

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 19. Выпуск 12
2024**

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

Сквозной номер 193

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 19. Issue 12
2024**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	25.12.2024.
Подписан в свет	28.12.2024.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 18,71. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 411	

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Йозеф 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), проф., Институт Клокнера Чешского технического университета в Праге, Чешская Республика

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

Дмитрий Вячеславович Козлов, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Дизайн и верстка: *Алина Юрьевна Байкова*

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 «Кибер.Ленинка», UlrichsWeb Global Serials Directory, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, RSCI (Russian Science Citation Index на платформе Web of Science), ResearchBib

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	28.12.2024

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

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

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

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

М.А. Салахутдинов, Д.Н. Арипов, А.Р. Ханеков, С.С. Киселев
Экспериментальные исследования несущей способности балок составного двутаврового сечения
из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) 1883

И.В. Демьянушко, О.В. Титов, П.С. Михеев, И.А. Карпов
Цифровое моделирование разрушения в элементах дорожных ограждений при ударном наезде
автомобиля 1896

В.В. Филатов, Т.Л.К. Хоанг
Упрощенный вариант методики расчета многослойных составных стержней
по теории А.Р. Ржаницына 1920

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

С.А. Чернов, Е.В. Леконцев, В.С. Шрейнер, А.В. Фукс, А.И. Пискунов
Исследование эффективности использования шлаков черной металлургии в слоях основания
дорожной одежды 1937

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Л.В. Волгина, С.А. Сергеев, А.А. Романова
Особенности проектирования систем гидротранспорта горнообогатительных фабрик 1951

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.В. Федюхин, В.А. Карасевич, М.С. Повернов, О.В. Афанасьева
Тепловой аккумулятор с теплоизоляционным материалом на основе аэрогеля 1963

В.А. Чухин, Н.А. Макиша
Особенности развития питтинговой коррозии стальных труб систем водоснабжения 1977

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

С.Г. Стерник, И.Ф. Гареев, А.М. Насрутдинов
Исследование структурных изменений территориального развития республики Татарстан 1990

Я.Д. Агеева, Ю.А. Чиркунов, А.А. Липидус
Планирование системы снабжения строительства в стесненных условиях методом динамического
программирования 2001

С.Б. Сборщиков, Н.В. Лазарева
Конвергенция как новая парадигма организации инжиниринга и реинжиниринга в строительстве 2014

Требования к оформлению научной статьи 2025

CONTENTS

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

Marat A. Salakhutdinov, Daler N. Aripov, Arslan R. Khanekov, Sergey S. Kiselev
Experimental studies of the bearing capacity of composite cross section beams made of pultrusion fiberglass rofile (PFP) 1883

Irina V. Demiyanyushko, Oleg V. Titov, Pavel S. Mikheev, Ilya A. Karpov
Digital modelling of failure of road barrier elements under impact of vehicle collision 1896

Vladimir V. Filatov, Thi Linh Quyen Hoang
A simplified version of the method of calculation of multilayer composite rods according to the theory of A.R. Rzhanytsyn 1920

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Sergey A. Chernov, Evgeny V. Lekontsev, Victoria S. Schreine, Alexander V. Fuchs, Alexey I. Piskunov
Research of efficiency of ferrous metallurgy slag use in pavement base layers 1937

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Lyudmila V. Volgina, Stanislav A. Sergeev, Anastasia A. Romanova
Design of hydraulic transport systems for mining and processing plants 1951

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Alexander V. Fedyukhin, Vladislav A. Karasevich, Mihail S. Povernov, Ol'ga V. Afanas'eva
Heat accumulator with aerogel-based thermal insulation material. 1963

Valentin A. Chukhin, Nikolay A. Makisha
Development of pitting corrosion of steel pipes of water supply systems 1977

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION.
ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Sergey G. Sternik, Ilnur F. Gareev, Arslan M. Nasrutdinov
Study of structural changes in the territorial development of the republic of Tatarstan 1990

Yaroslava D. Ageeva, Yuri A. Chirkunov, Azariy A. Lapidus
Planning of construction supply system in constrained conditions using the dynamic programming method 2001

Sergej B. Sborshchikov, Natal'ya V. Lazareva
Convergence as a new paradigm of engineering and reengineering in construction 2014

Requirements for research paper design 2025

1881

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 12, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 12, 2024

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.011.78

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1883-1895

Экспериментальные исследования несущей способности балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП)

Марат Айдарович Салахутдинов, Далер Насимович Арипов,
Арслан Реджепович Ханекоев, Сергей Сергеевич Киселев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматриваются результаты натурных испытаний балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) для оценки их несущей способности и прогибов. Актуальность исследования обусловлена ограничением применения сплошных балок из пултрузионных стеклопластиковых профилей для относительно больших пролетов, что требует применения балок составного сечения. Разработаны конструктивные решения балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей, пояса которых выполнены из парных уголков, со сплошной и перфорированной стенками. В настоящее время отсутствует действующая нормативная документация на уровне сводов правил или ГОСТ, в которых приведена методика расчета несущей способности для составных сечений из ПСП, особенно балок с перфорированной стенкой.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования выполнялись на трехточечный изгиб. В процессе натурных испытаний фиксировались вертикальные перемещения балок и деформации стенки относительно поперечных осей.

Результаты. По результатам натурных испытаний определены несущая способность, прогибы составной двутавровой балки со сплошной и перфорированной стенками. Проведен сравнительный анализ с результатами экспериментальных и численных исследований.

Выводы. Значимость натурных испытаний заключается в оценке несущей способности и прогибов балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей при трехточечном изгибе, возможности дальнейшего развития и совершенствования методики их расчета.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пултрузия, стеклопластиковый профиль, несущая способность, балка составного двутаврового сечения, изгиб балки, перфорированная стенка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Салахутдинов М.А., Арипов Д.Н., Ханекоев А.Р., Киселев С.С. Экспериментальные исследования несущей способности балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1883–1895. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1883-1895

Автор, ответственный за переписку: Арслан Реджепович Ханекоев, khanekova@kgasu.ru

Experimental studies of the bearing capacity of composite cross section beams made of pultrusion fiberglass rofile (PFP)

Marat A. Salakhutdinov, Daler N. Aripov, Arslan R. Khanekov, Sergey S. Kiselev
Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article discusses the results of field tests of composite I-beam beam made of pultrusion fiberglass profiles (PSP) to assess their bearing capacity and deflections. The relevance of the study is due to the limited use of solid beams made of pultrusion fiberglass profiles for relatively large spans, which requires the use of composite beams. Constructive solutions have been developed for beams of composite I-section made of pultrusion fiberglass profiles, the belts of which are

made of paired corners, with solid and perforated walls. Currently, there is no current regulatory documentation at the level of codes of practice or GOST, which provides a method for calculating the bearing capacity for composite sections made of PSP, especially beams with a perforated wall.

Materials and methods. Experimental studies were performed on a three-point bend. During the field tests, vertical movements of the beams and wall deformations relative to the shelves were recorded.

Results. According to the results of field tests, the bearing capacity, deflections, and composite I-beams with solid and perforated walls were determined. A comparative analysis with the results of experimental and numerical studies has been carried out.

Conclusions. The significance of field tests is to assess the bearing capacity and deflections, beams of composite I-section made of pultrusion fiberglass profiles with three-point bending, the possibility of further development and improvement of their calculation methods.

KEYWORDS: pultrusion, fiberglass profile, bearing capacity, composite cross-section beam, bending of the beam, perforated wall

FOR CITATION: Salakhutdinov M.A., Aripov D.N., Khanekov A.R., Kiselev S.S. Experimental studies of the bearing capacity of composite cross section beams made of pultrusion fiberglass profile (PFP). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1883-1895. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1883-1895 (rus.).

Corresponding author: Arslan R. Khanekov, khanekova@kgas.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиты широко применяются при строительстве объектов транспортной инфраструктуры и жилищно-коммунального хозяйства, а также в гражданском и промышленном строительстве, как самостоятельные конструктивные системы [1], так и в виде элементов усиления несущих конструкций углепластиком на эпоксидных адгезивах [2, 3]. Композитные материалы используются в бетонах в качестве арматуры [4]. Использование пултрузионных стеклопластиковых профилей в определенной мере является альтернативой традиционным материалам в промышленном и гражданском строительстве. Составные балки могут выйти из строя в результате местной и общей потери устойчивости, а также их взаимодействия [5–7]. Местная устойчивость балок из ПСП исследована для различных типов поперечных сечений [8–10], как экспериментально [11–15], так и с применением аналитических и численных подходов [16–17]. При прочностном анализе конструкции из пултрузионных стеклопластиковых профилей используется, как правило, феноме-

нологический подход к описанию свойств композитного материала, согласно которому композит рассматривается как условно однородный анизотропный материал [18]. Рекомендации по расчету и конструированию данных профилей показывают, что одной из проблем при разработке конструкций из стеклопластика является обеспечение требуемой прочности и деформативности [19], зависящих от решения узловых соединений [20], которые выполняются преимущественно болтами [21].

Ферменные и рамные конструкции из ПСП известны в практике строительства уже более 30 лет [22]. Пултрузионные стеклопластиковые профили могут применяться в пешеходных и автомобильных мостах [23–25], временных каркасных сооружениях [26]. В основном для покрытия и перекрытия зданий или сооружений применяются балки из ПСП сплошного сечения (двутавры, швеллеры, квадратные и прямоугольные трубы). Однако, величина максимального пролета таких балок ограничена и зависит от шага их установки. Для обеспечения больших пролетов требуется применение балок составного сечения из ПСП. В настоящее время отсутствует действующая норма-

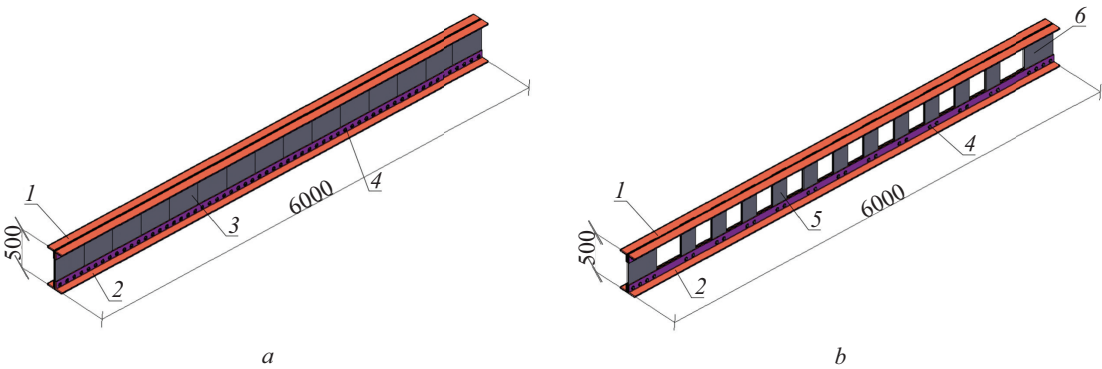


Рис. 1. Разработанные балки составного двутаврового сечения из ПСП: а — со сплошной стенкой; б — с перфорированной стенкой: 1 — парные уголки верхнего пояса, 2 — парные уголки нижнего пояса, 3 — сплошная стенка, 4 — болт М16, 5 — средний лист, 6 — крайний лист

Fig. 1. Designed beams of composite I-beam section made of PSP: а — with continuous stem; б — with a perforated stem: 1 — top flange double angle, 2 — lower chord double angle, 3 — continuous stem, 4 — bolt M16, 5 — medium plate, 6 — margin plate

тивная документация на уровне сводов правил или ГОСТ, в которых приведена методика расчета несущей способности для составных сечений из ПСП, особенно балок с перфорированной стенкой. Таким образом, необходимо проводить натурные исследования таких балок для оценки их фактической несущей способности и возможности разработки их методики расчета.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разрабатываются балки составного двутаврового сечения высотой 500 мм со сплошной (рис. 1, *a*) и перфорированной стенками (рис. 1, *b*) из ПСП пролетом 6 м.

Верхняя и нижняя полки балки выполнены из уголков сечением 105 × 13 мм, стенка сплошной балки —

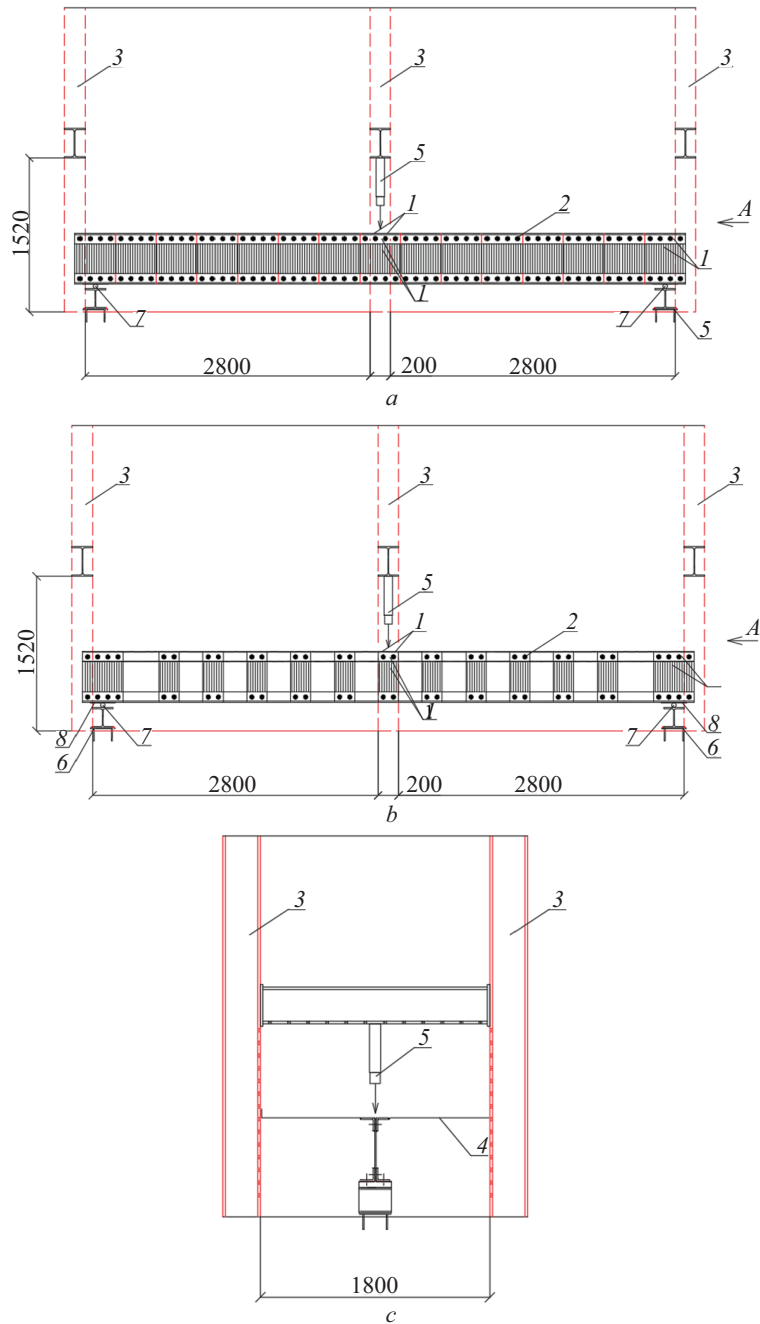


Рис. 2. Схема стенда испытаний: *a* — для балки составного двутаврового сечения со сплошной стенкой из ПСП; *b* — для балки составного двутаврового сечения с перфорированной стенкой из ПСП; *c* — поперечный вид балки *a*: 1 — тензодатчики, 2 — болты М16, 3 — опорная рама, 4 — металлические распорки, 5 — гидравлический универсальный домкрат, 6 — металлическая опора, 7 — труба диаметром 45 × 3 мм, 8 — опорная пластина

Fig. 2. The scheme of the test bench: *a* — for a beam of composite I-beam section with a continuous stem made of PSP; *b* — for a beam of composite I-beam section with a perforated stem made of PSP; *c* — cross-section view of beam *a*: 1 — strain gauge, 2 — bolt M16, 3 — bearing frame, 4 — steel lagging, 5 — hydraulic universal jack, 6 — steel support, 7 — pipe diameter 45 × 3 mm, 8 — support plate

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19, Выпуск 12, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19, Issue 12, 2024



Рис. 3. Испытательный стенд и экспериментальные образцы из ПСП: *a* — со сплошной стенкой; *b* — с перфорированной стенкой: 1 — экспериментальный образец, 2 — испытательный стенд, 3 — гидравлический домкрат, 4 — тензостанция, 5 — тахеометр

Fig. 3. Test bench and test specimen: *a* — for a beam of composite I-beam section with a continuous stem made of PSP; *b* — for a beam of composite I-beam section with a perforated stem made of PSP: 1 — test specimen, 2 — test bench, 3 — hydraulic universal jack, 4 — strain-gauge station, 5 — tachometer

двойной толщины из пултрузионных стеклопластиковых листов размерами 500 × 400 мм толщиной 10 мм каждый по всей длине балки, установленных в шахматном порядке со смещением в 200 мм.

Полки балки составного двутаврового сечения с перфорированной стенкой выполнены из пултрузионных стеклопластиковых уголков сечением 105 × 13 мм, стенка выполнена из пултрузионных стеклопластиковых листов, крайние — размерами 500 × 400 мм толщиной 10 мм, средние — размерами 500 × 200 мм толщиной 10 мм, установленные с шагом 230 мм [27].

Элементы полок и стенки балок составного сечения соединены между собой стальными болтами М16 без контролируемого натяжения, установленными с шагом 100 мм.

Натурные испытания проводились на базе НОЦ «Прочность» КГАСУ¹. Образцы балок составного двутаврового сечения из ПСП для испытания предоставлены ООО «Татнефть-Пресскомпозит»². На рис. 2 приведена схема испытаний балок.

По краям балок дополнительно установлены опорные пластины для преждевременного разрушения опорной зоны. В рамках натурного испытания

¹ Научно-образовательный центр «Прочность» КГАСУ. URL: <https://www.kgasu.ru/science/noc/#prochnost> (дата обращения: 12.12.2023).

² Композиционные материалы SMC/BMC технологичность. Качество. Профессионализм. URL: <https://www.tnpc.ru/> (дата обращения: 25.10.2023).

