042018. DOI: 10.1088/1757-899x/365/4/042018

8. Hüthwohl P., Lu R., Brilakis I. Multi-classifier for reinforced concrete bridge defects // Automation in Construction. 2019. Vol. 105. P. 102824. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.04.019

9. Зеленцов Л.Б., Маилян Л.Д., Пирко Д.В., Аль-Тубаили А.Ф.М. Моделирование логистических

процессов с использованием информационных технологий // Строительное производство. 2022. № 1. С. 10–15. DOI: 10.54950/26585340_2022_1_10

10. Кузьмина Т.К., Ледовских Л.И. Особенности использования технологии информационного моделирования при осуществлении строительного контроля // Строительное производство. 2021. № 4. С. 49–54. DOI: 10.54950/26585340_2021_4_8_49

11. Tokarsky A., Topchiy D. The concept of quality control of the organization of construction processes during construction supervision through the use of information technology // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 258. P. 09028. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809028

12. Ma G., Wu M., Wu Z., Yang W. Single-shot multibox detector- and building information modeling-based quality inspection model for construction projects // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 38. P. 102216. DOI: 10.1016/j.job.2021.102216

13. Ланидус А.А., Макаров А.Н., Волков Р.В. Риск-ориентированный строительный контроль технического заказчика // Строительное производство. 2022. № 2. С. 2–6. DOI: 10.54950/26585340_2022_2_2

14. Lapidus A., Khubaev A., Bidov T. Organizational and technological solutions justifying use of non-destructive methods of control when building monolithic constructions of civil buildings and structures // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 05014. DOI: 10.1051/matecconf/201825105014

15. Wang S., Fu J., Zhang C., Yang J. Defects of shield tunnel lining and their treatments // Shield Tunnel Engineering. 2021. Pp. 581–612. DOI: 10.1016/B978-0-12-823992-6.00012-6

16. Baiburin A.Kh. Errors, Defects and Safety Control at Construction Stage // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 807–813. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.555

17. Kuzmina T., Bolshakova P., Zueva D. Completion of administrative procedures by the developer (technical customer) // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 258. P. 09004. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809004

18. Муря В.А. Комплексный процесс возведения монолитных высотных зданий и сооружений башенного типа из железобетона на основе скользящей опалубки // *Строительное производство*. 2021. № 2. С. 64–69. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_64

19. Болотова А.С., Маршавина Я.И. Проблемы внедрения технологии информационного моделиро-

вания в России // *Строительное производство*. 2021. № 2. С. 70–80. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_70

20. Кузьмина Т.К., Большакова П.В. Выявление и систематизация факторов при подготовке объектов к строительству техническим заказчиком (застройщиком) // *Строительное производство*. 2020. № 4. С. 38–43. DOI: 10.54950/26585340_2020_4_38

Поступила в редакцию 10 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 19 декабря 2022 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Дмитрий Владимирович Топчий** — доктор технических наук, доцент, профессор, и. о. заведующего кафедрой испытания сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 631269, Scopus: 57201154714, ORCID: 0000-0002-3697-9201; topchiydv@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Kuzmina T.K., Volkov R.V., Karnaukhova D.O. Comprehensive methodology of risk assessment of construction projects in current circumstances. *Construction Production*. 2022; 2:37-42. DOI: 10.54950/26585340_2022_2_37 (rus.).

2. Lapidus A., Topchiy D. Construction supervision at the facilities renovation. *E3S Web of Conferences*. 2019; 91:08044. DOI: 10.1051/E3SCONF/20199108044

3. Yu T., Man Q., Wang Y., Shen G.Q., Hong J., Zhang J. et al. Evaluating different stakeholder impacts on the occurrence of quality defects in offsite construction projects: A Bayesian-network-based model. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 241:118390. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118390

4. Qin H., Stewart M.G. Construction defects and wind fragility assessment for metal roof failure: A Bayesian approach. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020; 197:106777. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106777

5. London K., Pablo Z., Gu N. Explanatory defect causation model linking digital innovation, human error and quality improvement in residential construction. *Automation in Construction*. 2021; 123:103505. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103505

6. Larionov A.N., Al-Rubaye S.J. Justification of practical recommendations for improving the management system of a construction organization: the quality aspect. *Construction Production*. 2021; 2:41-48. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_41 (rus.).

7. Капурин П., Севрюгина Н. The procedural approach to reliability of objects of the raised level of responsibility. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:042018. DOI: 10.1088/1757-899x/365/4/042018

8. Hüthwohl P., Lu R., Brilakis I. Multi-classifier for reinforced concrete bridge defects. *Automation in Construction*. 2019; 105:102824. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.04.019

9. Zelentsov L.B., Mailyan L.D., Pirko D.V., Al-Tubaili A.F.M. Modeling of Logistics Processes Using Information Technology. *Construction Production*. 2022; 1:10-15. DOI: 10.54950/26585340_2022_1_10 (rus.).

10. Kuzmina T.K., Ledovskikh L. And Features of the use of information modeling technology in the implementation of construction control. *Construction Production*. 2021; 4:49-54. DOI: 10.54950/26585340_2021_4_8_49 (rus.).

11. Tokarsky A., Topchiy D. The concept of quality control of the organization of construction processes during construction supervision through the use of information technology. *E3S Web of Conferences*. 2021; 258:09028. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809028

12. Ma G., Wu M., Wu Z., Yang W. Single-shot multibox detector- and building information modeling-based quality inspection model for construction projects. *Journal of Building Engineering*. 2021; 38:102216. DOI: 10.1016/j.job.2021.102216

13. Lapidus A.A., Makarov A.N., Volkov R.V. Risk-oriented construction control of a technical customer. *Construction Production*. 2022; 2:2-6. DOI: 10.54950/26585340_2022_2_2 (rus.).

14. Lapidus A., Khubaev A., Bidov T. Organizational and technological solutions justifying use of non-destructive methods of control when building monolithic constructions of civil buildings and structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:05014. DOI: 10.1051/mateconf/201825105014

15. Wang S., Fu J., Zhang C., Yang J. Defects of shield tunnel lining and their treatments. *Shield Tunnel Engineering*. 2021; 581-612. DOI: 10.1016/B978-0-12-823992-6.00012-6

16. Baiburin A.Kh. Errors, defects and safety control at construction stage. *Procedia Engineering*. 2017; 206:807-813. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.555

17. Kuzmina T., Bolshakova P., Zueva D. Completion of administrative procedures by the developer (technical customer). *E3S Web of Conferences*. 2021; 258:09004. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809004

18. Murya V.A. Complex process of construction of monolithic high-rise buildings and tower-type structures made of reinforced concrete on the basis of sliding formwork. *Construction Production*. 2021; 2:64-69. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_64 (rus.).

19. Bolotova A.S., Marshavina J.I. Problems of the implementation of BIM technologies in Russia. *Construction Production*. 2021; 2:70-80. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_70 (rus.).