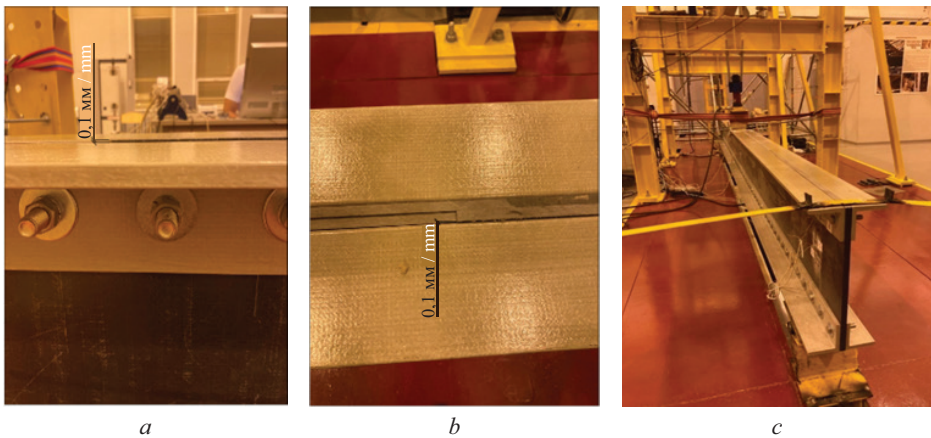


Рис. 4. Испытания балки со сплошной стенкой: *a*, *b* — деформации в виде смещения элементов сплошной стенки балки относительно поясов; *c* — общий вид деформации балки

Fig. 4. Testing of a solid wall beam: *a*, *b* — deformations in the form of displacement of the elements with a continuous stem of the beam relative to the belts; *c* — general view of beam deformation

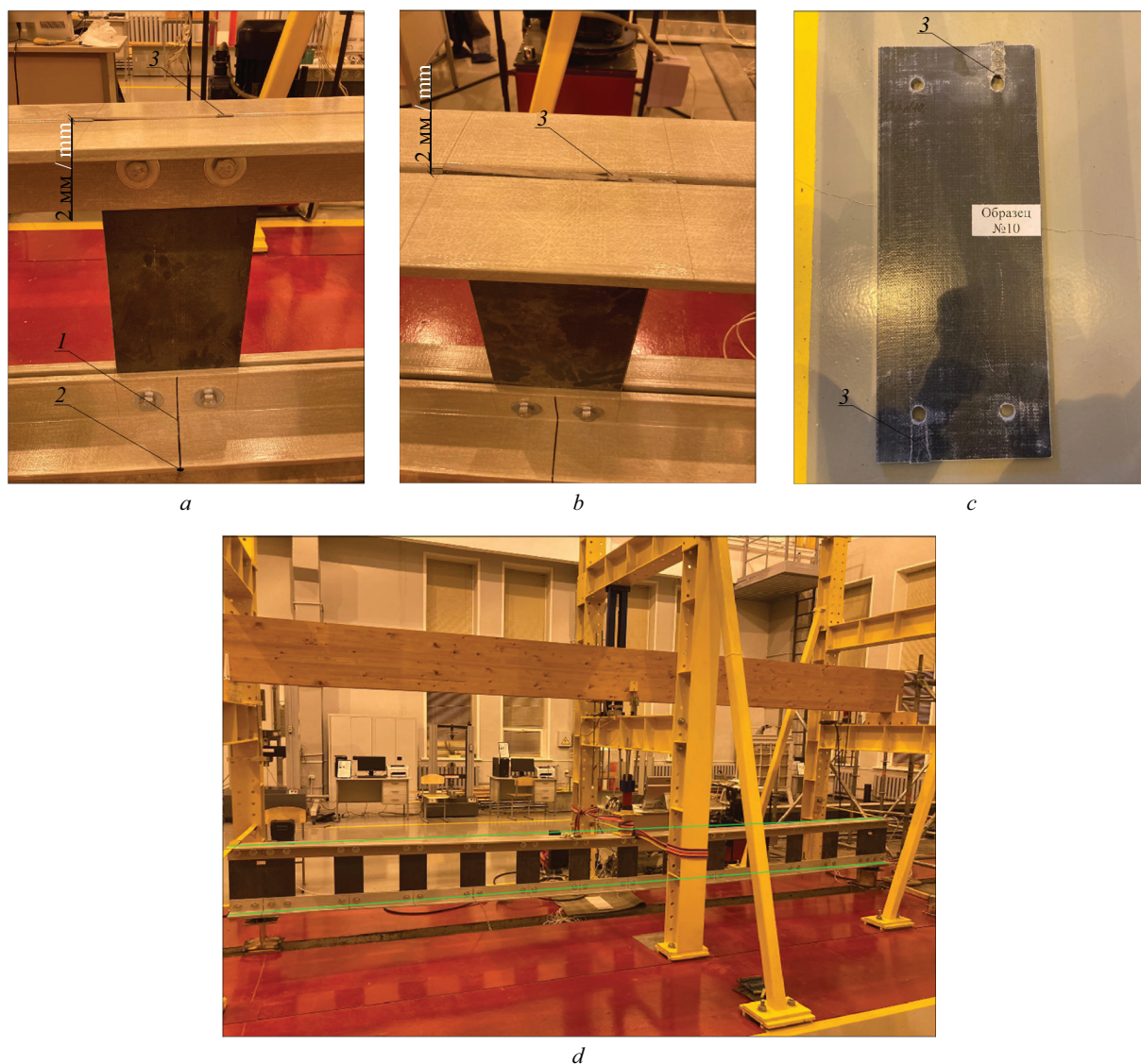


Рис. 5. Испытания балки с перфорированной стенкой: *a, b* — деформации в виде смещения элементов перфорированной стенки балки относительно поясов; *c* — деформации элемента стенки; *d* — общий вид деформации балки: *1* — риски, *2* — точка измерения перемещения, *3* — срез на 2 мм

Fig. 5. Testing of a beam with a perforated wall: *a, b* — deformations in the form of displacement of the elements with a perforated stem of the beam relative to the belts; *c* — deformations of the stem element; *d* — general view of beam deformation: *1* — marks, *2* — movement measurement points, *3* — shear by 2 mm

принята следующая последовательность подготовки балок составного двутаврового сечения из ПСП:

1. Установка балок на металлические опоры, выполненные из двутавра 20К1. В качестве шарнирных опор использованы круглые трубы диаметром 45, толщиной 3 мм.

2. Установка гидравлического универсального домкрата ДУ20П250 (с максимальным усилием 20 тс). Гидравлический домкрат «ВНЭР-5,0 И40Т1-В» оборудован силоизмерительным оборудованием «ТензоМ70-20.0-С3», а также функцией вывода результатов испытаний на дисплей компьютера.

3. Зачистка поверхностей элементов из пултризионных стеклопластиковых профилей (ПСП) в местах установки тензорезисторов BF120-10AA.

4. Установка тензорезисторов BF120-10AA на поверхность элементов из ПСП.

5. Установка металлических распорок в середине и на концах балок составного двутаврового сечения из ПСП.

Далее выполняется проверка работоспособности измерительной системы и испытание балок составного двутаврового сечения из ПСП (рис. 3). Натурные испытания производились на действие сосредоточенной нагрузки. Нагрузка прикладывалась поэтапно ступенями не более 0,1 контрольной нагрузки по прочности. На каждой ступени осуществляется выдержка нагрузки в течение 10 мин. Показания приборов считываются постоянно на каждой ступени нагружения.

Для моделирования работы балки составного двутаврового сечения из ПСП как подстропильной

конструкции испытания проводятся на трехточечный изгиб. Перед нагружением производится выверка нагрузочных приспособлений относительно заранее нанесенных разметочных рисок на поверхности балки. Таким образом, все возникающие в результате испытаний неравномерности напряжений в поперечных сечениях обусловлены только случайными эксцентриситетами.

В процессе натурного испытания балок составного двутаврового сечения из ПСП при помощи тахеометра «Торсон ES-55» фиксировались вертикальные перемещения на каждом шаге приложения нагрузки (рис. 3).

В ходе испытаний балки со сплошной стенкой наблюдалось равномерное деформирование стенки и полок, увеличение прогиба. При этом предпосылки к хрупкому разрушению не выявлено (рис. 4).

В ходе испытания балки с перфорированной стенкой наблюдался значительный рост деформации элементов, сопровождающийся резкими увеличениями прогибов. Произошло хрупкое разрушение элементов стенок в виде взрыва в зоне болтового соединения с поясами (рис. 5).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам испытаний определены прогибы балок и построены графики зависимости от нагрузки (рис. 6, 7).

Значение предельного прогиба для балок ($f_{\text{эксп}} = 30 \text{ мм}$) достигнуто при сосредоточенной нагрузке для балки со сплошной стенкой $P_{\text{эксп}} = 61,3 \text{ кН}$, для балки с перфорированной стенкой $P_{\text{эксп}} = 19,32 \text{ кН}$.

Известны результаты численных исследований балки составного двутаврового сечений из ПСП, полученные в программном комплексе «Ansys»¹. По аналогии с [27] дополнительно выполнено моделирование конечно-элементной модели балки составного двутаврового сечения со сплошной стенкой из ПСП. Таким образом, для выполнения сравнительного анализа воспользуемся результатами экспериментальных и численных исследований (рис. 8, 9).

Перед испытаниями выполнен расчет по Руководству³, при этом за расчетное значение несущей

³ Руководство по проектированию и расчету строительных конструкций из пултрузионных стеклопластиковых профилей производства ООО «Татнефть-Пресскомпозит», разработанного ЦНИИСК им. Кучеренко. 2016.

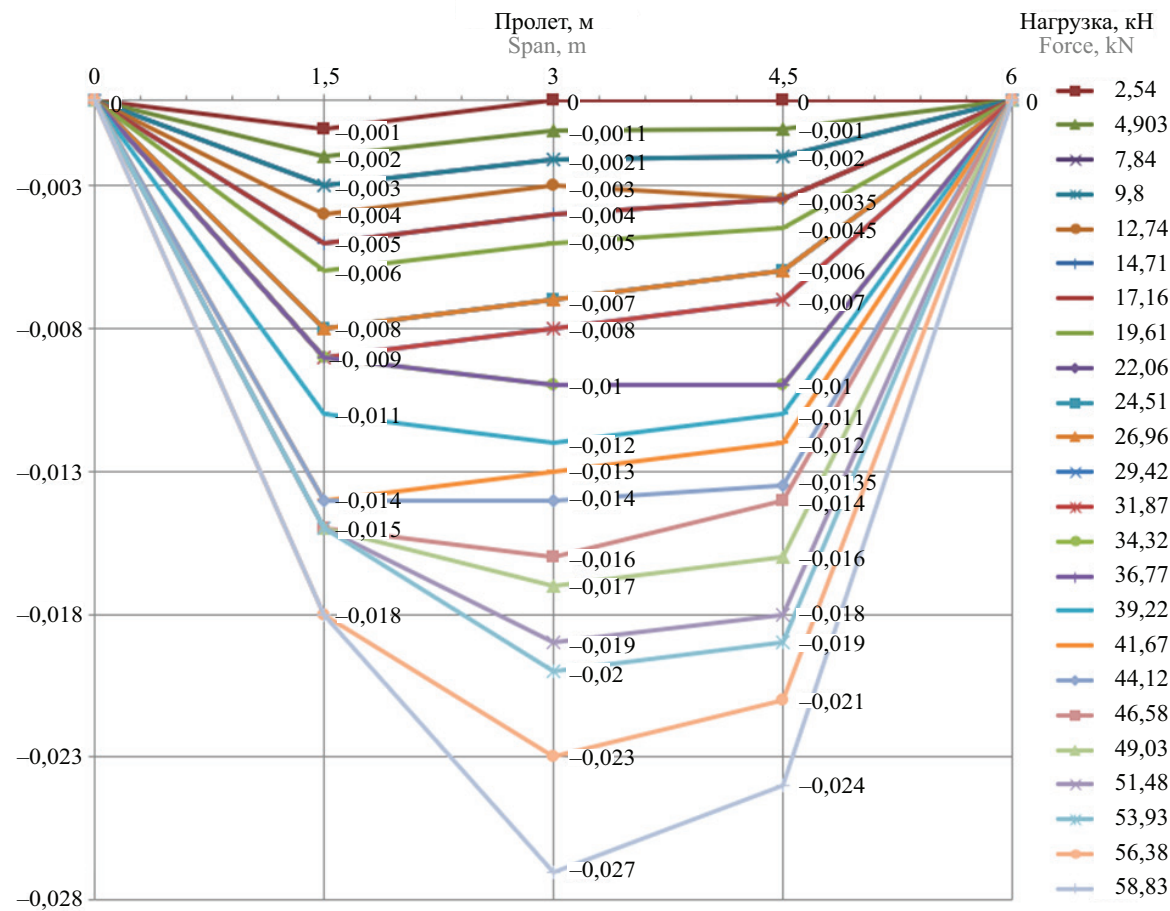


Рис. 6. Зависимости прогиба от экспериментальной нагрузки по результатам испытания балки составного двутаврового сечения из ПСП со сплошной стенкой

Fig. 6. The dependence of the deflection on the experimental load according to the test results of a composite I-beam with a continuous stem is made of PSP

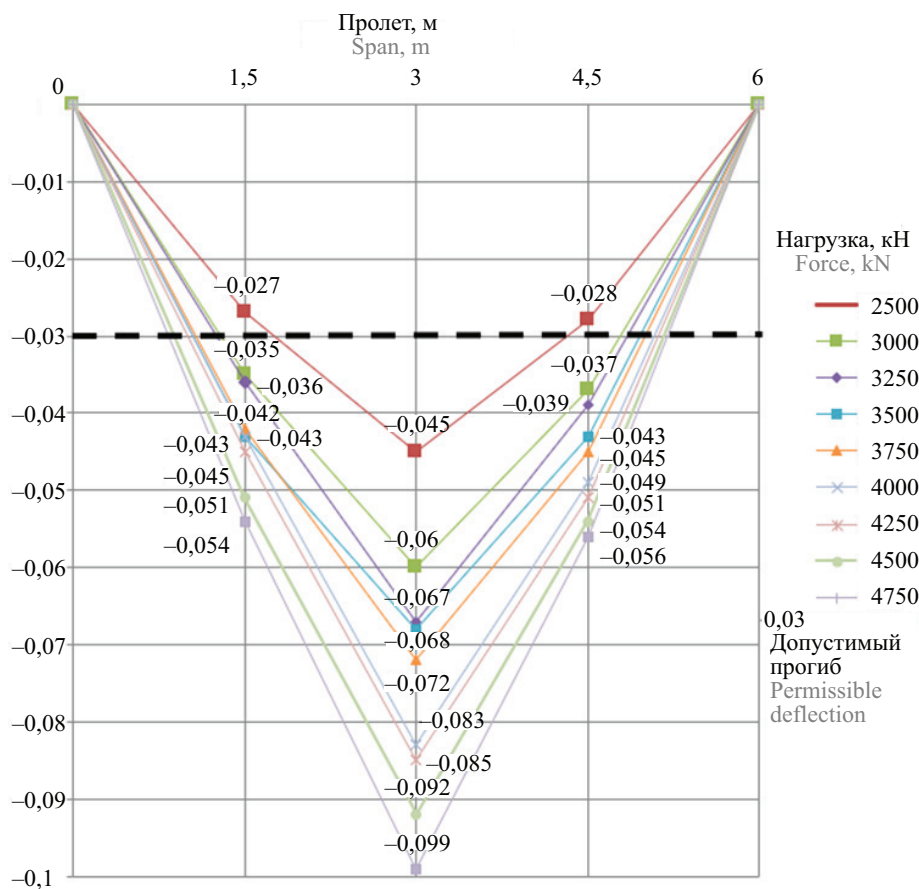


Рис. 7. Зависимости прогиба от экспериментальной нагрузки по результатам испытания балки составного двутаврового сечения из ПСП с перфорированной стенкой

Fig. 7. The dependence of the deflection on the experimental load according to the test results of a composite I-beam with a perforated stem is made of PSP

способности принимается наименьшее, полученное из расчетов по прочности при поперечном изгибе $M_{\text{Хнес}}^{\text{пр}Q} = 27\,574,79 \text{ кН} \cdot \text{см}$, при продольном изгибе $M_{\text{Хнес}}^{\text{пр}N} = 8292,4 \text{ кН} \cdot \text{см}$, и при местной устойчивости $M_{\text{Хнес}}^{\text{м.уст}} = 70\,660 \text{ кН} \cdot \text{см}$, т.е. при продольном изгибе

Согласно Руководству⁴, для определения прогибов и перемещений должно выполняться условие:

$$f \leq f_u, \quad (1)$$

где f — прогиб (выгиб) и перемещение элемента конструкций (или конструкции в целом), определяемые с учетом факторов, влияющих на их значения по формуле (2);

f_u — предельный прогиб (выгиб) или перемещение, устанавливаемые по СП 20.13330⁴.

$$f_{\text{max}} = \frac{Pl^3}{48EI} + \frac{Pl}{4GA_q}, \quad (2)$$

где P — нормативное значение сосредоточенной нагрузки, кН;

⁴ СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85* (утв. Приказом Минстроя России от 03.12.2016 № 891/пр) (ред. от 30.12.2020).

E — расчетное значение модуля упругости, для ПСП определяемый по формуле (4);

I — момент инерции всего сечения относительно центральной оси, м^4 ;

G — расчетное значение модуля упругости при сдвиге, для ПСП принимаем по формуле (3), $\text{кН}/\text{м}^2$;

A_q — часть площади сечения профиля, которая сопротивляется сдвигу, м^2 .

Принимается наименьшее из полученных при растяжении и сжатии, $\text{кН}/\text{м}^2$.

Расчетное значение модуля упругости для ПСП, принимаем по формулам (3) и (4):

$$G^P = G^H \cdot \gamma_T \cdot \gamma_w \cdot \gamma_{dl}; \quad (3)$$

$$E^P = E^H \cdot \gamma_T \cdot \gamma_w \cdot \gamma_{dl}, \quad (4)$$

где G^H — нормативное значение модуля упругости при сдвиге;

E^H — нормативное значение модуля упругости при растяжении, сжатии;

γ_T — коэффициент условий работы при постоянно действующих повышенных температурах;

γ_w — коэффициент условий работы, учитываемый при постоянном увлажнении поверхности конструкций из профилей конденсатом, обрызгиванием,

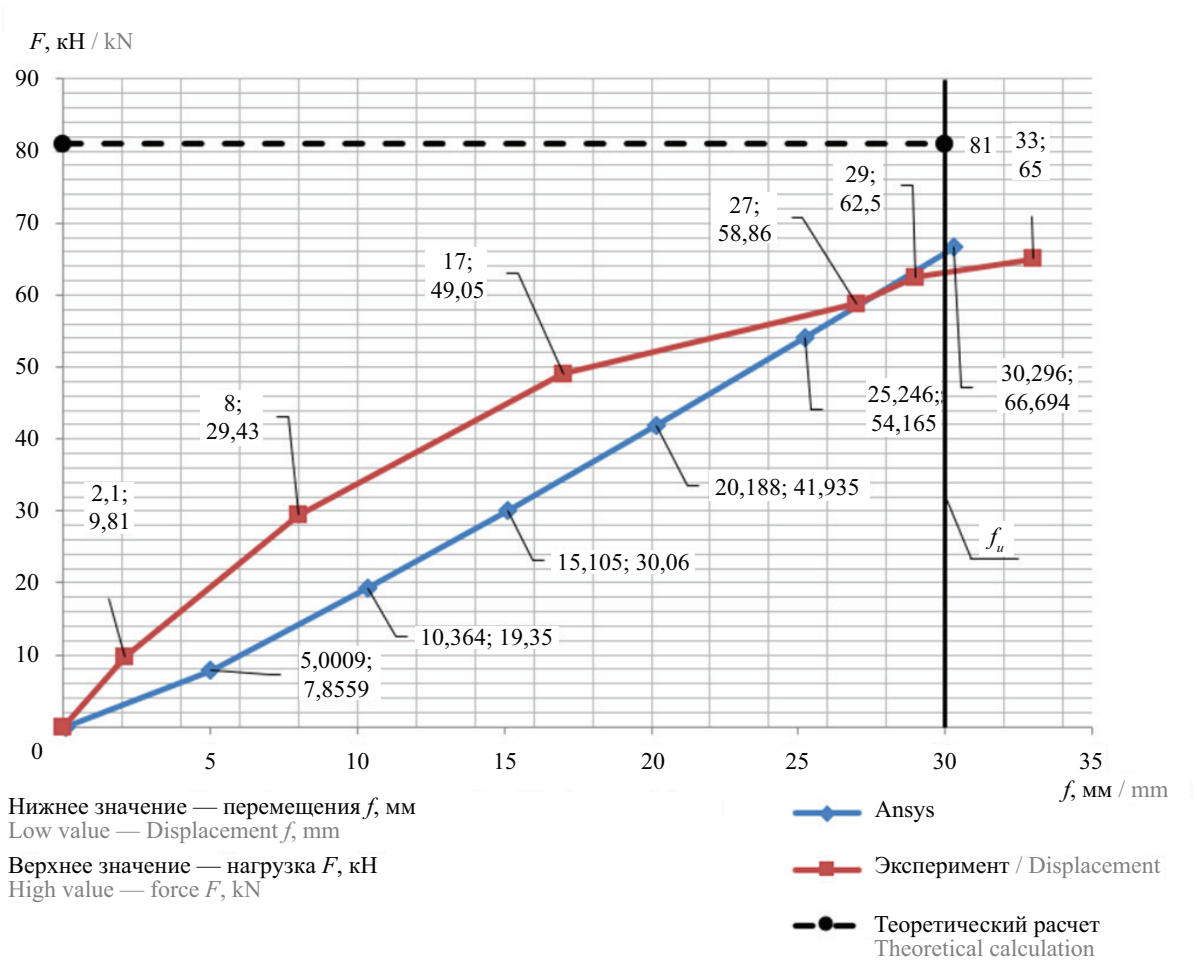


Рис. 8. Зависимость прогиба от нагрузки (для балки со сплошной стенкой из ПСП) по результатам экспериментального и численного исследований
Fig. 8. The dependence of deflection on load (with a continuous stem made of PSP) according to the results of experimental and numerical research

проливом или длительном нахождении конструкций из профилей в воде (под слоем воды);
 $\gamma_{дл}$ — коэффициент условий работы, учитывающий длительную нагруженность конструкций.
Для нахождения предварительной нагрузки при прогибе в 3 см, преобразуем формулу (5):

$$P = \frac{f_u}{\left(\frac{l^3}{48EI} + \frac{l}{4GA_q} \right)} = \frac{3}{\left(\frac{600^3}{48 \cdot 2000 \cdot 70844,3} + \frac{600}{4 \cdot 300 \cdot 100} \right)} = 81,61 \text{ кН.} \quad (5)$$

Подставляя нормативное значение сосредоточенной нагрузки в формулу (2), получим максимальный прогиб $f_{\max} = 3$ см.
Предельное значение нагрузки по результатам теоретического расчета составило $P_{\text{теор}} = 81,61$ кН, экспериментальное значение $P_{\text{эксп}} = 63$ кН. Значение предельной нагрузки, полученной в результате экс-

перимента, меньше на 22,8 % по сравнению с теоретическим расчетом. Такое расхождение можно объяснить отсутствием в существующей методике расчета возможности учитывать податливость узловых соединений стыка полков и стенки. Также для балок со сплошной стенкой не учитывается эффект многослойности стенки, т.е. когда общая толщина стенки, составленная из нескольких пластин, не является «монолитной» между собой.
При этом предельное значение нагрузки по результатам численных расчетов составляет $P_{\text{числ}} = 65,79$ кН, что на 4,2 % больше экспериментальных данных.
Для случая балки с перфорированной стенкой невозможно использовать методику расчета, приведенную в Руководстве¹, ввиду отсутствия методики определения момента инерции и положения нейтральной линии в местах, где нет стенки в составе составной балки (с учетом совместной работы всего сечения балки). При этом предельное значение нагрузки по результатам численных расчетов составляет $P_{\text{числ}} = 19,52$ кН, что на 1,13 % больше экспериментальных данных.

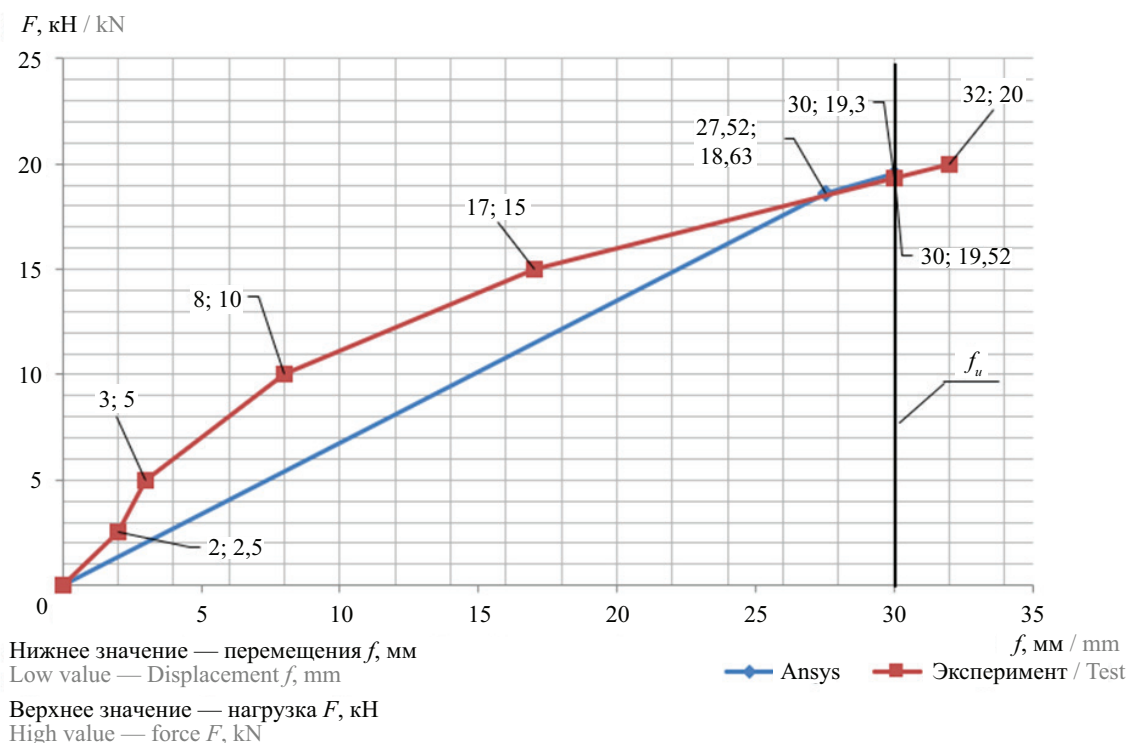


Рис. 9. Зависимости прогиба от нагрузки (для балки с перфорированной стенкой из ПСП) по результатам экспериментального и численного исследований

Fig. 9. The dependence of deflection on load (with a perforated stem made of PSP) according to the results of experimental and numerical research

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам экспериментальных исследований балок составного двутаврового сечения из ПСП можно сделать следующие выводы:

1. Несущая способность балки составного двутаврового сечения со сплошной стенкой из пултрузионных стеклопластиковых профилей определяется прочностью на изгиб, при этом прогиб достигает предельного значения при нагрузке 90 % от расчетных.

2. Несущая способность балки составного двутаврового сечения со сплошной стенкой из ПСП выше в три раза балки с перфорированной стенкой. При этом балка с перфорированной стенкой требует дальнейшего изучения, с позиции разработки и совершенствования методики ее расчета и проектирования.

3. В балке составного двутаврового сечения с перфорированной стенкой из пултрузионных стеклопластиковых профилей значение прогибов является определяющим ее несущую способность.

4. Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования балки составного двутаврового сечения со сплошной стенкой из ПСП с результатами численного исследования показал, что предварительный прогиб в 30 мм для пролета 6 м достигается при нагрузке $P_{\text{эксп}} = 61,3$ кН, $P_{\text{числ}} = 65,79$ кН соответственно. Таким образом отличие составляет 22,8 %.

5. Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования балки составного двутаврового сечения с перфорированной стенкой из ПСП с результатами численного исследования показал, что предварительный прогиб в 30 мм для пролета 6 м достигается при нагрузке $P_{\text{эксп}} = 19,3$ кН, $P_{\text{числ}} = 19,52$ кН соот-

ветственно. Таким образом отличие составляет 1,13 %, что подтверждает хорошую сходимость результатов.

6. Методику расчета по оценке несущей способности изгибаемых элементов, приведенную в Руководстве¹, возможно использовать для составных балок со сплошной стенкой. Однако, указанную методику невозможно применить для составных балок с перфорированной стенкой ввиду отсутствия методики определения момента инерции и положения нейтральной линии в местах, где нет стенки в составе составной балки (с учетом совместной работы всего сечения балки). Существующие методики расчета не позволяют учитывать податливость узловых соединений стыка полок и стенки. Также для балок со сплошной стенкой не учитывается эффект многослойности стенки, т.е. когда общая толщина стенки, составленная из нескольких пластин, не является «монокристаллической» между собой.

7. По результатам сравнительного анализа установлено, что применение конечно-элементной модели, в том числе с учетом физико-механических характеристик ПСП, позволяет получать достоверные данные с результатами экспериментальных исследований, что дает возможность использовать данный метод для дальнейших исследований.

Перспективные направления дальнейших исследований связаны с разработкой аналитической методики расчета балок составного сечения из ПСП, определением податливости узловых соединений стыка полок и стенки составной балки, определением их НДС под действием распределенных и сосредоточенных нагрузок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Арипов Д.Н., Фахрутдинов А.Э. Разработка и экспериментальные исследования конструкций навеса над трибунами из пул-трузионных стеклопластиковых профилей // Известия вузов. Строительство. 2019. № 9. С. 96–108. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-729-9-96-108. EDN PUHXJW.
2. Сулейманов А.М. Эффективные композиционные материалы строительного назначения // Полимерные композиционные материалы нового поколения для гражданских отраслей промышленности : сб. докл. научн. конф. Всеросс. науч.-исслед. институт авиационных материалов. М., 2015. С. 184–195. EDN UUZBZX.
3. Шакиров А.Р., Сулейманов А.М. Выбор конструктивно-подобного образца для испытания на ползучесть клеевых соединений элементов усиления конструкций // Известия КГАСУ. 2023. № 4 (66). С. 8–16. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_8. EDN AIRICV.
4. Антаков И.А., Сулейманов А.М. Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой // Известия КГАСУ. 2023. № 3 (65). С. 101–109. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_101. EDN HJVCIL.
5. Fiore V., Calabrese I., Scalici T., Valenza A. Evolution of the bearing failure map of pinned flax composite laminates aged in marine environment // Composites Part B Engineering. 2020. No. 187. P. 107864. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107864
6. Гимранов Л.Р., Гайнетдинов Р.Г., Багаутдинов Р.М., Атяшева И.С. Составная балка с гофрированной стенкой из тонкостенных оцинкованных профилей // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 4. С. 29–36. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.04.29-36. EDN EQIPVY.
7. Lei Cao, Dan Zeng, Yang Liu, Zhaochao Li, Hao Zuo. Deflection calculation method for UHPC composite beams considering interface slip and shear deformation // Engineering Structures. 2023. No. 281 (5). P. 115710. DOI: 10.1016/j.engstruct/2023/115710
8. Zeinali E., Nazari A., Showkati H. Experimental-numerical study on lateral-torsional buckling of PFRP under pure bending // Composites Structures. 2020. No. 237 (1). P. 111925. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.111925
9. Correia J.R., Branco F.A., Silva N.M., Camotim D., Silvestre N. et al. First-order, buckling and post-buckling behaviour of GFRP pultruded beams. Part I: experimental study // Comput Struct. 2011. No. 89 (21–22). Pp. 2052–64. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.07.005
10. Estep D.D. Bending and shear behavior of pultruded glass fiber reinforced polymer composite beams with closed and open sections. West Virginia University, 2014.
11. Fernandes L.A., Gonilha J., Correia J.R., Silvestre N., Nunes F. et al. Web-crippling of GFRP pultruded profiles. Part 1: experimental study // Compos. Struct. 2015. No. 1 (120). Pp. 655–577.
12. Liu T., Harries K.A. Flange local buckling of pultruded GFRP box beams // Compos. Struct. 2018. No.1. Vol. 189. Pp. 463–472. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.101
13. Vieira J.D., Liu T., Harries K.A. Flexural stability of pultruded glass fibre-reinforced polymer I-sections // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings. 2017. No. 171 (11). Pp. 855–866. DOI: 10.1680/jstbu.16.00238
14. Ganesan G., Kumaran G. An experimental study on the behaviour of GFRP pultruded I beam reinforced with CFRP laminates // International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration. 2018. No. 5 (45). Pp. 232–242. DOI: 10.19101/IJATEE.2018.545012
15. Vieira E.D., Vieira J.D., Cardoso D.C. Local buckling of pultruded GFRP I-section subject to bending // Conference : Brazilian Conference on Composite Materials. 2018. DOI: 10.21452/bccm4.2018.06.05
16. Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р., Гимранов Л.Р., Гимазетдинов А.Р. Определение характеристик вязкоупругой модели стеклопластика по результатам изгиба труб квадратного сечения // Известия КГАСУ. 2022. № 2 (60). С. 37–44. DOI: 10.52409/20731523_2022_2_37. EDN BYHQBR.
17. Liu T. Stability behavior of pultruded glass-fiber reinforced polymer I-Sections subject to flexure (Doctoral dissertation, University of Pittsburgh). 2017. URL: https://d-scholarship.pitt.edu/31511/1/LiuT_ETDPITT2017.pdf.
18. Cardoso D.C., Vieira J.D. Comprehensive local buckling equations for FRP I-sections in pure bending or compression // Composite Structures. 2017. No. 15 (182). Pp. 301–10. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.027
19. Kasiviswanathan M., Upadhyay A. Flange buckling behaviour of FRP box-beams: a parametric study // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2018. No. 37 (2). Pp. 105–17. DOI: 10.1177/0731684417736142
20. Kasiviswanathan M., Upadhyay A. Effect of Shear Lag on Buckling of FRP Box-Beams / Rao A., Ramanjaneyulu K. (eds.) // Recent Advances in Structural Engineering. Vol. 2. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 12. Singapore, 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-0365-4_65
21. Каюмов Р.А., Луканин С.А., Паймушин В.Н., Холмогоров С.А. Идентификация механических характеристик армированных волокнами композитов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2015. Т. 157. Кн. 4. С. 112–132. EDN VBEYRR.
22. Martins D., Proenca M., Correia J.R., Gonilha J., Arruda M., Silvestre N. Development of a novel beam to column connection system for pultruded GFRP tubular profiles // Composite Structures. 2017. No. 171. Pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.03.049
23. Satasivam S., Feng P., Bai Y., Caprani C. Composite actions within steel-FPR composite beam systems

with novel blind bolt shear connections // Engineering structures. 2017. No. 138. Pp. 63–73. DOI: 10.1016/j.eng-struct.2017.01.068

24. Кузнецов И.Л., Фахрутдинов А.Э., Арипов Д.Н. Исследование болтовых соединений элементов из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) // Полимерные композитные материалы нового поколения. Трансфер инноваций из авиации в приоритетные сектора экономики России : сб. ст. Всеросс. науч.-техн. конф. ВИАМ. Ульяновск, 2018. С. 6–15.

25. Mutsuyoshi H., Nguyen H., Zatar W., Ishihama T. Flexural behavior of pultruded hybrid fiber-reinforced polymer I-beam with bonded-and-bolted splice joints // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2016. No. 2592 (1). Pp. 45–55. DOI: 10.3141/2592-06

26. Sebastian W.M., Ross J., Keller T., Luke S. Load response due to local and global indeterminacies of FRP-deck bridges // Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43. No. 4. Pp. 1727–1738. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.01.061

27. Adilardi A., Russo S. Innovative design approach to a GFRP pedestrian bridge: Structural aspects, engineering optimization and maintenance // Proc., 15th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management. CRC Press. Balkema, Taylor and Francis Group, Leiden, Netherlands, 2010. Pp. 2455–2459.

28. Салахутдинов М.А., Каюмов Р.А., Арипов Д.Н., Ханеков А.Р. Численное исследование несущей способности балки составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей // Известия КГАСУ. 2022. № 2 (60). С. 15. DOI: 10.52409/20731523_2022_2_15. EDN BHRXOY.

Поступила в редакцию 6 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 августа 2024 г.

Одобрена для публикации 27 августа 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Марат Айдарович Салахутдинов** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических конструкций и испытания сооружения; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ: 6070-2960, Scopus AuthorID: 825789; lider-kazann@yandex.ru;

Далер Насимович Арипов — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры металлических конструкций и испытания сооружения; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ: 8877-9543, Scopus AuthorID: 1004265; architector-1992@mail.ru;

Арслан Реджепович Ханеков — аспирант, ассистент кафедры металлических конструкций и испытания сооружения; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ: 5786-6122, Scopus AuthorID: 1157384, ORCID: 0000-0002-6202-2040; khanekova@kgasu.ru;

Сергей Сергеевич Киселев — студент; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, kazanbuilder2002@gmail.com.

Вклад авторов:

Салахутдинов М.А. — научное руководство, научное редактирование текста.

Арипов Д.Н. — проведение экспериментальных, численных и аналитических исследований, научное редактирование текста.

Ханеков А.Р. — проведение экспериментальных, численных исследований, обработка собранного материала, написание исходного текста.

Киселев С.С. — доработка текста, написание и оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kuznetsov I.L., Salahutdinov M.A., Aripov D.N., Fakhrutdinov A.E. Development and experimental studies of canopy structures over bleachers made of pultrusion fiberglass profiles. *News of universities. Construction*. 2019; 9:96-108. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-729-9-96-108. EDN PUHXJW. (rus.).