20. Kuz'mina T.K., Bol'shakova P.V. Identification and systematization of factors in the preparation of objects for construction by a technical customer (developer). *Construction Production*. 2020; 4:38-43. DOI: 10.54950/26585340_2020_4_38

Received October 10, 2022.

Adopted in revised form on December 19, 2022.

Approved for publication on February 6, 2023.

BIONOTES: **Dmitry V. Topchiy** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Acting Head of the Department of Structures Testing; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 631269, Scopus: 57201154714, ORCID: 0000-0002-3697-9201; topchiydv@mgsu.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.984

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.293-303

Прогноз стоимости основных строительных материалов в условиях неопределенности: методика и практика

Александр Константинович Орлов¹, Владимир Александрович Болгов²

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

² *Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования заключается в оценке и прогнозировании динамики цен на основные строительные материалы в условиях высокого уровня неопределенности и риска на базе разработки соответствующей внешней условиям методики прогнозирования.

Материалы и методы. Построение прогноза в условиях неопределенности, которой можно охарактеризовать сегодняшнюю экономическую ситуацию в результате геополитических изменений, должно учитывать как расчетную, так и экспертную составляющую, вариативность развития ситуации, постоянную верификацию и актуализацию математической модели. Предложена методика прогнозирования стоимости строительных материалов в условиях неопределенности, основанная на поэтапно уточняемой ранжированной последовательности действий.

Результаты. Произведены расчеты по предложенной методике, построен и верифицирован прогноз стоимости ключевых строительных материалов (арматуры и бетона товарного) на период июнь–декабрь 2022 г. Обоснована региональная специфика ценовой динамики в строительстве (исследование проводилось для Московского региона и г. Екатеринбург). Приведены главные сценарии динамики цен строительных материалов в 2022 г., идентифицированные с учетом ключевых рискообразующих факторов.

Выводы. Определена необходимость разработки методики прогнозирования стоимости строительных материалов в условиях неопределенности, выполнена апробация авторской методики при прогнозировании цен основных строительных материалов (арматуры и бетона товарного). Доказана восходящая динамика цен строительных материалов в прогнозном периоде для всех сценариев развития ситуации на строительном рынке. Установлены ключевые факторы, влияющие на вероятность реализации каждого из сценариев; показана потребность постоянного мониторинга финансовой модели инвестиционно-строительных проектов с учетом риска.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогнозирование, стоимость, строительные материалы, экономико-математическое моделирование, экспертная оценка, методика

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Орлов А.К., Болгов В.А. Прогноз стоимости основных строительных материалов в условиях неопределенности: методика и практика // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 293–303. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.293-303

Автор, ответственный за переписку: Александр Константинович Орлов, orlovak@mgsu.ru.

Forecasting prices for the main building materials in a context of uncertainty: method and practice

Alexandr K. Orlov¹, Vladimir A. Bolgov²

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

² *Voronezh State Technical University (VSTU); Voronezh, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the study is to evaluate and forecast the behaviour of prices for the main building materials in a highly uncertain and risky environment using the price behavior forecasting method that takes into account external conditions.

Materials and methods. A forecast, made in a context of uncertainty, typical for the current economic situation resulting from geopolitical changes, should take into account results of calculations, the experts' input, variability of scenarios, and a continuously verifiable and updatable mathematical model. The authors propose a method to forecast materials prices in a context of uncertainty. The method is based on a ranked sequence of actions which is refined on a step-by-step basis.

Results. The method proposed by the authors was employed to calculate and verify the forecast price of the main building materials (reinforcement bars and ready-mix concrete) in June to December 2022. The author offers scenarios, showing the behaviour of prices for the main building materials in 2022 with account taken of the key factors of risk.

Conclusions. The need for a method to forecast building materials prices in a context of uncertainty was evident. The research method was tested, and prices for the main building materials (reinforcing bars and ready-mix concrete) were analyzed.

The upward price trend was substantiated for all construction market scenarios during the forecast period. Key factors, affecting the probability of each scenario, were identified. The author substantiated the need to continuously monitor the financial model of investment and construction projects to take risk into account.

KEYWORDS: forecast, cost, building materials, economic and mathematical modeling, expert evaluation, method

FOR CITATION: Orlov A.K., Bolgov V.A. Forecasting prices for the main building materials in a context of uncertainty: method and practice. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(2):293-303. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.2.293-303 (rus.).

Corresponding author: Alexandr K. Orlov, orlovak@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современные экономические условия, в которых функционирует строительная отрасль и реализуются инвестиционные проекты, характеризуются высокой степенью неопределенности и риска вследствие геополитических изменений и последующего санкционного давления, внешних ограничений, приведших к возникновению весной 2022 г. кратковременной паники на сырьевых и товарных рынках и ажиотажному спросу [1–4].

В таких условиях, которые можно описать как экономическая турбулентность или полная неопределенность, требуется прогноз ценовой динамики, в том числе строительных материалов, цены и наличие которых определяют не только затроемость инвестиционно-строительного проекта, но и его эффективность, и финансовую реализуемость [5, 6]. Одновременно следует отразить, что прогнозирование в ситуации неопределенности нуждается в применении как экспертных корректировок, так и план-фактных сопоставлений с целью оценки достоверности выбранной линии тренда [7–9].

Соответственно, устанавливается необходимость разработки методики прогнозирования стоимости строительных материалов в условиях неопределенности, а также составление прогнозной динамики цен строительных материалов на основе данного методического инструментария [10–14].

В качестве объекта исследования выбраны ценообразующие строительные материалы: арматурная сталь и бетон. Исследование проводилось для Московского региона и г. Екатеринбург.

Цель исследования — прогноз и оценка динамики изменения цен на основные виды строительных материалов (арматурная сталь, бетон) в Московской области, г. Екатеринбурге путем расчетно-экспертного сценарного анализа цен материалов без учета влияния прогнозных изменений геополитической ситуации¹.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось с использованием статистического анализа, экономико-математического моделирования и прогнозирования, факторного

и сценарного анализа на основе структурированного интервью представителей строительной отрасли [15–20].

В целом методику прогнозирования стоимости строительных материалов в условиях неопределенности считаем целесообразным представить как поэтапно уточняемую ранжированную последовательность действий, блок-схема алгоритма методики представлена на рис. 1.

Мониторинг цен на строительные материалы осуществляется на различных уровнях: Росстата, региональных центров ценообразования или департаментов строительства регионов, предприятий при проведении конъюнктурного анализа. В целях прогнозирования стоимости считаем целесообразным произвести экспресс-оценку уровня и динамики цен на исследуемые строительные материалы по данным соответствующих вышеобозначенных служб.

Динамика цен на рассматриваемые материалы, согласно данным Росстата по федеральным округам, к которым относятся исследуемые регионы, представлена на графиках (рис. 2). Приведенная статистика Росстата содержит информацию о средних ценах на приобретенные строительные материалы, детали и конструкции, определенные исходя из цен на виды товаров с конкретными качественными характеристиками².