2. Sulejmanov A.M. Effective composite materials for construction purposes. *Polymer composite materials of new generation for civil industries : collection of reports of scientific conference dedicated to the 85th. All-Russian Research Institute of Aviation Materials*. Moscow, 2015; 184-195. EDN UUZBZX. (rus.).

3. Shakirov A.R., Suleymanov A.M. Research of adhesive joints between concrete and carbon fiber on epoxy adhesives of various configurations. *News KSUAE*. 2023; 4(66):8-16. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_8. EDN AIRICV. (rus.).
4. Antakov I.A., Suleymanov A.M. Deformability of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *News KSUAE*. 2023; 3(65):101-109. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_101. EDN HJVCIL. (rus.).
5. Fiore V., Calabrese L., Scalici T., Valenza A. Evolution of the bearing failure map of pinned flax composite laminates aged in marine environment. *Composites Part B Engineering*. 2020; 187:107864. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107864
6. Gimranov L.R., Gainetdinov R.G., Bagautdinov R.M., Atyasheva I.S. Composite beam with corrugated wall of yhin-walled cold formed profiles. *Industrial and civil construction*. 2023; 4:29-36. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.04.29-36. EDN EQIPVY. (rus.).
7. Lei Cao, Dan Zeng, Yang Liu, Zhaochao Li, Hao Zuo. Deflection calculation method for UHPC composite beams considering interface slip and shear deformation. *Engineering Structures*. 2023; 281(5):115710. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023/115710
8. Zeinali E., Nazari A., Showkati H. Experimental-numerical study on lateral-torsional buckling of PFRP under pure bending. *Composites Structures*. 2020; 237(1):111925. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.1119259.
9. Correia J.R., Branco F.A., Silva N.M., Camotim D., Silvestre N. et al. First-order, buckling and post-buckling behaviour of GFRP pultruded beams. Part I: experimental study. *Comput Struct*. 2011; 89(21-22):2052-64. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.07.00510
10. Estep D.D. *Bending and shear behavior of pultruded glass fiber reinforced polymer composite beams with closed and open sections*. West Virginia University, 2014.
11. Fernandes L.A., Gonilha J., Correia J.R., Silvestre N., Nunes F. et al. Web-crippling of GFRP pultruded profiles. Part 1: experimental study. *Compos. Struct*. 2015; 1(120):655-577.
12. Liu T., Harries K.A. Flange local buckling of pultruded GFRP box beams. *Compos. Struct*. 2018; 1(189):463-472. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.101
13. Vieira J.D., Liu T., Harries K.A. Flexural stability of pultruded glass fibre-reinforced polymer I-sections. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings*. 2017; 171(11):855-866. DOI: 10.1680/jstbu.16.00238
14. Ganesan G., Kumaran G. An experimental study on the behaviour of GFRP pultruded I beam reinforced with CFRP laminates. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2018; 5(45):232-242. DOI: 10.19101/IJATEE.2018.545012
15. Vieira E.D., Vieira J.D., Cardoso D.C. Local buckling of pultruded GFRP I-section subject to bending. *Conference : Brazilian Conference on Composite Materials*. 2018. DOI: 10.21452/bccm4.2018.06.05
16. Kayumov R.A., Shakirzyanov F.R., Gimranov L.R., Gimazetdinov A.R. Determination of the characteristics of a viscoelastic fiberglass model based on the results of bending square section pipes. *News KSUAE*. 2022; 2(60):37-44. DOI: 10.52409/20731523_2022_2_37. EDN BYHQBR. (rus.).
17. Liu T. Stability behavior of pultruded glass-fiber reinforced polymer I-Sections subject to flexure *Doctoral dissertation, University of Pittsburgh*. 2017. URL: https://d-scholarship.pitt.edu/31511/1/LiuT_ETDPITT2017.pdf.
18. Cardoso D.C., Vieira J.D. Comprehensive local buckling equations for FRP I-sections in pure bending or compression. *Composite Structures*. 2017; 15(182):301-10. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.027
19. Kasiviswanathan M., Upadhyay A. Flange buckling behaviour of FRP box-beams: a parametric study. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2018; 37(2):105-17. DOI: 10.1177/0731684417736142
20. Kasiviswanathan M., Upadhyay A. Effect of Shear Lag on Buckling of FRP Box-Beams. Rao A., Ramanjaneyulu K. (eds.). *Recent Advances in Structural Engineering. Vol. 2. Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 12. Singapore, 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-0365-4_65
21. Kayumov R.A., Lukankin S.A., Paimushin V.N., Kholmogorov S.A. Identification of mechanical properties of fiber-reinforced composites. *Scientific notes of Kazan university. Series: physical and mathematical sciences*. 2015; 157(4):112-132. EDN VBeyRR. (rus.).
22. Martins D., Proenca M., Correia J.R., Gonilha J., Arruda M., Silvestre N. Development of a novel beam to column connection system for pultruded GFRP tubular profiles. *Composite Structures*. 2017; 171:263-276. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.03.049
23. Satasivam S., Feng P., Bai Y., Caprani C. Composite actions within steel-FPR composite beam systems with novel blind bolt shear connections. *Engineering structures*. 2017; 138:63-73. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.01.068
24. Kuznetsov I.L., Fakhruddinov A.E., Aripov D.N. A study of bolted joints pultruded GRP profiles elements. *Polymer composite materials of new generation. Transfer of innovations from aviation to priority sectors of the Russian economy : collection of articles of All-Russian scientific and technical conference. VIAM*. Ulyanovsk, 2018; 6-15. (rus.).
25. Mutsuyoshi H., Nguyen H., Zatar W., Ishihama T. Flexural behavior of pultruded hybrid fiber-reinforced polymer I-beam with bonded-and-bolted splice joints. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2016; 2592(1):45-55. DOI: 10.3141/2592-06

26. Sebastian W.M., Ross J., Keller T., Luke S. Load response due to local and global indeterminacies of FRP-deck bridges. *Composites Part B: Engineering*. 2012; 43(4): 1727-1738. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.01.061.

27. Adilardi A., Russo S. Innovative design approach to a GFRP pedestrian bridge: Structural aspects, engineering optimization and maintenance. *Proc., 15th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Manage-*

ment. CRC Press. Balkema, Taylor and Francis Group, Leiden, Netherlands, 2010; 2455-2459.

28. Salakhutdinov M.A., Kayumov R.A., Aripov D.N., Khanekov A.R. Numerical study of the bearing capacity of a composite I-shaped section beam of pultruded fiberglass profiles. *News KSUAE*. 2022; 2(60):15. DOI: 10.52409/20731523_2022_2_15. EDN BHRXOY. (rus.).

Received March 6, 2024.

Adopted in revised form on August 27, 2024.

Approved for publication on August 27, 2024.

BIONOTES: **Marat A. Salakhutdinov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation ; RSCI: 6070-2960, Scopus AuthorID: 825789; lider-kazann@yandex.ru;

Daler N. Aripov — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; RSCI: 8877-9543, Scopus AuthorID: 1004265; architector-1992@mail.ru;

Arslan R. Khanekov — postgraduate student, assistant; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; RSCI: 5786-6122, Scopus AuthorID: 1157384, ORCID: 0000-0002-6202-2040; khanekova@kgasu.ru;

Sergey S. Kiselev — student; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; kazanbuilder2002@gmail.com.

Contribution of the authors:

Marat A. Salakhutdinov — academic advising, scientific editing of the text.

Daler N. Aripov — conducting experimental, numerical and analytical studies, scientific editing of the text.

Arslan R. Khanekov — conducting experimental, numerical studies, processing the collected material, writing the source text.

Sergey S. Kiselev — revision of the text, writing and formatting of the article.

Authors report about the absence of conflict of interests.

Цифровое моделирование разрушения в элементах дорожных ограждений при ударном наезде автомобиля

Ирина Вадимовна Демьянушко, Олег Вадимович Титов,
Павел Сергеевич Михеев, Илья Анатольевич Карпов

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ);
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из эффективных средств снижения тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий (ДТП) на автомобильных дорогах является установка дорожных ограждений (ДО) различного типа. Надежность ДО определяется способностью сопротивляться разрушению при ударе автомобиля и сохранять свою функциональность для различных случаев наезда. Анализ существующих зарубежных и отечественных методов моделирования процессов столкновений показал, что предельным состоянием конструкций ДО при ударе автомобиля обычно считается достижение какого-либо предельного значения механических характеристик материала ДО. Моделирование разрушения элементов ДО, а также оценка их работы после достижения материалом предельных характеристик в момент локализации деформаций связаны с необходимостью учета разрушения в физико-математических моделях материала ДО, что необходимо для объективной оценки работы конструкций ДО как при проектировании, так и при сертификационном анализе.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выбраны барьерные и фронтальные ограждения. Для достижения высокой точности результатов применен подход с валидацией моделей по схеме «материал – деталь – изделие». С целью построения участка истинной диаграммы на участке локализации деформации был использован феноменологический закон упрочнения Хоккетта и Шерби. Оценка разрушения производилась по критерию эффективных пластических деформаций, а также с помощью модели накопления поврежденности GISSMO. Валидация разработанных отдельных элементов конструкций ограждений проводилась на основе стендовых испытаний.

Результаты. Определены основные параметры моделей материалов и модели накопления поврежденности GISSMO, разработаны валидированные модели ключевых элементов исследуемых конструкций ограждений. Выполнены полномасштабные виртуальные испытания исследуемых конструкций ограждений с использованием разработанных валидированных элементов, которые показали хорошую сходимость с натурным экспериментом.

Выводы. В результате анализа выявлено, что наибольшей точностью в описании разрушения элементов конструкций дорожных ограждений обладает подход с применением модели накопления поврежденности GISSMO. Для разработки валидированных моделей конструкций ограждений целесообразно использовать обратный метод и проводить валидацию отдельных элементов посредством стендовых испытаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожное ограждение, валидация, численный эксперимент, стендовые испытания, метод конечных элементов (МКЭ), цифровая модель, истинная диаграмма деформирования, модель накопления поврежденности GISSMO, критерий разрушения

Благодарности. Авторы выражают благодарность организациям ООО «ТехноДор», АО «АСК» за предоставленные материалы, в том числе по натурным испытаниям изделий и элементам для исследования. Работа выполнена при содействии Федерального дорожного агентства (Росавтодор) и Фонда содействия инновациям (№ 47ГРТЦС10-D5/56182).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Демьянушко И.В., Титов О.В., Михеев П.С., Карпов И.А. Цифровое моделирование разрушения в элементах дорожных ограждений при ударном наезде автомобиля // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1896–1919. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1896-1919

Автор, ответственный за переписку: Олег Вадимович Титов, gaqui4@yandex.ru.

Digital modelling of failure of road barrier elements under impact of vehicle collision

Irina V. Demiyanushko, Oleg V. Titov, Pavel S. Mikheev, Ilya A. Karpov

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the effective ways of reducing the severity of consequences of road traffic accidents is the use of road barriers. The ability to withstand failure and maintain functionality across various collision scenarios determines the reliability of a barrier. An analysis of existing methods for modelling collision processes showed that the ultimate state of the structures

of the impact site during a vehicle impact is usually considered to be the achievement of some ultimate value of the mechanical characteristics of the impact site material. Modelling the failure of road barrier elements, as well as the assessment of their operation after the material reaches its limiting characteristics at the moment of deformation localization, are associated with the need to take into account the failure in material models, which is necessary for an objective assessment of the operation road barrier structures, both during design and during certification analysis.

Materials and methods. Barrier and frontal guardrails were selected as the object of the study. To achieve high accuracy in the results, an approach with validation based on the material – component – product scheme was applied. To construct the true stress-strain curve beyond the strength limit was used the phenomenological hardening law of Hockett and Sherby. Damage assessment was carried out using the effective plastic strain criterion, along with the GISSMO damage accumulation model. The identification of material and damage model parameters was performed using the inverse modelling method.

Results. The main parameters of the material models and the GISSMO damage accumulation model were determined, and validated models of the main elements of the studied barriers were developed. Full-scale virtual crash-tests of the studied barriers were carried out using the developed validated elements, which showed good convergence with the full-scale experiment.

Conclusions. As a result of the research, it was revealed that the approach using the GISSMO damage accumulation model has the greatest accuracy in describing the failure of structural elements of road barriers. To develop validated models of barriers, it is advisable to use the inverse method and validate individual elements through bench tests.

KEYWORDS: road barrier, validation, numerical experiment, bench test, finite element method (FEM), digital model, true stress-strain curve, damage accumulation model GISSMO, failure criteria

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the organizations TechnoDor, ASK for the provided materials and elements for the study. The work was carried out with the assistance of the Federal Road Agency (Rosavtodor) and the Foundation for Assistance to Innovations (No. 47GRTCS10-D5/56182).

FOR CITATION: Demiyanushko I.V., Titov O.V., Mikheev P.S., Karpov I.A. Digital modelling of failure of road barrier elements under impact of vehicle collision. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1986-1919. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1986-1919 (rus.).

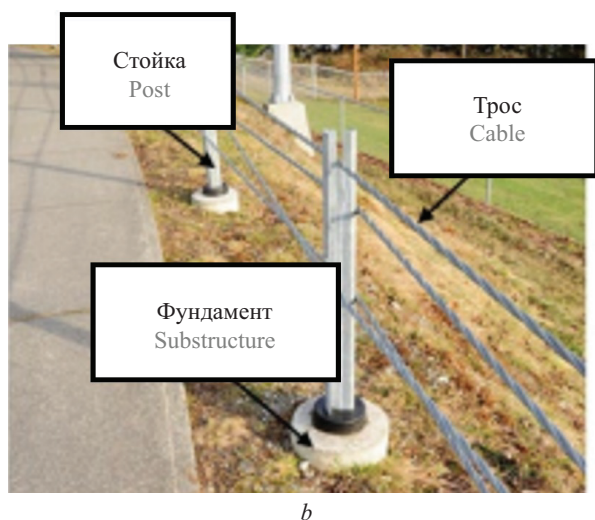
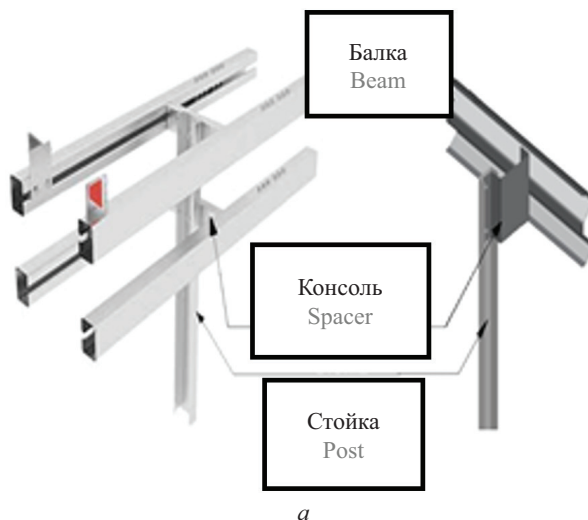
Corresponding author: Oleg V. Titov, gaqui4@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшая задача в области проектирования и строительства автомобильных дорог — обеспечение безопасности дорожного движения. Во многом это решается путем установки удерживающих дорожных ограждений (ДО) различного типа, являющихся эффективным средством снижения тяжести дорожно-транспортных происшествий (ДТП) [1–6]. Существующие конструкции ДО в соответствии с ГОСТ 33127–2014 условно разделяют на деформируемые и недеформируемые. К деформируемым относятся (рис. 1): барьерные (БДО), тросовые (ТДО), фронтальные (ФО) и мобильные фронтальные ограждения (ОМФ) [7–9]. К недеформируемым — парапетные бетонные (железобетонные) ограждения.

В настоящей работе рассматриваются деформируемые конструкции ДО, которые наиболее распространены на дорогах общего пользования. Основные несущие конструктивные элементы деформируемых ДО изготавливаются из тонколистового проката различных марок стали.

В рассматриваемых конструкциях большая часть энергии удара наезжающего автомобиля рассеивается за счет пластических деформаций, трения, разрушения элементов ДО или их комбинации. Особое внимание следует уделить процессам разрушения, которые приводят к изменению связей в системе, что часто ведет к утрате способности конструкции выполнять свои функции (рис. 2). Однако в некоторых случаях поглощение энергии удара при разрушении в ряде конструкций ДО используется направленно путем устройства



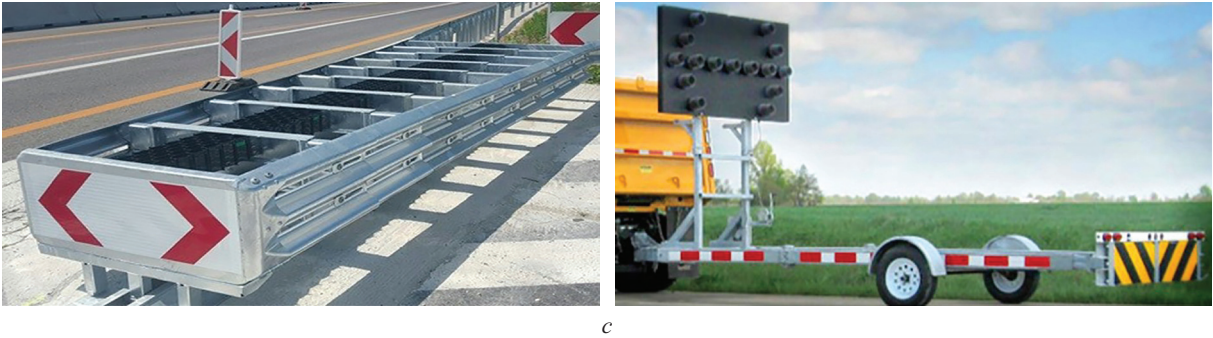


Рис. 1. Основные виды деформируемых ДО: а — барьерное ограждение; б — тросовое ограждение; с — фронтальное и мобильное фронтальное ограждения

Fig. 1. Various deformable road barriers: a — guardrail barrier; b — cable barrier; c — front and mobile front barrier

в ДО конструктивных элементов с так называемым прогнозируемым разрушением (рис. 3).

В случае, показанном на рис. 2, в результате разрыва секции балки в процессе натурных испытаний произошел переезд автобуса через ограждение. Данное разрушение свидетельствует о несоответствии конструкции нормативным требованиям Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 014/2011 «Безопасность автомобильных дорог». Такой вид разрушения относится к неконтролируемым.

Для случаев, показанных на рис. 3, специальные устройства частично вносят в процедуру разрушения положительный эффект. Так, введение концентратора напряжений в виде надреза стойки ТДО (рис. 2, а) приводит к сохранению рабочей высоты тросов за счет отсоединения стоек от основания дороги при ударе автомобиля, что обеспечивает безопасность работы. Для использования процесса поглощения энергии удара в элементы конструкций (на рис. 2, б показан элемент ФО) вводятся специальные концентраторы напряжений (разрезы), геометрия которых обуславливает направление, усилие раскрытия и скорость роста трещин. Такой тип разрушения относится к прогнозируемому.

При разработке конструкций ДО с целью сокращения времени на проектирование, доводку и

сертификацию в настоящее время широко применяются методы цифрового моделирования процессов наезда автомобиля на ДО, основанные на комбинации численных методов — метода конечных элементов (МКЭ) и метода конечных разностей (МКР), которые реализованы в современных программных комплексах нелинейной динамики и инженерного анализа [7–16]. Для повышения точности и адекватности результатов цифрового моделирования, в частности моделирования процессов прогнозируемого и неконтролируемого разрушения, требуется располагать экспериментально обоснованными (валидованными) параметрами, входящими в применяемые физико-математические модели материалов, включая истинные диаграммы деформирования и соответствующие модели разрушения, а также валидованными моделями основных элементов конструкций ДО. Для валидации необходимо проведение правильно поставленных натурного и виртуального испытаний, результаты которых сравниваются между собой.

Анализ существующих зарубежных и отечественных методов моделирования процессов столкновений показал, что предельным состоянием конструкций ДО при ударе автомобиля обычно считается достижение какого-либо предельного значения меха-



Рис. 2. Разрыв балки БДО при проведении полномасштабных натурных испытаний

Fig. 2. Rupture of guardrail barrier beam during full-scale crash test

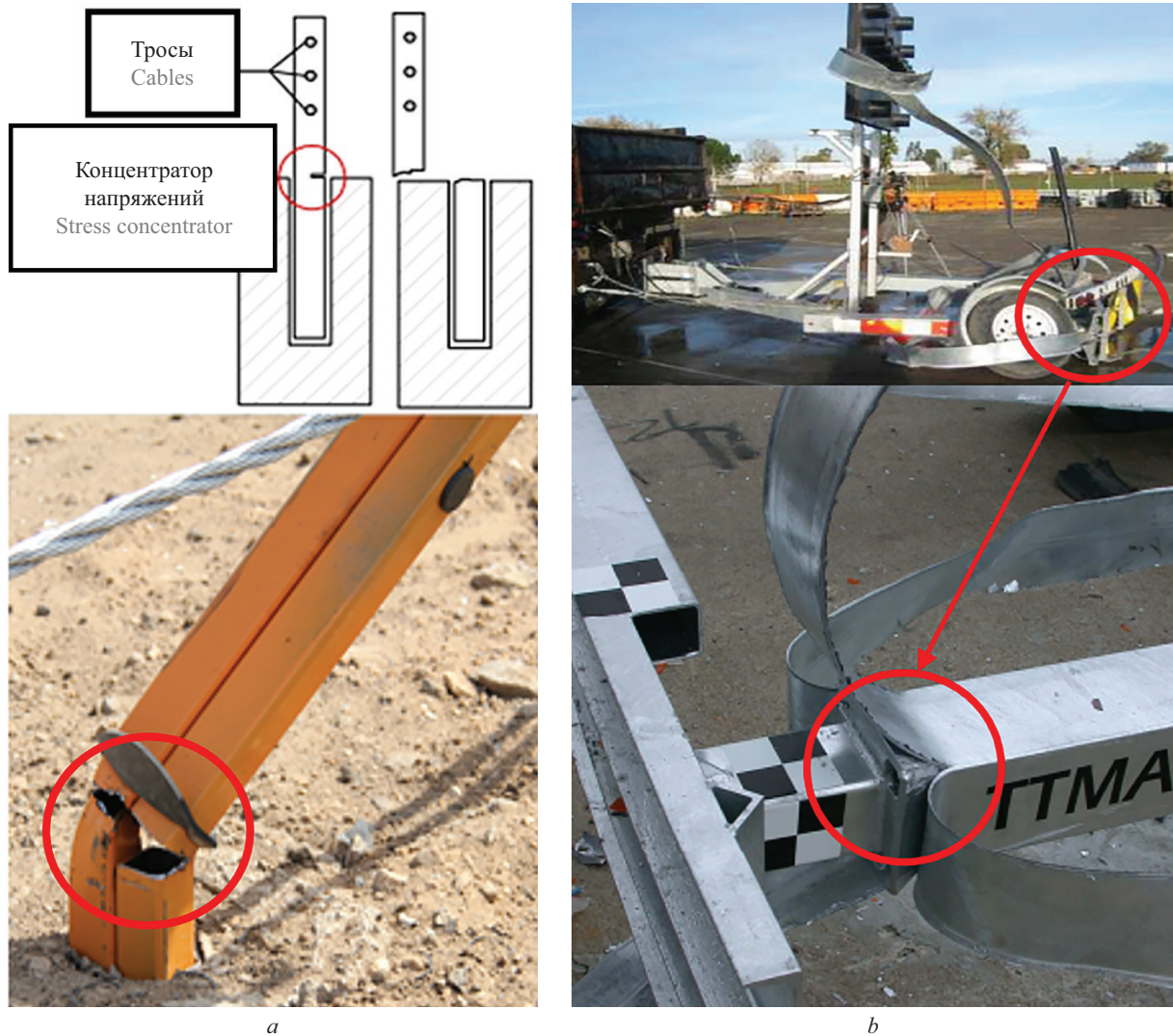


Рис. 3. Дорожные ограждения, включающие элементы прогнозируемого разрушения: *a* — стойки тросового ограждения с надрезом [8]; *b* — разрезные стержни фронтальных ограждений

Fig. 3. Road barriers components with operating failure: *a* — notched cable barrier posts [8]; *b* — split rods of front barriers

нических характеристик материала ДО. Моделирование разрушения элементов дорожных ограждений, а также оценка их работы после достижения материалом предельных характеристик в момент локализации деформаций связаны с потребностью учета разрушения в физико-математических моделях материала ДО, что необходимо для объективной оценки работы конструкций ДО как при проектировании, так и при сертификационном анализе. Особенно важен учет разрушения для конструкций ДО, в которых с целью поглощения энергии при ударе используют элементы с прогнозируемым разрушением.

Вопросы моделирования неконтролируемого разрушения балок барьерных ограждений рассмотрены в работе [17]. Авторы изучили вариант разрушения балок от растягивающих нагрузок экспериментально и путем моделирования. В модели для описания разрушений в области отверстий была применена сетка с размером конечного элемента (КЭ) менее 1 мм и критерием разрушения по эф-

фективным пластическим деформациям. Такой подход привел к удовлетворительным результатам при сравнении с экспериментом, но не может быть использован на полной конструкции ограждения, так как при расчете явными методами для обеспечения стабильности модели уменьшение шага дискретизации по пространству ведет к уменьшению дискретизации по времени, что существенно увеличивает время расчета, и кроме того, как будет показано далее, не всегда приводит к корректным результатам.

Следует отметить, что разработка элементов с прогнозируемым разрушением посредством цифрового моделирования является перспективным направлением в области проектирования ДО. В труде [8] для стоек закрытого типа, которые применяются в конструкциях ТДО, разработана методика моделирования прогнозируемого разрушения с использованием когезионных элементов. Аналогичный подход применен в публикации [16] для моделирования процесса

прогнозируемого разрушения в элементах ФО — разрезных стержнях. В обоих случаях необходимые параметры для задания модели когезионных элементов определялись на основе только численных экспериментов, а исследования по моделированию неконтролируемого разрушения элементов ДО практически отсутствуют.

В настоящем исследовании рассмотрен иной подход к цифровому моделированию процессов прогнозируемого разрушения, а также приведен один из возможных вариантов цифрового моделирования неконтролируемого разрушения. Оба подхода основываются на применении расчетно-экспериментальных параметров, истинных диаграмм деформирования, моделей поврежденности, а также стендовых испытаниях, посредством которых проводилась валидация разработанных моделей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования методом цифрового моделирования выбраны ДО, в основных элементах которых может возникать разрушение, — стойки, разрезные стержни, балки. Для них проведены стендовые и полномасштабные натурные испытания на испытательных площадках Испытательного центра Научно-исследовательского центра по испытаниям и доводке автотехники ФГУП «Государственный научный центр Российской Федерации» (ИЦ НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ») и кафедры строительной механики МАДИ.

Цифровое моделирование проводилось в программном комплексе (ПК) LS-DYNA, позволяющем рассматривать задачи динамики переходных процессов, которыми являются задачи ударного наезда автомобиля на ДО, явными методами. Уравнения движения системы с конечным числом степеней свободы при интегрировании по явной схеме в LS-DYNA на шаге n имеют вид:

[M]{ü}^n + {F_int}^n = {F_ext}^n, (1)

где [M] — матрица масс системы; {ü}^n — вектор ускорений узлов системы; {F_int}^n и {F_ext}^n — вектор внешних и внутренних сил соответственно.

Значения перемещений, скоростей и ускорений узлов на следующем шаге $n + 1$ получены с помо-

щью метода центральных разностей, исходя из значения ускорений на шаге n :

{ü}^n = [M]⁻¹({F_ext}^n - {F_int}^n); (2)

{ü}^{n+1/2} = {ü}^{n-1/2+α} + α{ü}^n Δt^n; (3)

{u}^{n+1} = {u}^n + {ü}^{n+1/2} Δt^n, (4)

где α = 0,5 при $t = 0$ и α = 1 при $t > 0$. После определения значений перемещений системы {u}^{n+1} на $n + 1$ шаге по времени происходит обновление координат узлов системы:

{x}^{n+1} = {x}^0 + {u}^{n+1}, (5)

где {x}^{n+1} — координаты узлов новой конфигурации системы (после внешнего воздействия); {x}^0 — координаты узлов исходной конфигурации системы (до внешнего воздействия).

Далее расчет идет итерационно до достижения расчетного времени процесса t . Свойства материала, а также связь между напряжениями и деформациями учитываются в физико-математических моделях материалов при определении составляющей {F_int}^n.

Цифровое моделирование процесса ударного наезда автомобиля на ДО, которое также принято называть виртуальными испытаниями, условно можно разделить на этапы:

- 1. Построение конечно-элементных (КЭ) моделей отдельных конструктивных деталей ограждения и их объединение (сборка) в общую цифровую модель ДО.
- 2. Выбор физико-математических моделей материала для деталей ограждения и задание параметров этих моделей.
- 3. Создание КЭ модели автомобиля, который будет совершать наезд на ограждение, и параметров наезда (скорость, угол наезда).
- 4. Задание граничных условий, контактных взаимодействий между элементами ДО и наезжающего автомобиля, постановка на расчет (проведение полномасштабных виртуальных испытаний).
- 5. Анализ результатов расчета.

Из приведенных этапов основными следует считать этапы 1 и 2, так как именно на них формируются цифровые модели (ЦМ) элементов ДО, механика ко-



Рис. 4. Типовая схема построения валидированных цифровых моделей дорожных ограждений

Fig. 4. A typical scheme for creating validated digital models of road barriers

торых напрямую зависят от качества КЭ сетки и заданных параметров выбранной модели материала, а следовательно, результаты решения уравнения (1) на каждом временном шаге. Под ЦМ элемента ДО будем понимать КЭ модель с заданными параметрами выбранной физико-математической модели материала. Для построения валидированных цифровых моделей в настоящей работе предложена следующая последовательность (этапность) действий (схема), приведенная на рис. 4, построенная по системе «материал – деталь – изделие». Принимается, что ЦМ считается валидированной, если разница между амплитудными значениями определяемых величин (например, усилие, перемещение, деформация, ускорение и т.д.) в этой модели по сравнению с натурным экспериментом не превышает 10 %.

В настоящей работе в качестве модели материала для стальных элементов ДО была принята модель *MAT_024_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, входящая в базу моделей материалов ПК LS-DYNA (обозначение модели материала принято в соответствии с обозначением в ПК LS-DYNA).

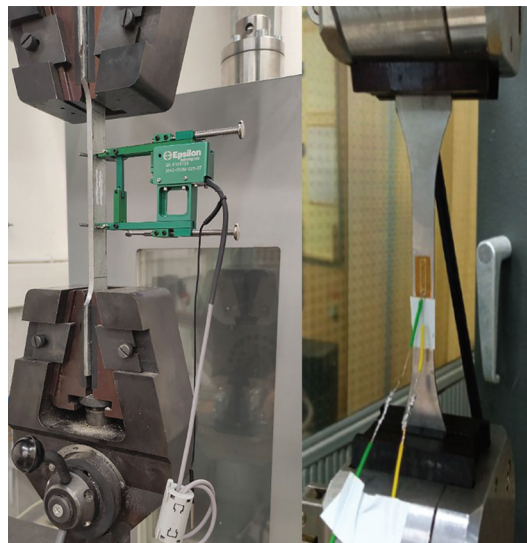
В *MAT_024 деформации в материале разделяются на упругие и пластические. Кривая деформирования (истинная диаграмма деформирования) аппроксимируется кусочно-линейно, т.е. пластические деформации разбиваются на интервалы (участки) и на каждом участке пластический модуль считается постоянным.

Упругую область деформаций от пластической отделяет поверхность текучести, которая в *MAT_024 представлена критерием Мизеса:

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} \leq 0; \quad (6)$$



a



b

Рис. 5. Испытания на растяжение: а — типичный вид образцов; б — тензометрическое оборудование

Fig. 5. Tensile tests: a — typical form of specimens; b — strain gauge equipment

$$\sigma_y = \beta \left[\sigma_\tau + f_h(\epsilon_{eff}^p) \right], \quad (7)$$

где J_2 — второй инвариант девиатора напряжений s_{ij} ; ϵ_{eff}^p — эффективные пластические деформации; $f_h(\epsilon_{eff}^p)$ — функция упрочнения; β — параметр, влияющий на напряжения текучести σ_y в зависимости от скорости деформаций, может быть определен выражением:

$$\beta = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (8)$$

где $\dot{\epsilon} = \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}$ — скорость деформаций; C, p — параметры модели Купера – Саймондса.

Из приведенных уравнений видно, что связь между напряжениями и деформациями в *MAT_024 и поведение материала при пластических деформациях, в частности при определении $\{F_{int}\}^n$, в основном зависит от принятой истинной диаграммы деформирования.

Для построения истинной диаграммы и установления ключевых механических характеристик материалов основных элементов конструкций ДО — балок, стоек, разрезных стержней — проводились механические испытания на растяжение плоских образцов, вырезанных из рассматриваемых элементов ДО (рис. 5, а). При выполнении испытаний применялась тензометрическая аппаратура — тензорезисторы и экстензометр (рис. 5, б). В результате испытаний для каждого материала элементов строились условные (инженерные) диаграммы деформирования, которые впоследствии перестраивались в истинные диаграммы.

Один из рекомендуемых методов построения истинной диаграммы деформирования состоит в следующем [18]: полученная в результате испытаний на одноосное растяжение условная (инженерная) диаграмма деформирования делится на три части (рис. 6):

упругую, зону упрочнения, зону местной текучести или зону разупрочнения, в которой происходит локализация деформаций.

Первая часть условной диаграммы растяжения (от 0 до предела текучести σ_t совпадает с истинной диаграммой, так как на этом участке поперечные деформации очень малы, и разница между истинными и условными (инженерными) напряжениями, а также истинными и условными (инженерными) деформациями незначительна. Связь между напряжениями и деформациями на этом участке выражается законом Гука:

$$\sigma(\varepsilon) = E \cdot \varepsilon, \text{ при } \varepsilon \leq \varepsilon^{yp}, \quad (9)$$

где ε^{yp} — инженерные деформации при пределе текучести.

Вторая часть условной диаграммы (от предела текучести σ_t до предела прочности σ_b) отличается от истинной диаграммы, поскольку на этом участке величины деформаций (продольных и поперечных) существенно отличаются от упругих, и намечается место будущего разрыва. Экспериментально установлено, что пластическая деформация сталей протекает без изменения объема материала [18], поэтому для определения истинных напряжений σ_{uj} и истинных деформаций ε_{uj} в j -й точке в пределах второй части истинной диаграммы растяжения применяется условие постоянства объема материала (УПО или VCM):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{uj} &= \ln(1 + \varepsilon_j); \\ \sigma_{uj} &= \sigma_j \cdot (1 + \varepsilon_j), \end{aligned} \quad (10)$$

где ε_j — значение инженерной деформации в j -й точке на условной диаграмме (рис. 6); σ_j — инженерное напряжение в j -й точке на условной диаграмме (рис. 6).

Таким образом, для определения истинных напряжений и истинных деформаций в j -й точке на вто-

рой части будущей истинной диаграммы деформирования используются зависимости (10).

На третьей части условной диаграммы растяжения (зоне местной текучести) от предела прочности σ_b до напряжения при разрыве σ_p из-за образования местного сужения (шейки) происходит потеря устойчивости равномерного пластического деформирования и локализация деформации — деформация отмечается лишь в зоне шейки. В связи с этим величины истинных деформаций и истинных напряжений существенно больше, чем соответствующие им значения инженерных напряжений и деформаций. Измерение и вычисление этих величин напрямую в процессе эксперимента являются достаточно сложной задачей и, как правило, проводятся с применением метода корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation — DIC) [19–23]. Для реализации DIC необходимо располагать дорогостоящим оборудованием (высокоскоростные видеокамеры и программное обеспечение для обработки результатов) и определенными навыками в его настройке, что служит основным недостатком.

Однако установить взаимосвязь между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций для построения третьего участка истинной диаграммы возможно, не прибегая к прямым измерениям в процессе эксперимента, выбрав подходящий вид функции (закон деформирования). Наиболее подходящие функции для описания участка локализации на истинных диаграммах деформирования — феноменологические модели упрочнения [23–26], из которых в настоящем исследовании выбрана модель (кривая упрочнения) Хоккетта и Шерби (Hockett – Sherby) [27]:

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_t) \cdot e^{(-N\varepsilon^p)}, \quad (11)$$

где σ_t — предел текучести; σ_s — установившееся напряжение течения, которое также необходимо определить; N и p — параметры, подлежащие определению.