Динамика цен на арматуру после роста цен летом 2021 г. вследствие картельного сговора поставщиков металлопроката снизилась в связи с проведенными ФАС проверками металлотрейдеров во всех регионах (рис. 2). Скачок цен в марте 2022 г. объясняется геополитическими изменениями. Дальнейшая динамика (после марта 2022 г.) во многом вызвана влиянием политики государства, направленной на снижение цены на металл на внутреннем рынке.

Для построения временного ряда и прогнозного тренда выбраны фактические цены по исследуемым регионам по сведениям региональных департаментов и центров ценообразования в строительстве, целесообразность применения которых для прогнозирования доказана путем проведения корреляционного анализа и обоснования наличия высокого уровня корреляции с данными официальной статистики Росстата.

¹ Новости рынка. URL: <https://cmpro.ru/rus/news/novostirinka/>

² Мониторинг цен металлопроката и стройматериалов. URL: <https://mc.ru/stats/stats>

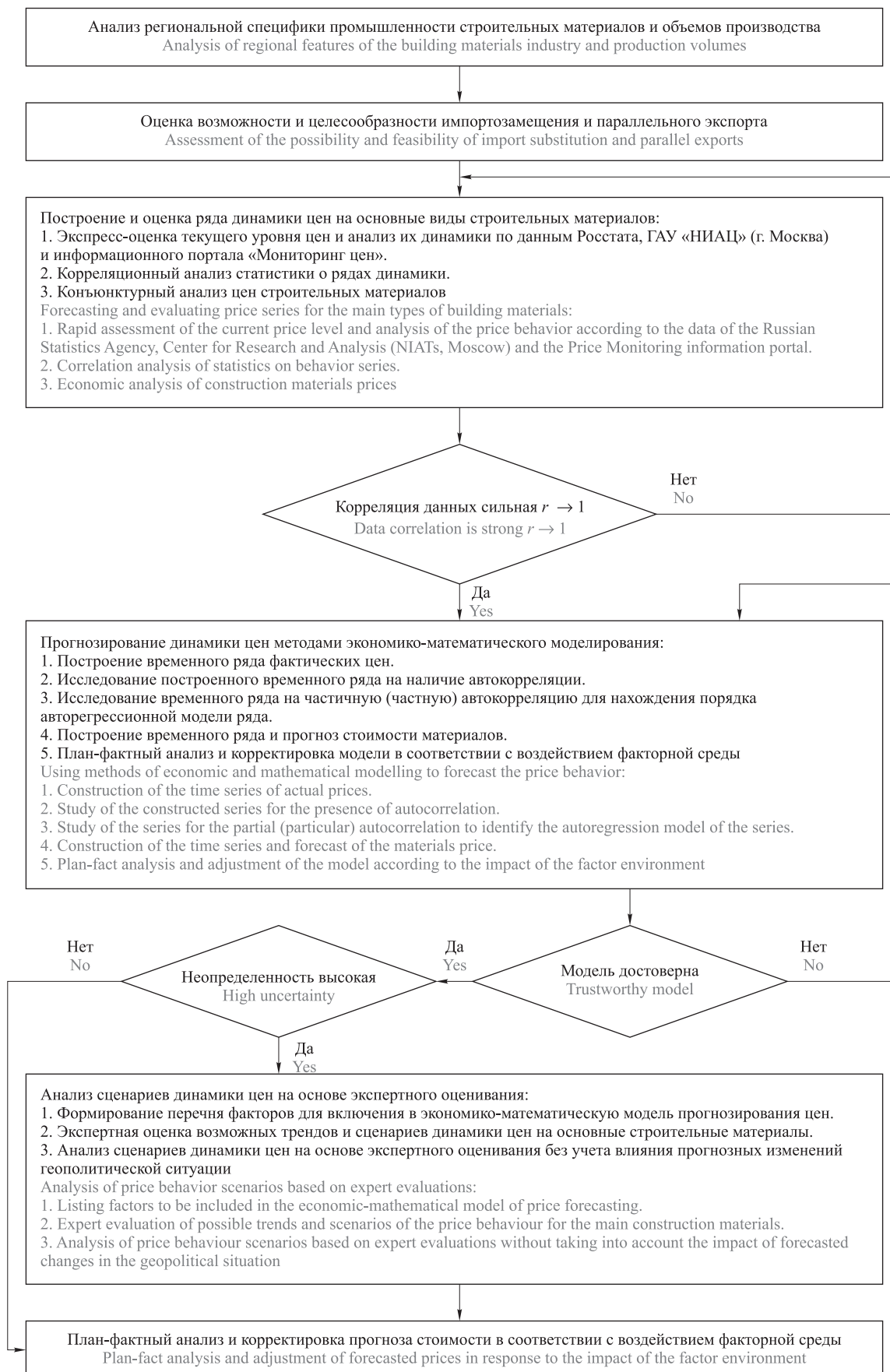


Рис. 1. Методика прогнозирования стоимости строительных материалов в условиях неопределенности