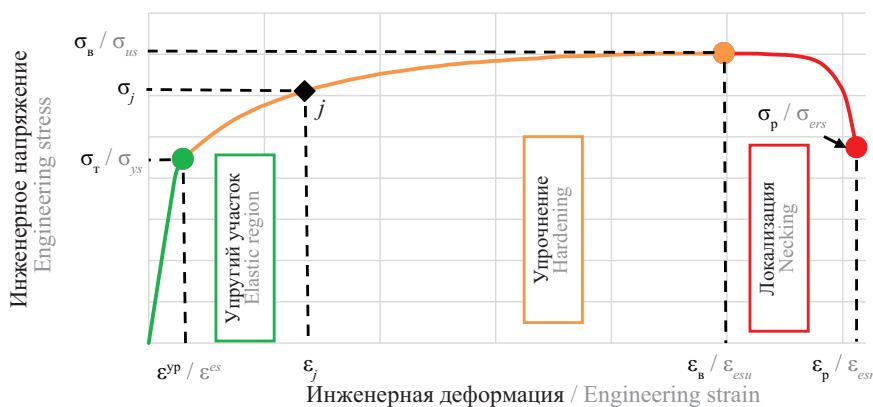


Рис. 6. Участки условной диаграммы деформирования: σ_t — предел текучести; ε^{yp} — инженерная деформация при пределе текучести; σ_b — предел прочности; ε_b — инженерная деформация при пределе прочности; σ_p — инженерное напряжение при разрыве; ε_b — инженерная деформация при разрыве

Fig. 6. Regions of engineering stress-strain curve: σ_{ys} — yield strength; ε^{es} — engineering strain at yield strength; σ_{us} — ultimate strength; ε_{esu} — engineering strain at ultimate strength; σ_{ers} — engineering rupture stress; ε_{esr} — engineering strain at rupture

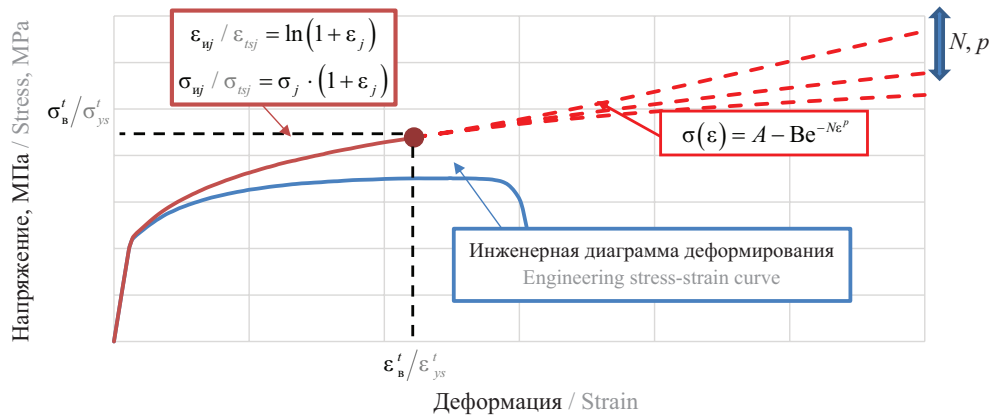


Рис. 7. Экстраполяция истинной диаграммы деформирования по модели Хоккетта и Шерби

Fig. 7. True stress-strain curve extrapolation by Hockett – Sherby model

Следует отметить, что количество определяемых параметров в уравнении (11) можно свести к двум — N и p , используя модель Хоккетта и Шерби в модифицированном виде и следующие условия:

$$\sigma(\varepsilon) = A - Be^{-Ne^p}; \quad (12)$$

$$\begin{cases} \sigma(\varepsilon'_b) = \sigma'_b; \\ \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon = \varepsilon'_b} = \sigma'_b, \end{cases} \quad (13)$$

где σ'_b , ε'_b — напряжения и деформации на истинной диаграмме деформирования, соответствующие пределу прочности и деформациям при пределе прочности на условной диаграмме соответственно.

Вид истинной диаграммы деформирования, построенной по вышеизложенному подходу, показан на рис. 7.

В настоящей работе параметры A и B в модели (12) определялись по условию (13), которое математически выражает гладкость и непрерывность функции при переходе с участка равномерного пластического деформирования на участок локализации в точке с координатами $(\varepsilon'_b, \sigma'_b)$.

С целью идентификации и калибровки параметров N и p был применен обратный метод, который заключался в итерационном подборе таких значений искомых параметров модели, при которых различие между экспериментальной и полученной в ре-

зультате численного эксперимента (виртуальных испытаний) кривыми было бы минимально. Для проведения виртуальных испытаний, имитирующих процесс растяжения плоских образцов для каждого материала, построены оболочечные КЭ модели, одна из которых приведена на рис. 8. Геометрические параметры КЭ моделей образцов и условия испытаний соответствовали натурным.

Процедура минимизации ошибки $F(x)$ при определении указанных параметров N и p в модели (12) была итерационной, проводилась в ПК LS-OPT и математически выражалась как разница между результатами численного y^m и натурального y^e экспериментов [27]:

$$\min F(x) = \min \|y^e - y^m\|. \quad (14)$$

Для измерения расстояния (ошибки) между значениями на экспериментальной P и численной Q кривыми существуют различные алгоритмы [28], среди которых для решения рассматриваемой задачи был выбран алгоритм динамической трансформации временной шкалы (Dynamic Time Warping — DTW). DTW вычисляет расстояние между точками рассматриваемых кривых с помощью пути трансформации $W = w_1, w_2, \dots, w_r$. Этот путь является результатом минимального накопленного расстояния, необходимого для прохождения всех точек рассматриваемых кривых. Математически алгоритм выражается следующим образом [28]:

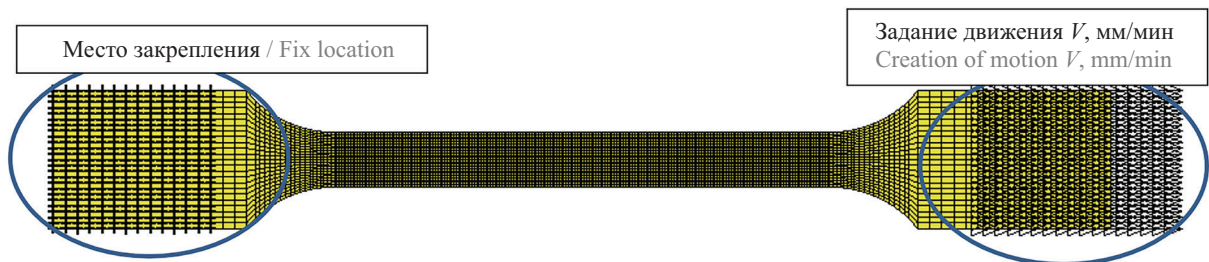


Рис. 8. Виртуальное испытание на растяжение плоского образца

Fig. 8. Virtual tensile test of flat specimen

$$DTW(P, Q) = \frac{1}{l} \min_w \left\{ \sum_{i=1}^l \delta(w_i) \right\}, \quad (15)$$

где $\delta(w_i)$ — расстояние между «подобными» точками кривых.

Одним из наиболее подходящих критериев разрушения и определения места разрушения при наличии только истинных диаграмм деформирования, как уже ранее было указано, служит критерий эффективных пластических деформаций:

$$\varepsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{0,5} dt > \varepsilon_k = \ln \left(\frac{1}{1-\psi} \right), \quad (16)$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ — тензор скоростей деформации; ψ — относительное сужение, определяемое из механических испытаний на растяжение.

Для оценки поведения материала при сложных комбинациях напряженно-деформированного состояния, в частности разрушения, и для тех случаев, где критерий (16) сомнителен, необходимо применение иных моделей с сопутствующим определением требуемых дополнительных параметров. В целях реализации вышеизложенного в данной работе применяемая модель материала дополнялась моделью поврежденности. В качестве модели поврежденности использовалась обобщенная инкрементальная модель поврежденности, зависящая от напряженного состояния (Generalized Incremental Stress State dependent damage model — GISSMO). Модель GISSMO разработана Daimler AG и DYNAmore GmbH [29] для прогнозирования разрушения на основе постепенного накопления поврежденности, включая разупрочнение при различных напряженных состояниях, характеризующихся параметром трехосности. Рассматриваемая модель, сформулированная на основе модели разрушения Джонсона – Кука [30], является феноменологической и предполагает, что процесс разрушения начинается тогда, когда поврежденность достигает критического значения.

Первой важной особенностью GISSMO служит то, что накопление поврежденности имеет направленность (путь нагружения) и зависит от параметра трехосности:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}}, \quad (17)$$

где σ_m , σ_{vm} — среднее и эквивалентное напряжения (по Мизесу) соответственно.

Накопление поврежденности в GISSMO осуществляется по следующему закону:

$$\Delta D = \frac{n}{\varepsilon_f(\eta)} D^{\left(1-\frac{1}{n}\right)} \Delta \varepsilon_{pl}, \quad (18)$$

где n — показатель, позволяющий учитывать нелинейное накопление поврежденности; $\varepsilon_f(\eta)$ — весовая функция, представляющая собой деформации разрушения в зависимости от параметра трехосности;

$\Delta \varepsilon_{pl}$ — приращение текущей эквивалентной пластической деформации.

Значение параметра поврежденности в КЭ в начале $D = 0$ (при численных процедурах в начале расчета принимается $D = 10^{-20}$) и увеличивается по мере накопления поврежденности по выражению (18) до значения 1. Когда значение параметра составляет $D = 1$, происходит разрушение путем удаления КЭ.

Второй важной особенностью модели GISSMO является связь между напряжениями и поврежденностью в КЭ, которая учитывается параметром неустойчивости F , накопление которого осуществляется по аналогичному закону:

$$\Delta F = \frac{n}{\varepsilon_{crit}(\eta)} F^{\left(1-\frac{1}{n}\right)} \Delta \varepsilon_{pl}, \quad (19)$$

где $\varepsilon_{crit}(\eta)$ — весовая функция, представляющая собой деформации, при которых происходит их локализация, также зависящие от параметра трехосности и при которых накопленная поврежденность начинает оказывать влияние на напряжения.

При достижении $F = 1$ с учетом законов накопления поврежденности (18) и неустойчивости (19) в зависимости от параметра трехосности связь между тензорами напряжений с учетом σ^* и без учета поврежденности σ определяется следующим образом:

$$\sigma^* = \sigma \left[1 - \left(\frac{D - D_{crit}}{1 - D_{crit}} \right)^m \right], \text{ при } D \geq D_{crit}, \quad (20)$$

где D_{crit} — величина накопленной поврежденности при достижении $F = 1$; m — показатель затухания, характеризующий скорость падения напряжения.

Для калибровки параметров GISSMO — n , m , $\varepsilon_f(\eta)$ и $\varepsilon_{crit}(\eta)$ — в настоящем исследовании применен обратный метод, который, как и ранее, заключался в минимизации ошибки между результатами численного и натурного экспериментов (минимизация разницы значений в точках на расчетных и экспериментальных кривых) в программе LS-OPT. Натурные и виртуальные испытания проводились на стандартных (№ 6) и со специальной геометрией (№ 1–5) образцах (рис. 9). Благодаря такой форме образцов реализуются различные параметры трехосности при испытаниях на растяжение. Однако указанные на рис. 9 параметры трехосности являются теоретическими. В действительности параметр трехосности может меняться из-за деформации сечения образца в течение всего процесса нагружения. Поэтому при определении $\varepsilon_f(\eta)$ и $\varepsilon_{crit}(\eta)$, помимо теоретических значений трехосности, учитывался более широкий диапазон.

Для численных экспериментов минимальный размер КЭ составлял 0,5 мм. С целью добавления модели поврежденности GISSMO при проведении виртуальных испытаний в LS-DYNA использовалась карта *MAT_ADD_DAMAGE_GISSMO.

Достаточно большая размерность общих ЦМ деформируемых ДО, в которых, как правило, размер КЭ для основных деталей достигает 5–20 мм, дела-

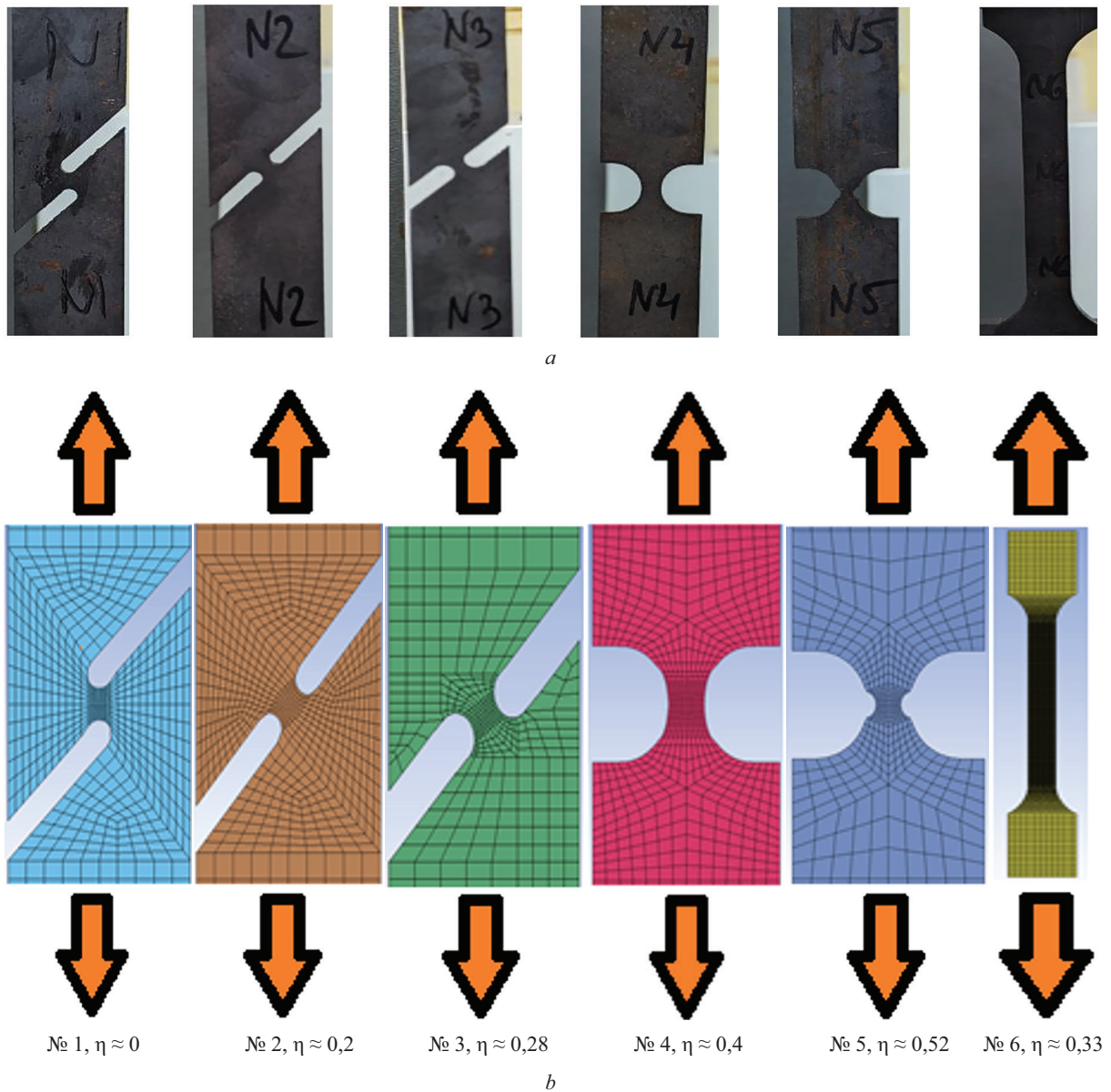


Рис. 9. Образцы для определения параметров GISSMO при разных теоретических значениях параметров трехосности: *a* — натурные; *b* — КЭ модели

Fig. 9. Specimens for determining GISSMO parameters at various theoretical values of triaxiality: *a* — full-scale; *b* — FE models

ет практически невозможным применение КЭ размером 0,5 по причинам, указанным ранее. В модели GISSMO предусмотрена функция для распространения откалиброванных параметров на другие размеры элементов, которая подразумевает построение и калибровку двух дополнительных кривых, одна из которых путем введения регуляризирующего (корректирующего) множителя масштабирует параметр $\varepsilon_f(\eta)$ в зависимости от размера КЭ, другая изменяет параметр m в зависимости от размера КЭ.

Для реализации вышеуказанного проведена серия численных экспериментов на растяжение в LS-DYNA стандартных образцов (№ 6, $\eta = 0,33$) с разными минимальными размерами КЭ — 1; 2,5; 5 и 10 мм. До-

полнительные кривые были получены обратным методом с использованием LS-OPT.

Вторым основным этапом после определения необходимых параметров для выбранных физико-математических моделей материалов исследуемых деталей является их применение для разработки валидированных моделей отдельных конструктивных элементов. Разработку таких моделей целесообразно осуществлять, моделируя процесс работы отдельных элементов ДО, близкий к реальному в составе всего ограждения. В ходе таких испытаний исследуется влияние размера КЭ и принятых параметров моделей материалов на точность описания механики работы конструктивных элементов ДО, включая разрушение. С этой целью выполнены стендовые натурные

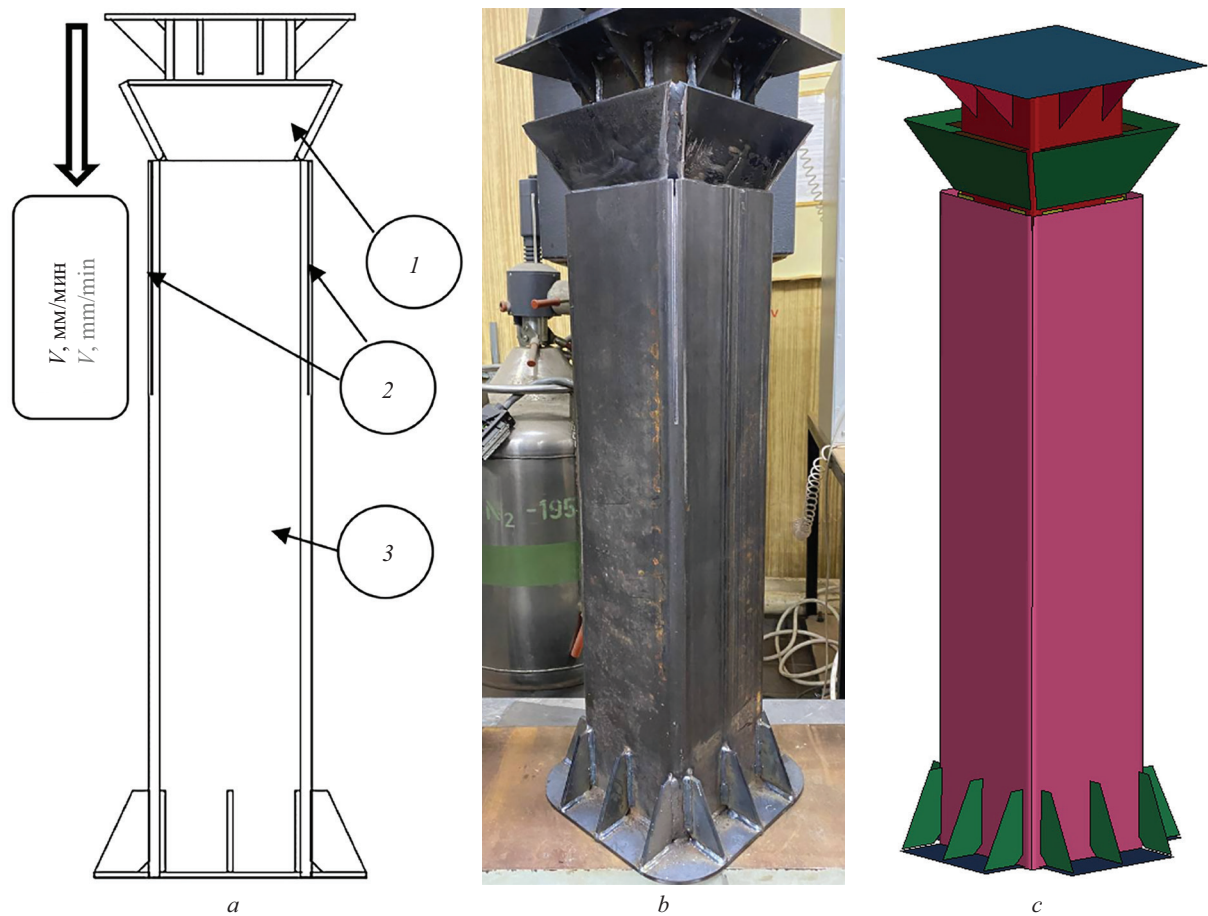


Рис. 10. Стендовые испытания разрезного стержня ФО: *a* — схема испытаний; *b* — натурные испытания; *c* — виртуальные испытания; 1 — режущий элемент; 2 — концентраторы напряжений; 3 — стержень

Fig. 10. Bench tests of split rod of front barrier: *a* — test scheme; *b* — full-scale tests; *c* — virtual tests; 1 — cutting element; 2 — stress concentrators; 3 — rod

и виртуальные испытания основных типовых элементов деформируемых ДО — разрезных стержней и балок, в которых, как правило, происходит разрушение — прогнозируемое и неконтролируемое.