Fig. 1. Method to forecast building materials prices in a context of uncertainty

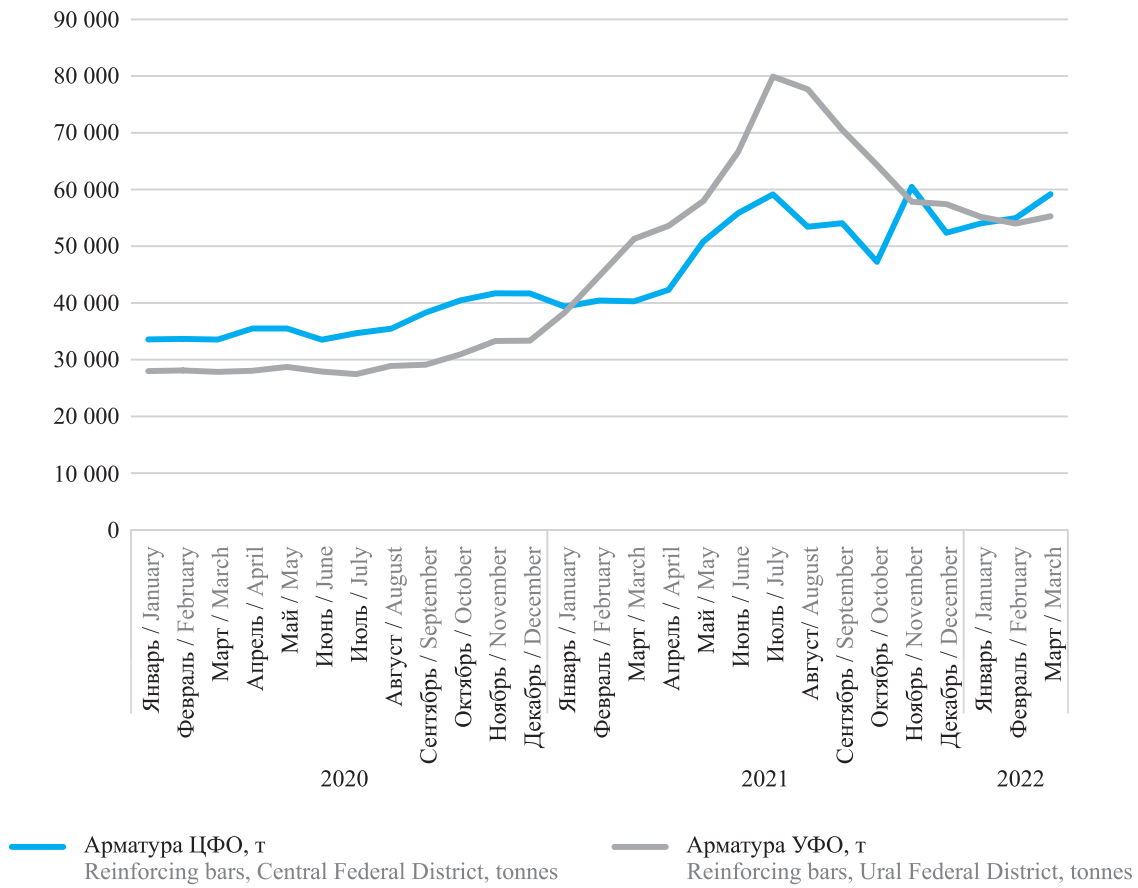


Рис. 2. Динамика цен на арматуру по данным Росстата, руб.

Fig. 2. Rebar price behaviour according to the data of the Federal State Statistics Service, in Russian rubles

С целью прогнозирования применена модель ARIMA авторегрессии с интегрированным скользящим средним.

Для корректного использования модели проведено исследование построенного временного ряда на наличие автокорреляции (рис. 3).

Аналогично выполнено исследование временного ряда на частичную (частную) автокорреляцию

для нахождения порядка авторегрессионной модели ряда (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Практическая реализация модели для построенного временного ряда цены стали арматурной в Московском регионе позволила определить ряд прогнозных значений цены (табл. 1).

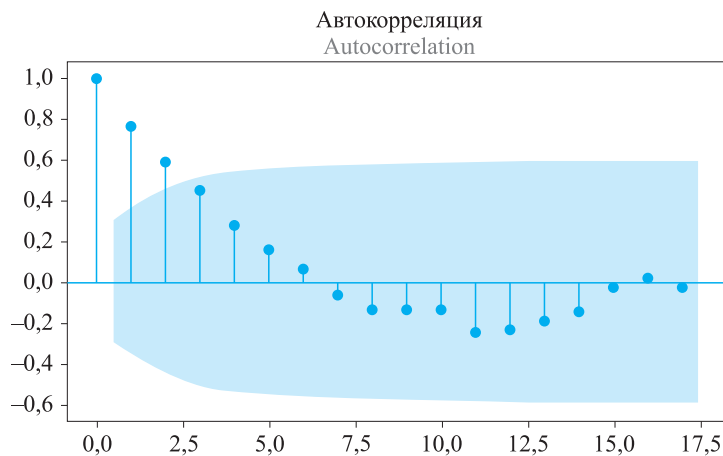


Рис. 3. Исследование временного ряда цены стали арматурной в Московском регионе на автокорреляцию

Fig. 3. A study of the time series of rebar steel prices in the Moscow region

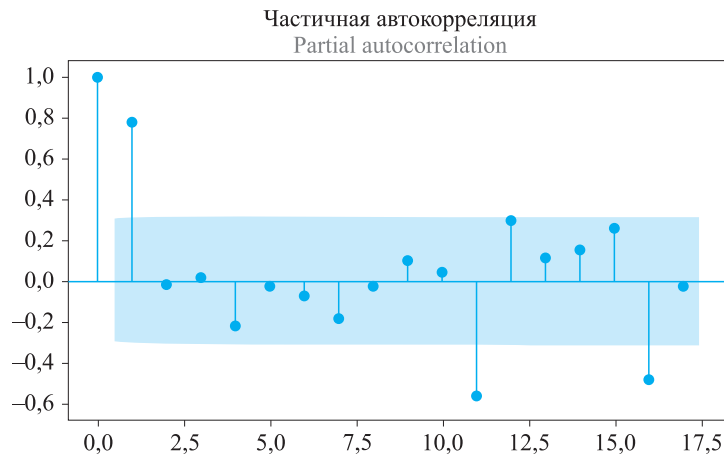


Рис. 4. Исследование временного ряда цены стали арматурной в Московском регионе на частичную автокорреляцию
Fig. 4. Rebar steel prices in the Moscow region: a study of partial autocorrelation of the time series

Табл. 1. Прогнозные значения цены арматуры ф12 А500С в Московском регионе на прогнозный период 3, 6 и 9 месяцев

Table 1. Predicted values of the price of f12 A500C rebars in the Moscow region for the forecast period of 3, 6 and 9 months

Месяцы Months	Прогнозные значения цены Forecast price values
3	59 592,45
6	66 603,02
9	68 685,09

Полученный график временного ряда и прогноз динамики цены арматуры ф12 А500С в Московском регионе представлен на рис. 5.

Согласно результатам прогнозирования ожидается стабилизация динамики цены арматуры с последующим ростом (без учета влияния геополитических факторов). Следует учесть, что эта тенденция характерна и для мирового рынка. Мировой рынок сортового проката стали находится в движении³. Сегодня котировки цен на указанный вид металлопроката показывают небольшой, но стабильный рост⁴.

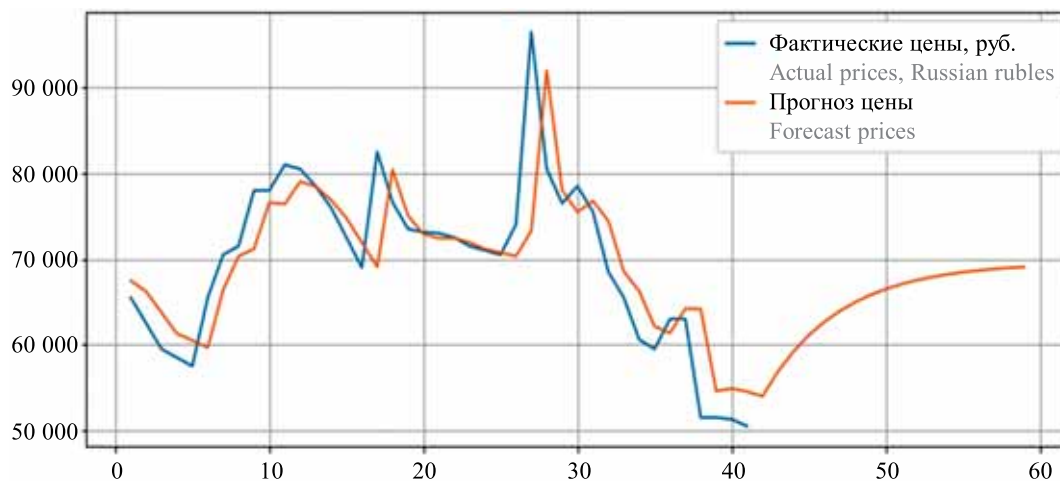


Рис. 5. Прогнозный график временного ряда и прогноз динамики цены арматуры ф12 А500С в Московском регионе
Fig. 5. Forecast time series and the behaviour of forecast f12 A500C rebar prices in the Moscow region

С целью сопоставления прогнозных и фактических значений цены арматуры проведен анализ цены арматуры ф2 А500С в Московском регионе, г. Екатеринбург по данным сайта mcena.ru за май-июль 2022 г., на основании которого и выполнено прогнозирование. В целом отмечается, что фактические значения цены арматуры в рассматриваемых регионах находятся в пределах доверительного интервала

прогноза и отражают тенденцию изменения цены, определенную ранее в процессе прогнозирования⁵.

³ Рынок стали России. URL: <https://www.mcena.ru/analitika/rynok-stali-rossii-v-ozhidanii-zimy-2023-goda>

⁴ Сортовой прокат стали — тенденции рынка. URL: <https://www.mcena.ru/novosti/sortovoj-prokat-stali--tendencii-rynka>

⁵ Минстрой России. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/>

Динамика цены арматуры в Московском регионе наблюдается в пределах доверительного интервала и характеризует общую тенденцию линии тренда (рис. 6).

Однако следует заметить, что в трехмесячном прогнозе отклонение фактических цен от прогнозных находится в пределах от 11 до 14 % в сторону уменьшения цены, что в целом характеризует прогноз как достоверный (табл. 2).

Данное отклонение во многом вызвано влиянием политики государства, направленной на снижение цены на металл на внутреннем рынке⁶.

Результаты прогнозирования показывают (рис. 7), что ожидается некоторое снижение и стабилизация динамики цены арматуры с последующим ростом (без учета влияния геополитических факторов). Выявленный по результатам прогнозирования более низкий уровень цен на арматуру в г. Екатеринбурге по сравнению с Московским регионом является следствием специализации промышленности г. Екатеринбурга и Свердловской области на металлургическом производстве⁷.

Аналогично осуществлено прогнозирование цен на бетон товарный (табл. 3, рис. 8).

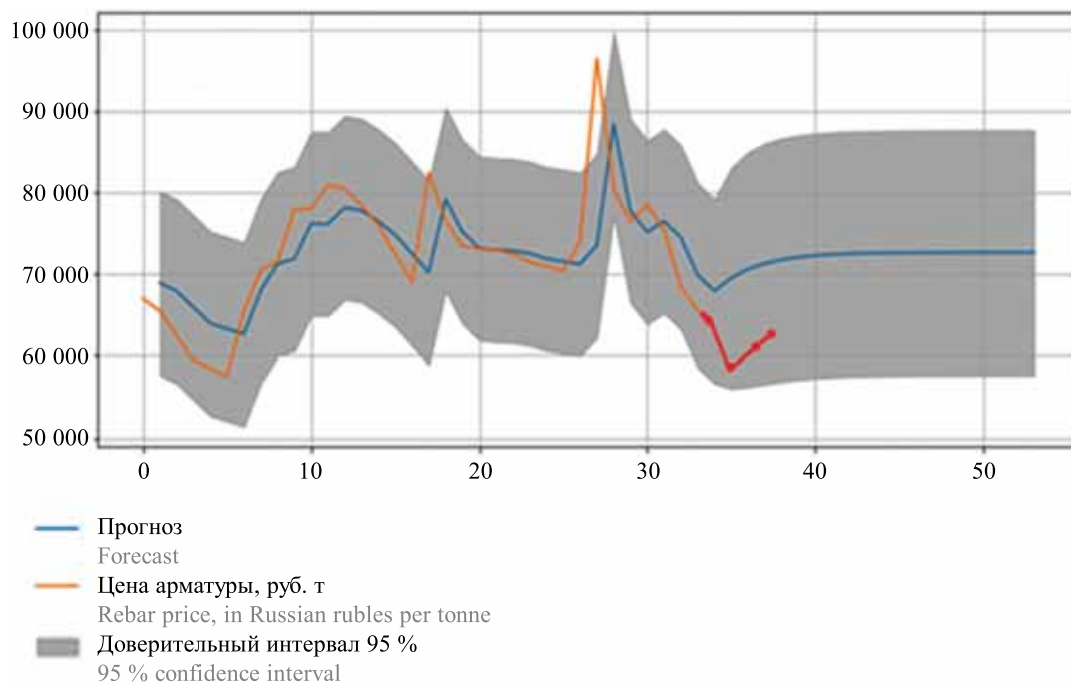


Рис. 6. Сопоставление прогнозных и фактических цен арматуры ф12 А500С в Московском регионе

Fig. 6. Compared actual and forecast prices of f12 A500C rebars in the Moscow region

Табл. 2. Сравнение прогнозных и фактических цен арматуры в Московском регионе в прогнозном интервале 3 месяца

Table 2. Comparison of the actual and predicted prices of rebars in the Moscow region in the forecast interval of 3 months

Отчетный период Reporting period	Фактические цены, руб. Actual prices, Russian rubles	Моделируемая цена, руб. Simulated price, Russian rubles	Отклонение фактического от прогнозного значения цены, % Deviation of the actual price value from the forecast price value, %
01.06.2022	60 590	67 925	89
16.06.2022	59 490	69 555	86
01.07.2022	62 990	70 626	89
17.07.2022	62 990	71 329	88

⁶ ЕМИСС — государственная статистика. URL: <https://www.fedstat.ru/>

⁷ Стоимость стройматериалов: чего ждать в 2022–2023. URL: <https://delovymir.biz/stoimost-stroymaterialov-v-2022-2023-godah.html>

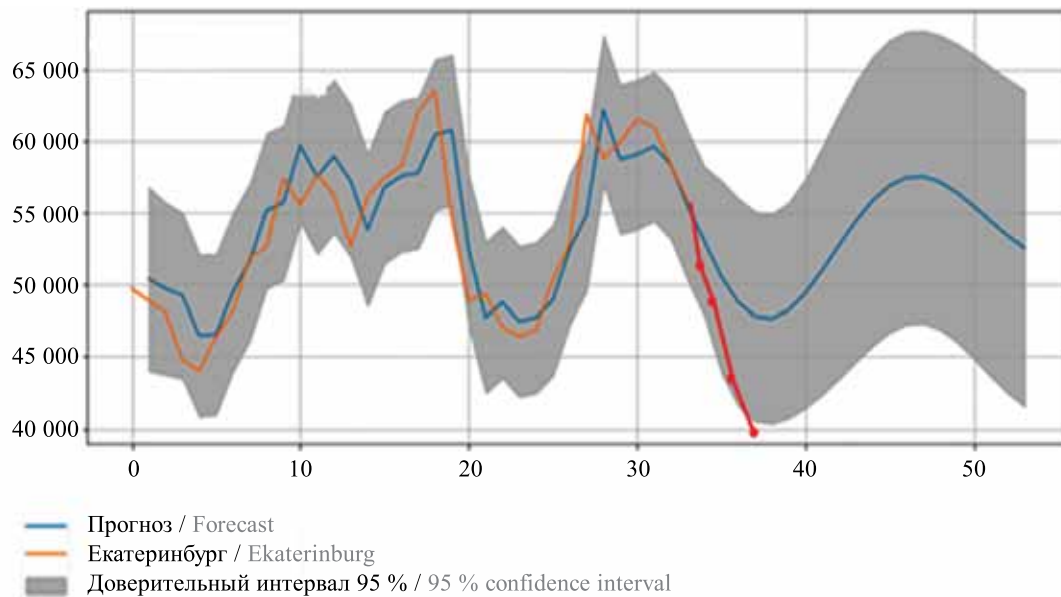


Рис. 7. Сопоставление прогнозных и фактических цен арматуры ф12 А500С в г. Екатеринбург