Исследование процесса прогнозируемого разрушения в настоящей работе проведено на примере типового энергопоглощающего элемента — разрезного стержня, применяющегося в конструкциях ФО

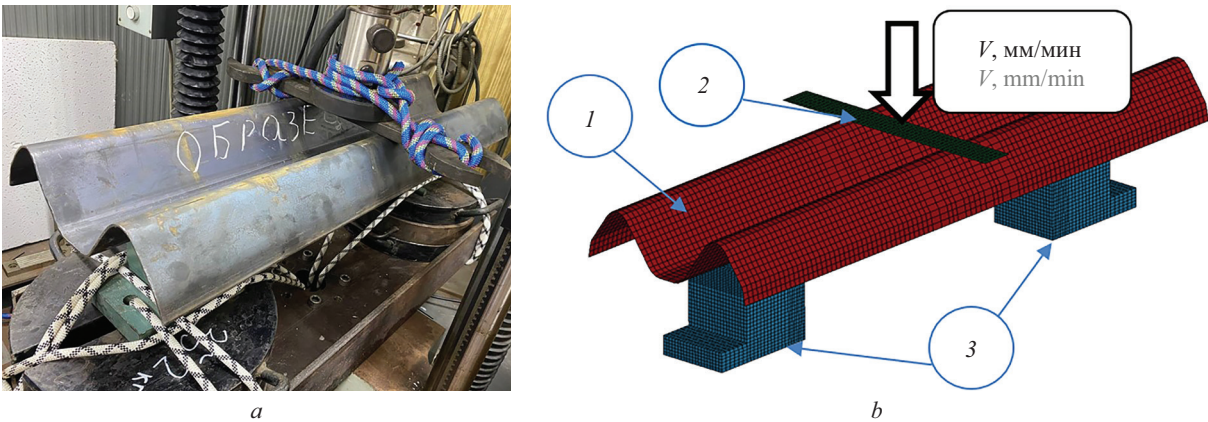


Рис. 11. Стендовые испытания балки БДО: *a* — схема испытаний; *b* — натурные испытания; 1 — балка; 2 — нагружающий элемент; 3 — опоры

Fig. 11. Bench tests of guardrail barrier beam: *a* — test scheme; *b* — full-scale tests; 1 — beam; 2 — loading element; 3 — supports

с системой энергопоглощения по принципу прогнозируемого разрушения. При выполнении стендовых испытаний (рис. 10) стержень 3 с введенным концентратором 2 нагружался путем перемещения активной траверсы испытательной машины с постоянной скоростью, на которой установлен режущий элемент 1. Форма концентратора в изучаемой детали обуславливает направленный рост трещины по I моде. Для проведения виртуальных стендовых испытаний, моделирующих натурные, была разработана модель разрезного стержня с размером КЭ 2 мм. В качестве критериев разрушения рассматривались два критерия — по эффективным пластическим деформациям и по модели поврежденности GISSMO. Режущий элемент в модели принимался абсолютно жестким с использованием модели материала *MAT_020 RIGID.

Для исследования механики поведения балки — основного элемента БДО, за счет которого осуществляются удержание и поглощение энергии, проводились стендовые испытания, имитирующие ее основной вид деформации при ударном наезде ТС — изгиб (рис. 11). В процессе стендовых испытаний нагружение балки 1 выполнялось посредством вертикального перемещения активной траверсы испытательной машины, на которой установлен нагружающий элемент 2. Опоры 3 и нагружающий элемент в ЦМ виртуальных испытаний принимались абсолютно жесткими (модель материала *MAT_020).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера для материала разрезного стержня на рис. 12–19 приведены результаты калибровки и идентификации параметров модели материала *MAT_024 в виде истинной диаграммы деформирования, а также параметров модели GISSMO. Для материала балки параметры были получены аналогично.

Сравнение результатов натурных и виртуальных стендовых испытаний с применением полученных параметров моделей материала для исследуемых элементов конструкции ДО — разрезного стержня и балки — приведено на рис. 20–23 и в табл. 1, 2. Точность разработанных моделей разрезного стержня при различных критериях разрушения оценивалась по параметрам — первым пиковым усилием, характеризующем начало раскрытия трещины в месте введенного концентратора, средним усилиям на первом и втором участках постоянного сопротивления, а также по работе внешних сил (рис. 20). Точность разработанной модели балки оценивалась по среднему усилию на первом участке, характеризующем образование и последующую работу пластических шарниров в сечениях профиля балки, по максимальному усилию при изгибе балки, а также по работе внешних сил (рис. 22).

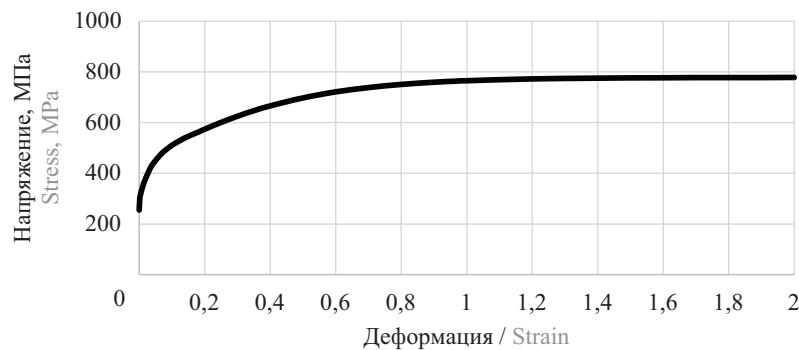


Рис. 12. Истинная диаграмма деформирования материала разрезного стержня

Fig. 12. True stress-strain curve of split rod material

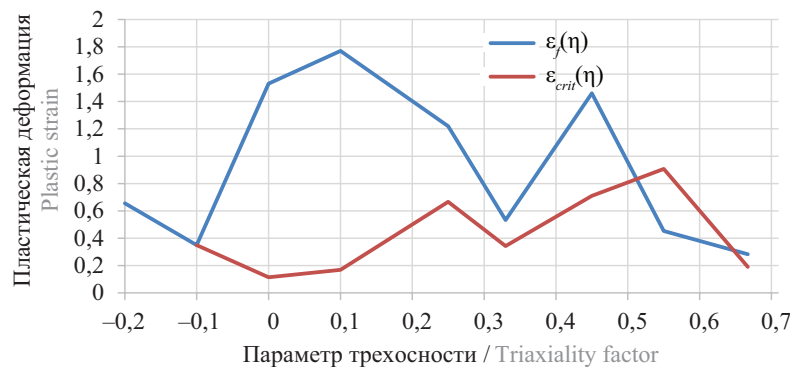
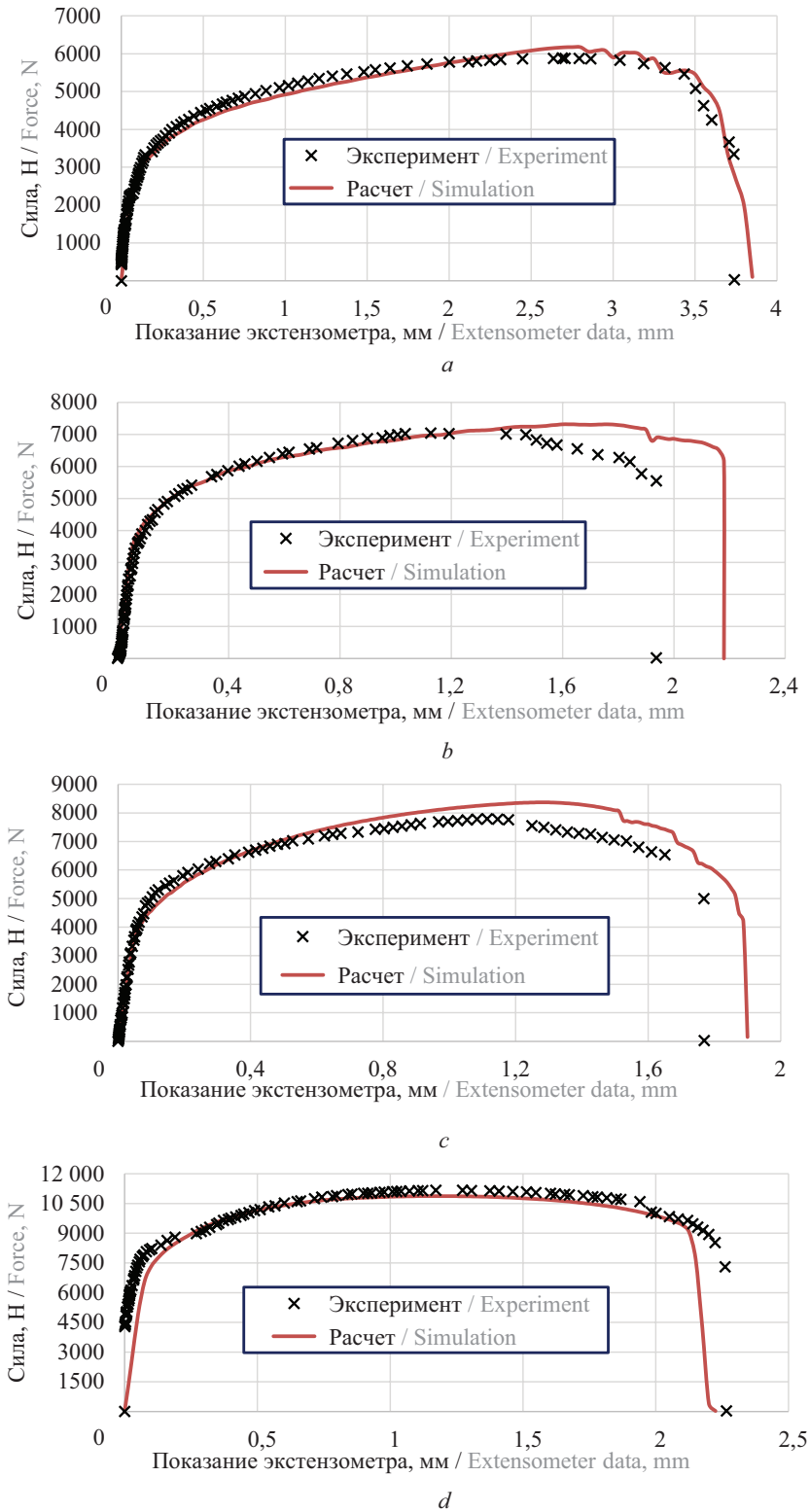


Рис. 13. Функции $\varepsilon_f(\eta)$ и $\varepsilon_{crit}(\eta)$, полученные в LS-OPT

Fig. 13. Functions $\varepsilon_f(\eta)$ and $\varepsilon_{crit}(\eta)$, achieved from LS-OPT

Анализ полученных результатов показывает, что различие между натурными и виртуальными стендовыми испытаниями по оцениваемым параметрам в случае применения модели поврежденности GISSMO и принятых истинных диаграмм деформирования не превышает 10 %, что свидетельствует о высокой точности разработанных моделей и корректности подобранных параметров для мо-

делей материалов. В то же время применение критерия разрушения по эффективным пластическим деформациям обеспечивает меньшую точность моделирования процесса прогнозируемого разрушения (табл. 1). На основании принятых критериев валидации разработанные ЦМ отдельных элементов с принятыми диаграммами деформирования и моделью поврежденности GISSMO считаются валидирован-



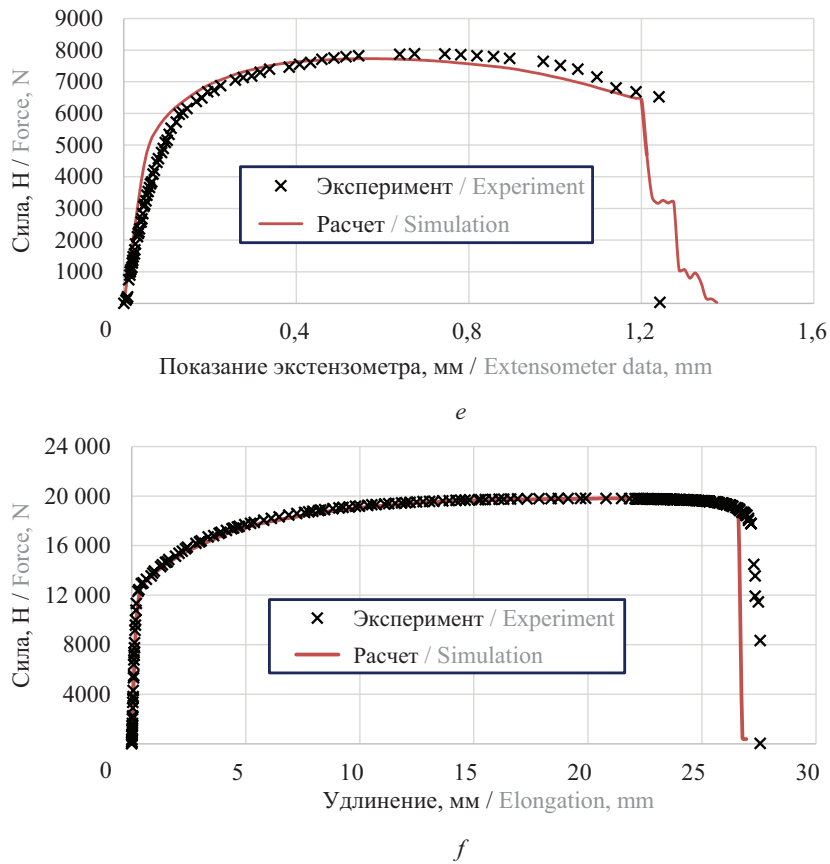


Рис. 14. Сравнение результатов натурного и численных экспериментов на образцах с различной геометрией: *a* — образец № 1; *b* — образец № 2; *c* — образец № 3; *d* — образец № 4; *e* — образец № 5; *f* — образец № 6

Fig. 14. Comparison of the full-scale and virtual tests results on specimens with various geometry: *a* — specimen No. 1; *b* — specimen No. 2; *c* — specimen No. 3; *d* — specimen No. 4; *e* — specimen No. 5; *f* — specimen No. 6

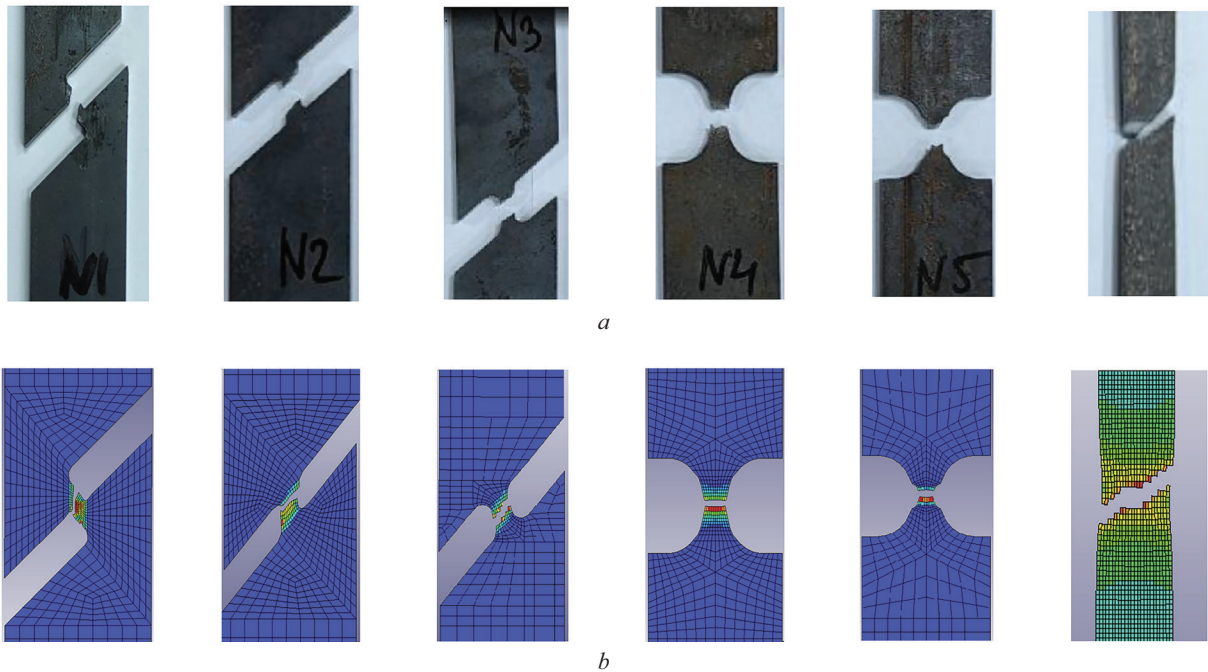


Рис. 15. Картина разрушения образцов различной геометрии: *a* — натуральных; *b* — КЭ моделей

Fig. 15. Fracture pattern of specimens of various geometry: *a* — full-scale; *b* — FE models