Fig. 7. Compared actual and forecast prices of f12 A500C rebars in Ekaterinburg city

Табл. 3. Прогнозные значения цены бетона В35 в Московском регионе на прогнозный период 3, 6 и 9 месяцев (источник: данные заказчика, мониторинг цен в свободном доступе⁸, анализ НИУ МГСУ)

Table 3. Forecast values of the price of B35 concrete in the Moscow region for the forecast period of 3, 6 and 9 months (source: customer's data, open-access prices, analysis of MGSU specialists)

Месяцы Months	Прогнозные значения цены Forecast price values
3	5731,41
6	5738,47
9	5732,64

Полученный график временного ряда и прогноз динамики цены бетона В35 в Московском регионе представлен на рис. 8.

Сопоставление прогнозных и фактических цен на бетон товарный проведено для Московской области на примере бетона готового В25 по данным mсena.ru. Результат сопоставительного анализа приведен на рис. 9.

Рост фактических цен был вызван, во-первых, увеличением спроса вследствие сезонного характера строительных работ, а также ростом цены на доставку цемента в связи с увеличением ставок операторов на привлечение подвижного состава согласно статистике ОАО «РЖД». Повышение железнодорожных

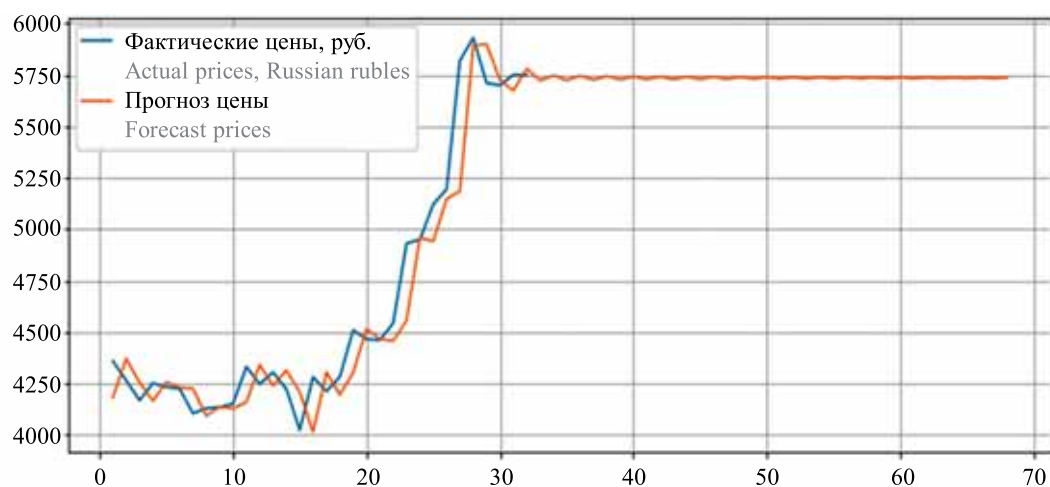


Рис. 8. Прогнозный график временного ряда и прогноз динамики цены бетона В35 в Московском регионе

Fig. 8. Forecast time series and behaviour of the forecast price for B35 concrete in the Moscow region

⁸ Мониторинг цен. URL: <https://www.mcena.ru/>

тарифов, несмотря на принятое Правительством РФ решение об отмене индексации грузовых тарифов на перевозку строительных грузов, объясняется индексацией на 11 % тарифов на порожний пробег вагонов, а также расценок на доставку топлива и отдельных видов материалов (уголь, на котором

работают многие российские цементные заводы, или, к примеру, футеровочный кирпич)⁹. В дальнейшем прогнозируется стабилизация цены на достигнутом уровне благодаря окончанию сезонных работ и принимаемым государством мер по стабилизации рыночной конъюнктуры.

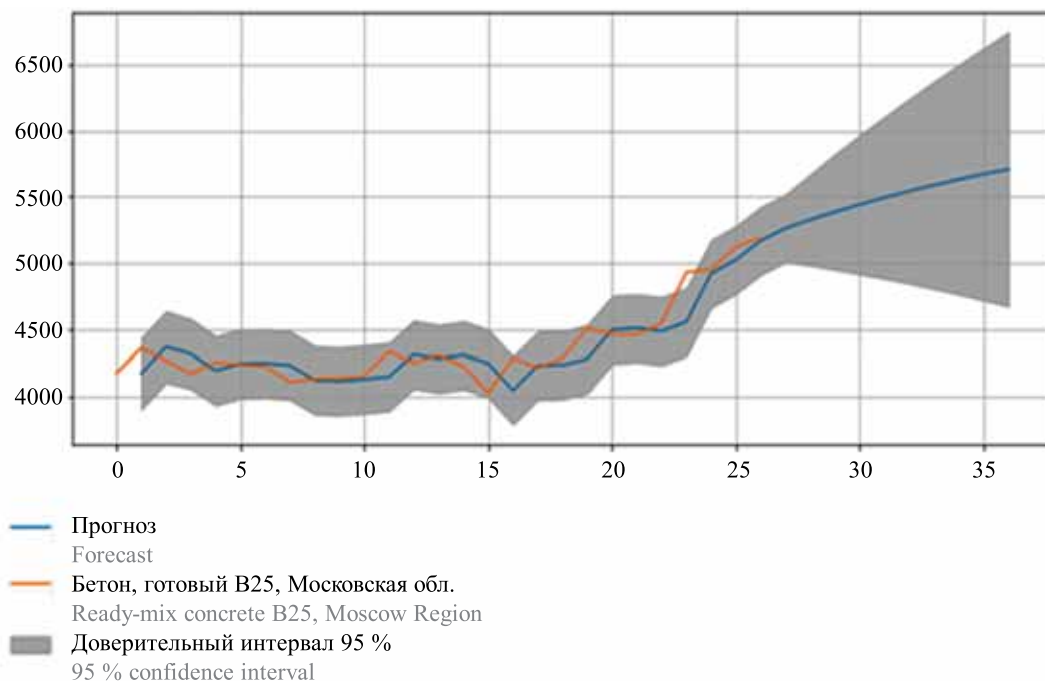


Рис. 9. Сопоставление прогнозных и фактических цен на бетон В25 в Московском регионе за май–июль 2022 г.

Fig. 9. Compared actual and forecast prices for B25 concrete in the Moscow region in May to July 2022

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

С учетом выполненного прогнозирования и результатов экспертной оценки можно заключить, что в 2022 г. не ожидается сильного снижения цен на стройматериалы: при самом оптимистичном сценарии их рост замедлится до 2–3 %. Однако в базовом сценарии прогнозируется рост цен в совокупности на 7–8 %. Пессимистичный сценарий предусматривает еще больший рост цен на 16–25 %. Реализация того или иного сценария находится в зависимости главным образом от факторов санкционного давления, изменения экономической ситуации, ставки рефинансирования, объемов ипотечного кредитования и проектного финансирования, а также реализации

госпрограмм. На объемы потребления строительных материалов может оказать влияние расширение рынка строительства за счет программ по восстановлению освобожденных территорий. В 2022 г. ожидается стабилизация или небольшое снижение цен на арматуру с их дальнейшим ростом, что объясняется потребностью покрытия издержек производителей металлопроката в условиях сокращения экспорта.

Результаты прогнозирования, считаем, подтверждают тезис о необходимости постоянного мониторинга и корректировки финансовой модели проектов с учетом рисков динамики ценообразующих факторов, проведении план-фактного анализа и реализации мер адаптивного управления рисками проектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Филатов К.В. Влияние цены стройматериалов на себестоимость строительства в современных условиях // Бизнес-образование в экономике знаний. 2021. № 2 (19). С. 111–113.
2. Orlov A.K., Kankhva V.S. Lean construction concept used to develop infrastructure facilities for

tourism clusters // Buildings. 2021. Vol. 12. Issue 1. P. 23. DOI: 10.3390/buildings12010023

3. Ефремян Б.Л., Канхва В.С. Перераспределение приоритетов в управлении рисками в жилищном

⁹ НИАЦ. URL: <https://niac.mos.ru/>

строительстве в условиях последствий внешних шоков // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 6. С. 756–768. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.756-768

4. 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

5. 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

6. Гринберг Р.С., Белозёров 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

7. Walentek D. Instrumental or symbolic? The role of multilateral economics sanctions. 2019. URL: https://www.peio.me/wp-content/uploads/2019/01/PEIO12_paper_19.pdf

8. Smeets M. The theory and practice of economic sanctions // Russian Trade Policy. 2019. Pp. 66–78. DOI: 10.4324/9780429464041

9. Chakraborty D., Elhegazy H., Elzarka H., Gutierrez L. A novel construction cost prediction model using hybrid natural and light gradient boosting // Advanced Engineering Informatics. 2020. Vol. 46. P. 101201. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101201

10. Streicher K.N., Mennel S., Chambers J., Parra D., Patel M.K. Cost-effectiveness of large-scale deep energy retrofit packages for residential buildings under different economic assessment approaches // Energy and Buildings. 2020. Vol. 215. P. 109870. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109870

11. Chen I., Chuo Y.-Y., Ma H. Uncertainty analysis of remediation cost and damaged land value for brownfield investment // Chemosphere. 2019. Vol. 220. Pp. 371–380. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.12.116

12. Kim H.-J., Seo Y.-C., Hyun C.-T. A hybrid conceptual cost estimating model for large building

projects // Automation in Construction. 2012. Vol. 25. Pp. 72–81. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.04.006

13. Acuña-Díaz O., Al-Halawani N., Alonso-Barneto M., Ashirbekov A., Ruiz-Flores C., Rojas-Solórzano L. Economic viability of phase-changing materials in residential buildings — A case study in Alice Springs, Australia // Energy and Buildings. 2022. Vol. 254. P. 111612. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111612

14. Aïssani A., Chateaufneuf A., Fontaine J.-P., Audebert Ph. Cost model for optimum thicknesses of insulated walls considering indirect impacts and uncertainties // Energy and Buildings. 2014. Vol. 84. Pp. 21–32. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.07.090

15. Sarcheshmehpour M., Estekanchi H.E. Life cycle cost optimization of earthquake-resistant steel framed tube tall buildings // Structures. 2021. Vol. 30. Pp. 585–601. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.01.038

16. Dziadosz A. The influence of solutions adopted at the stage of planning the building investment on the accuracy of cost estimation // Procedia Engineering. 2013. Vol. 54. Pp. 625–635. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.03.057

17. Angeles K., Kijewski-Correa T. Advancing building data models for the automation of high-fidelity regional loss estimations using open data // Automation in Construction. 2022. Vol. 140. P. 104382. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104382

18. Curto D., Acebes F., González-Varona J.M., Poza D. Impact of aleatoric, stochastic and epistemic uncertainties on project cost contingency reserves // International Journal of Production Economics. 2022. Vol. 253. P. 108626. DOI: 10.1016/j.ijpe.2022.108626

19. Liu X., Noonan D. Building underwater: Effects of community-scale flood management on housing development // Journal of Housing Economics. 2022. Vol. 57. P. 101854. DOI: 10.1016/j.jhe.2022.101854

20. Dodd T., Guthrie J., Dumay J. Management controls and modern slavery risks in the building and construction industry: Lessons from an Australian social housing provider // The British Accounting Review. 2022. P. 101098. DOI: 10.1016/j.bar.2022.101098

Поступила в редакцию 31 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 6 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 6 февраля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Константинович Орлов — кандидат экономических наук, доцент, директор института «Экономика, управление и коммуникации в сфере строительства и недвижимости»; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3545-1668, Scopus: 57192545943, ResearcherID: AAH-8610-2019, ORCID: 0000-0003-1800-5478; orlovak@mgsu.ru;

Владимир Александрович Болгов — кандидат экономических наук, доцент кафедры цифровой и отраслевой экономики; Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; SPIN-код: 2814-7129, Scopus: 571944440216, ResearcherID: AAD-3421-2022, ORCID: 0000-0002-6563-9783; bolgov@vgtu.ru.

Вклад авторов:

Орлов А.К. — научное редактирование, нормативно-методическое обеспечение.

Болгов В.А. — разработка концепции исследования, написание текста статьи, подготовка итоговых выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Filatov K. Influence of the building materials' price on the construction self-cost in modern conditions. *Business Education in the Knowledge Economy*. 2021; 2(19):111-113. (rus.).
2. Orlov A.K., Kankhva V.S. Lean construction concept used to develop infrastructure facilities for tourism clusters. *Buildings*. 2021; 12(1):23. DOI: 10.3390/buildings12010023
3. 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.).
4. 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.).
5. Kurmanova L.R., Sadykova A.I., Khabibullin R.G. Trends in the development of housing construction in modern conditions. *Innovative Development of Economy*. 2021; 5(65):105-113. DOI: 10.51832/2223-798420215105 (rus.).
6. 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.).
7. Walentek D. *Instrumental or Symbolic? The Role of Multilateral Economics Sanctions*. 2019. URL: https://www.peio.me/wp-content/uploads/2019/01/PEIO12_paper_19.pdf
8. Smeets M. The theory and practice of economic sanctions. *Russian Trade Policy*. 2019; 66-78. DOI: 10.4324/9780429464041
9. Chakraborty D., Elhegazy H., Elzarka H., Gutierrez L. A novel construction cost prediction model using hybrid natural and light gradient boosting. *Advanced Engineering Informatics*. 2020; 46:101201. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101201
10. Streicher K.N., Mennel S., Chambers J., Parra D., Patel M.K. Cost-effectiveness of large-scale deep energy retrofit packages for residential buildings under different economic assessment approaches. *Energy and Buildings*. 2020; 215:109870. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109870
11. Chen I., Chuo Y.-Y., Ma H. Uncertainty analysis of remediation cost and damaged land value for brownfield investment. *Chemosphere*. 2019; 220: 371-380. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.12.116
12. Kim H.-J., Seo Y.-C., Hyun C.-T. A hybrid conceptual cost estimating model for large building projects. *Automation in Construction*. 2012; 25:72-81. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.04.006
13. Acuña-Díaz O., Al-Halawani N., Alonso-Barreto M., Ashirbekov A., Ruiz-Flores C., Rojas-Solórzano L. Economic viability of phase-changing materials in residential buildings — A case study in Alice Springs, Australia. *Energy and Buildings*. 2022; 254:111612. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111612
14. Aïssani A., Chateaufneuf A., Fontaine J.-P., Audebert Ph. Cost model for optimum thicknesses of insulated walls considering indirect impacts and uncertainties. *Energy and Buildings*. 2014; 84:21-32. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.07.090
15. Sarcheshmehpour M., Estekanchi H.E. Life cycle cost optimization of earthquake-resistant steel framed tube tall buildings. *Structures*. 2021; 30:585-601. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.01.038
16. Dziadosz A. The Influence of Solutions Adopted at the Stage of Planning the Building Investment on the Accuracy of Cost Estimation. *Procedia Engineering*. 2013; 54:625-635. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.03.057
17. Angeles K., Kijewski-Correa T. Advancing building data models for the automation of high-fidelity regional loss estimations using open data. *Automation in Construction*. 2022; 140:104382. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104382
18. Curto D., Acebes F., González-Varona J.M., Poza D. Impact of aleatoric, stochastic and epistemic uncertainties on project cost contingency reserves. *International Journal of Production Economics*. 2022; 253:108626. DOI: 10.1016/j.ijpe.2022.108626
19. Liu X., Noonan D. Building underwater: Effects of community-scale flood management on housing development. *Journal of Housing Economics*. 2022; 57:101854. DOI: 10.1016/j.jhe.2022.101854
20. Dodd T., Guthrie J., Dumay J. Management controls and modern slavery risks in the building and construction industry: Lessons from an Australian social housing provider. *The British Accounting Review*. 2022; 101098. DOI: 10.1016/j.bar.2022.101098

Received October 31, 2022.

Adopted in revised form on February 6, 2023.

Approved for publication on February 6, 2023.

BIONOTES: **Alexandr K. Orlov** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Economics, Management and Communications in Construction and Real Estate; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3545-1668, Scopus: 57192545943, ResearcherID: AAH-8610-2019, ORCID: 0000-0003-1800-5478; orlovak@mgsu.ru;

Vladimir A. Bolgov — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Digital and Sectoral Economics; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84 20th Anniversary of October st., Voronezh, 394006, Russian Federation; SPIN-code: 2814-7129, Scopus: 571944440216, ResearcherID: AAD-3421-2022, ORCID: 0000-0002-6563-9783; bolgov@vgtu.ru.

Contribution of the authors:

Alexandr K. Orlov — development of the research concept, writing the text of the article, preparation of final conclusions.

Vladimir A. Bolgov — scientific editing, normative and methodological support.

The authors declare 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: заголовков, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов. Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (\mathbf{a} , \mathbf{b} и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников **на английском языке (reference)** оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 1111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ *Место работы первого автора; город, страна*

² *Место работы первого автора; город, страна*

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ *Место работы первого автора; город, страна* – на английском языке

² *Место работы первого автора; город, страна* – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi notes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

Contribution of the authors: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Извещение	<i>Форма № ПД-4</i>		
	УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001 <small>(наименование получателя платежа)</small>		
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">7 7 1 6 1 0 3 3 9 1 <small>(ИНН получателя платежа)</small></td> <td style="width: 50%; text-align: center;">0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0 <small>(номер счета получателя платежа)</small></td> </tr> </table>	7 7 1 6 1 0 3 3 9 1 <small>(ИНН получателя платежа)</small>	0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0 <small>(номер счета получателя платежа)</small>
	7 7 1 6 1 0 3 3 9 1 <small>(ИНН получателя платежа)</small>	0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0 <small>(номер счета получателя платежа)</small>	
	в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> <small>(наименование банка получателя платежа)</small> БИК <u>0 0 4 5 2 5 9 8 8</u>		
	КБК <u>0 1 3 0</u>		
	ОКТМО <u>4 5 3 6 5 0 0 0</u>		
	Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь 2023 г.		
	_____ <small>(наименование платежа)</small> Вестник МГСУ _____ <small>(номер лицевого счета (код) плательщика)</small>		
	Ф.И.О. _____ плательщика _____ Адрес _____ плательщика _____		
Сумма _____ платежа <u>3 822</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп. Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г. С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.			
Подпись плательщика _____			
Квитанция	<i>Форма № ПД-4</i>		
	УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001 <small>(наименование получателя платежа)</small>		
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">7 7 1 6 1 0 3 3 9 1 <small>(ИНН получателя платежа)</small></td> <td style="width: 50%; text-align: center;">0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0 <small>(номер счета получателя платежа)</small></td> </tr> </table>	7 7 1 6 1 0 3 3 9 1 <small>(ИНН получателя платежа)</small>	0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0 <small>(номер счета получателя платежа)</small>
	7 7 1 6 1 0 3 3 9 1 <small>(ИНН получателя платежа)</small>	0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0 <small>(номер счета получателя платежа)</small>	
	в <u>ГУ Банка России по ЦФО</u> <small>(наименование банка получателя платежа)</small> БИК <u>0 0 4 5 2 5 9 8 8</u>		
	КБК <u>0 1 3 0</u>		
	ОКТМО <u>4 5 3 6 5 0 0 0</u>		
	Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь 2023 г.		
	_____ <small>(наименование платежа)</small> Вестник МГСУ _____ <small>(номер лицевого счета (код) плательщика)</small>		
	Ф.И.О. _____ плательщика _____ Адрес _____ плательщика _____		
Сумма _____ платежа <u>3 822</u> руб. <u>00</u> коп. услуги _____ руб. _____ коп. Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г. С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.			
Подпись плательщика _____			

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgisu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 14-23), podpiska@mgisu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgisu.ru/>



УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО 4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2023 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО 4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2023 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 14-23), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