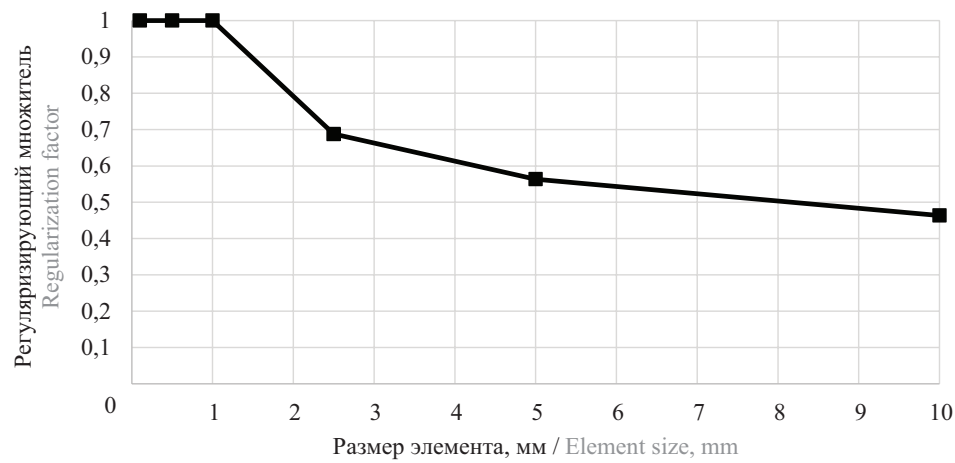


Рис. 16. Регуляризирующий множитель для $\epsilon_j(\eta)$ в зависимости от размера КЭ

Fig. 16. Regularization factor depending $\epsilon_j(\eta)$ on the size of FE

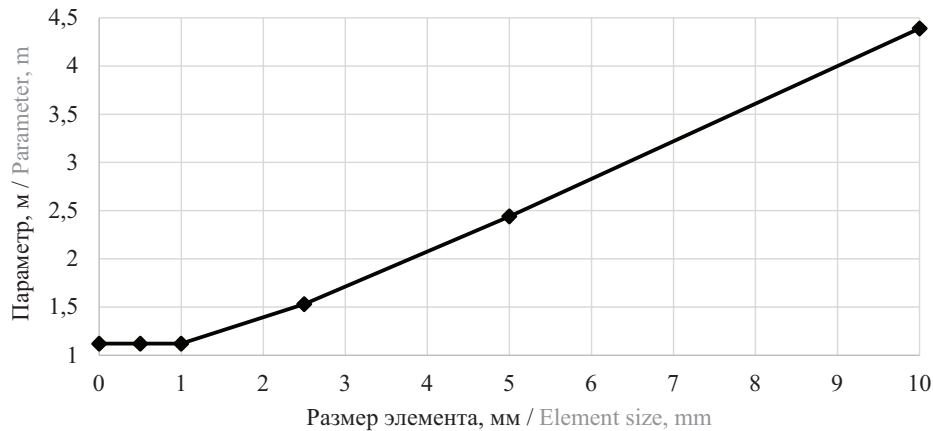


Рис. 17. Параметр затухания m в зависимости от размера КЭ

Fig. 17. Fading exponent m depending on the element size of FE

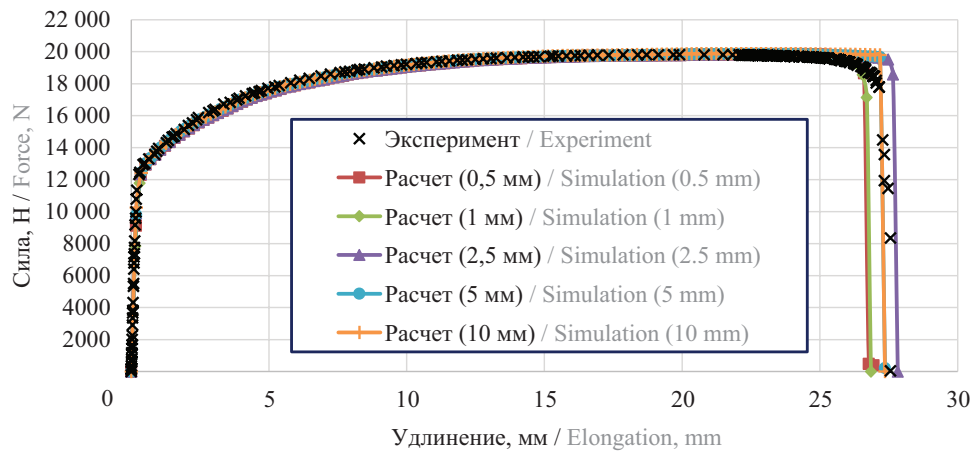


Рис. 18. Результаты численных экспериментов на растяжение при различных размерах КЭ

Fig. 18. Results of virtual tensile tests for various FE sizes

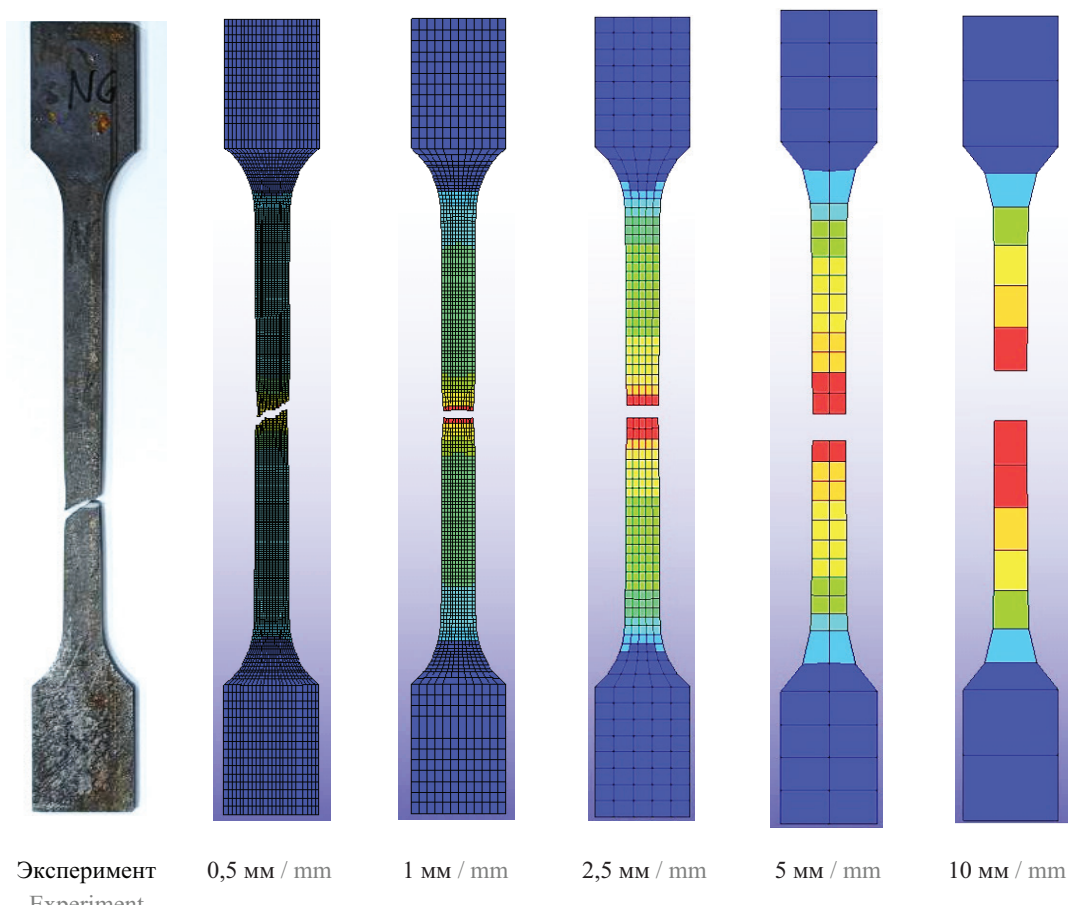


Рис. 19. Картина разрушения натурного и КЭ моделей образцов с различной плотностью сетки после регуляризации
Fig. 19. Fracture pattern of full-scale and FE models of specimens with different mesh densities after regularization

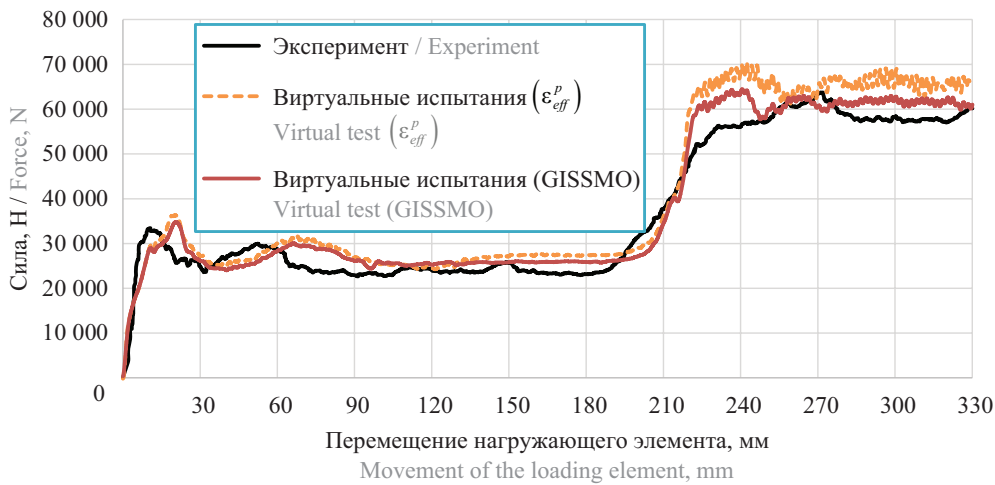


Рис. 20. Сравнение результатов натурных и виртуальных стендовых испытаний
Fig. 20. Comparison of full-scale and virtual bench tests results

ными и в дальнейшем объединяются в общие цифровые модели ДО для проведения полномасштабных виртуальных испытаний.

В качестве примера на рис. 24–27 и в табл. 3 приведено сравнение результатов полномасштабных натурных и виртуальных испытаний двух типов ограждений — ФО с прогнозируемым разрушением

разрезных стержней и БДО с неконтролируемым разрушением балки, которое произошло при проведении полномасштабных натурных испытаний (рис. 2). В качестве критерия разрушения балки в разработанной цифровой модели БДО рассмотрены как критерий эффективных пластических деформаций, так и модель поврежденности GISSMO. В цифровой модели

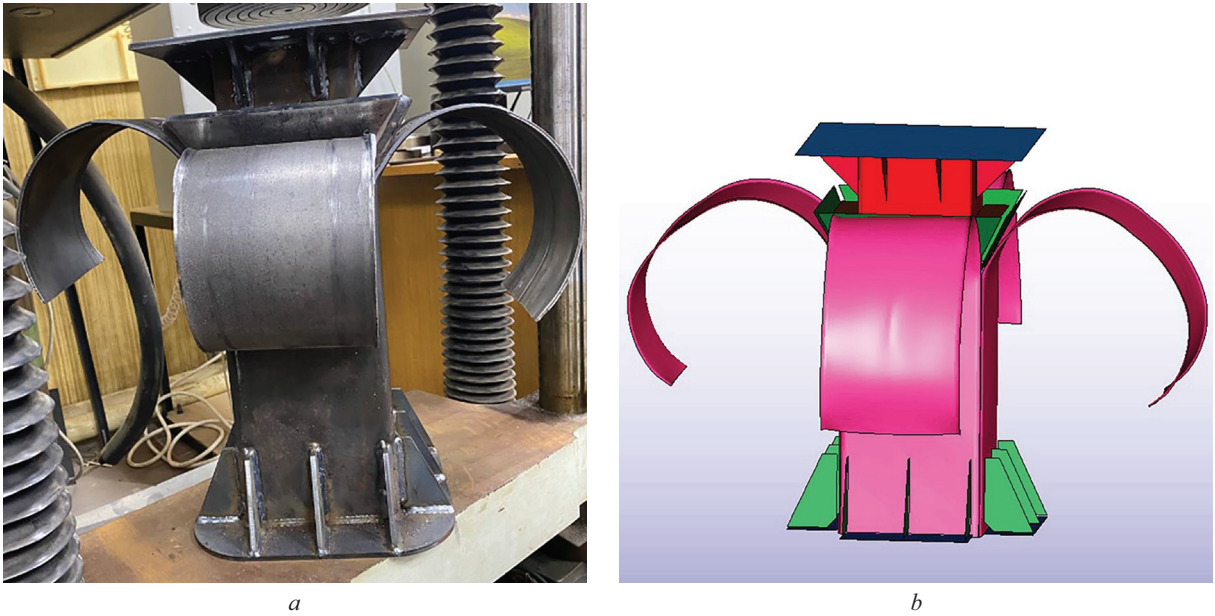


Рис. 21. Вид разрезного стержня после стендовых испытаний: *a* — натуральных; *b* — виртуальных
Fig. 21. View of the split rod after bench tests: *a* — full-scale; *b* — virtual

Табл. 1. Сравнение результатов стендовых натуральных и виртуальных испытаний разрезного стержня
Table 1. Comparison of the results of full-scale and virtual bench tests of a split rod

Параметр / Parameter	Эксперимент Experiment	Виртуальное ϵ_{eff}^p Virtual ϵ_{eff}^p	Виртуальное (GISSMO) Virtual (GISSMO)	Различие, % Difference, %
Первое пиковое усилие, кН First peak force, kN	33,42	36,33	34,79	8,7/4,1
Среднее усилие на первом участке, кН Average force in the first region, kN	24,73	27,09	26,19	9,5/5,9
Среднее усилие на втором участке, кН Average force in the second region, kN	58,71	65,67	61,83	11,9/5,3
Работа внешних сил, кДж External work, kJ	12,15	13,39	12,69	10,2/4,4

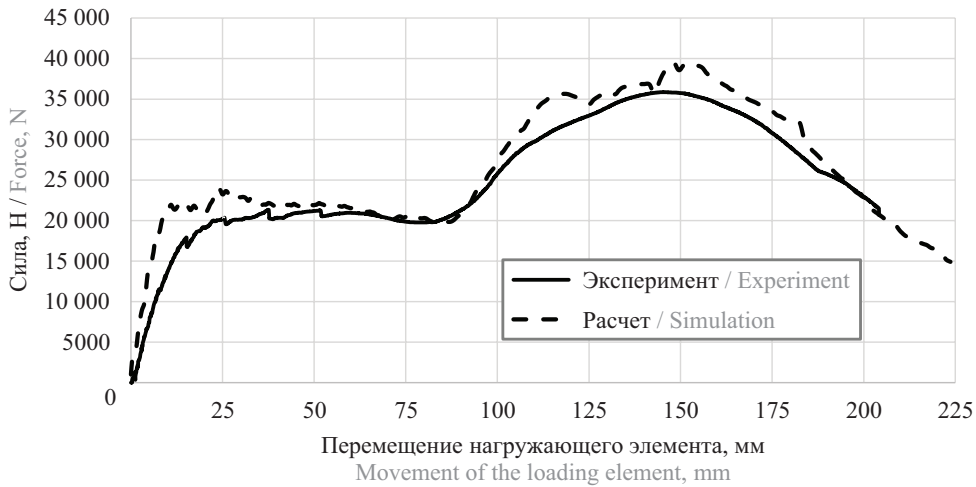


Рис. 22. Сравнение результатов натуральных и виртуальных стендовых испытаний балки
Fig. 22. Comparison of the full-scale and virtual bench test results of the beam

Табл. 2. Сравнение результатов натурных и виртуальных стендовых испытаний балки
Table 2. Comparison of the full-scale and virtual bench test results of the beam

Параметр / Parameter	Эксперимент Experiment	Расчет Simulation	Различие, % Difference, %
Среднее усилие, кН Average force, kN	20,55	21,45	4,38
Максимальное усилие, кН Maximum of the force, kN	35,85	39,41	9,93
Работа внешних сил, кДж External work, kJ	5,13	5,48	6,82



Рис. 23. Балка после стендовых испытаний: *a* — натурных; *b* — виртуальных
Fig. 23. Beam after bench tests: *a* — full-scale; *b* — virtual

ФО применялись валидированные модели разрезных стержней с моделью поврежденности GISSMO. Начальные условия наезда автомобилей на рассматриваемые ДО при выполнении полномасштабных испытаний принимались в соответствии с данными протоколов натурных испытаний, проведенных в ИЦ НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ» по ГОСТ 33129 для БДО (рис. 24, *a*) и по ГОСТ Р 59291 (рис. 24, *b*).

Анализ проведенных полномасштабных испытаний ДО показал:

- при цифровом моделировании конструкции ФО с поглощением энергии по принципу прогнозируемого разрушения с применением валидированных моделей разрезных стержней различие между натурными и виртуальными испытаниями по оцененным параметрам (табл. 3) не превышает 10 %,

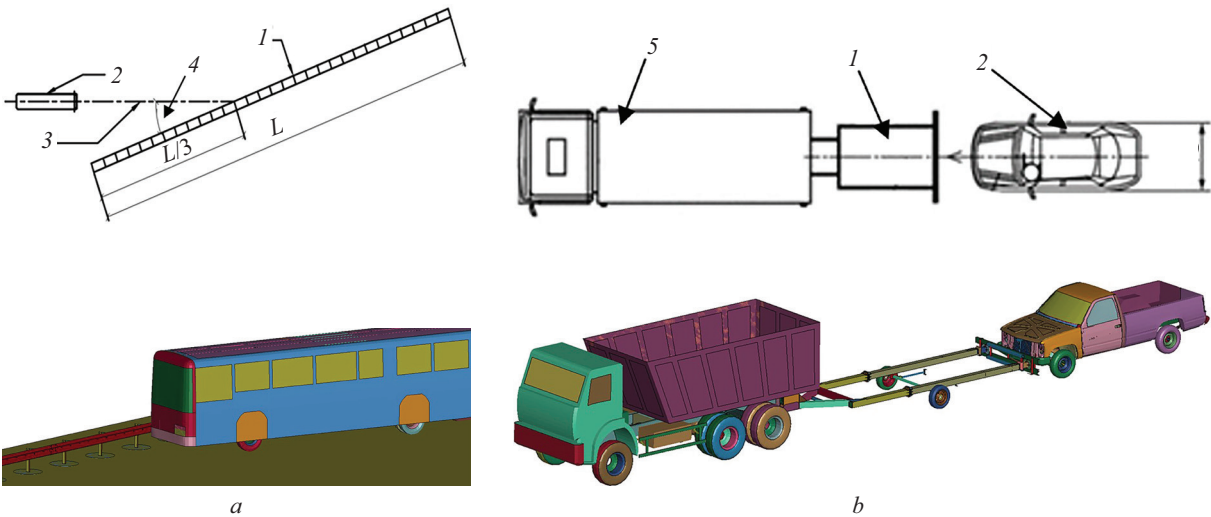


Рис. 24. Схема полномасштабных испытаний: *a* — БДО; *b* — ФО; *1* — ограждение; *2* — испытательный автомобиль; *3* — направление наезда; *4* — угол наезда $\alpha = 20^\circ$; *5* — автомобиль прикрытия
Fig. 24. Full-scale crash test scheme: *a* — guardrail barrier; *b* — front barrier; *1* — barrier; *2* — test vehicle; *3* — impact direction; *4* — impact angle; *5* — cover vehicle

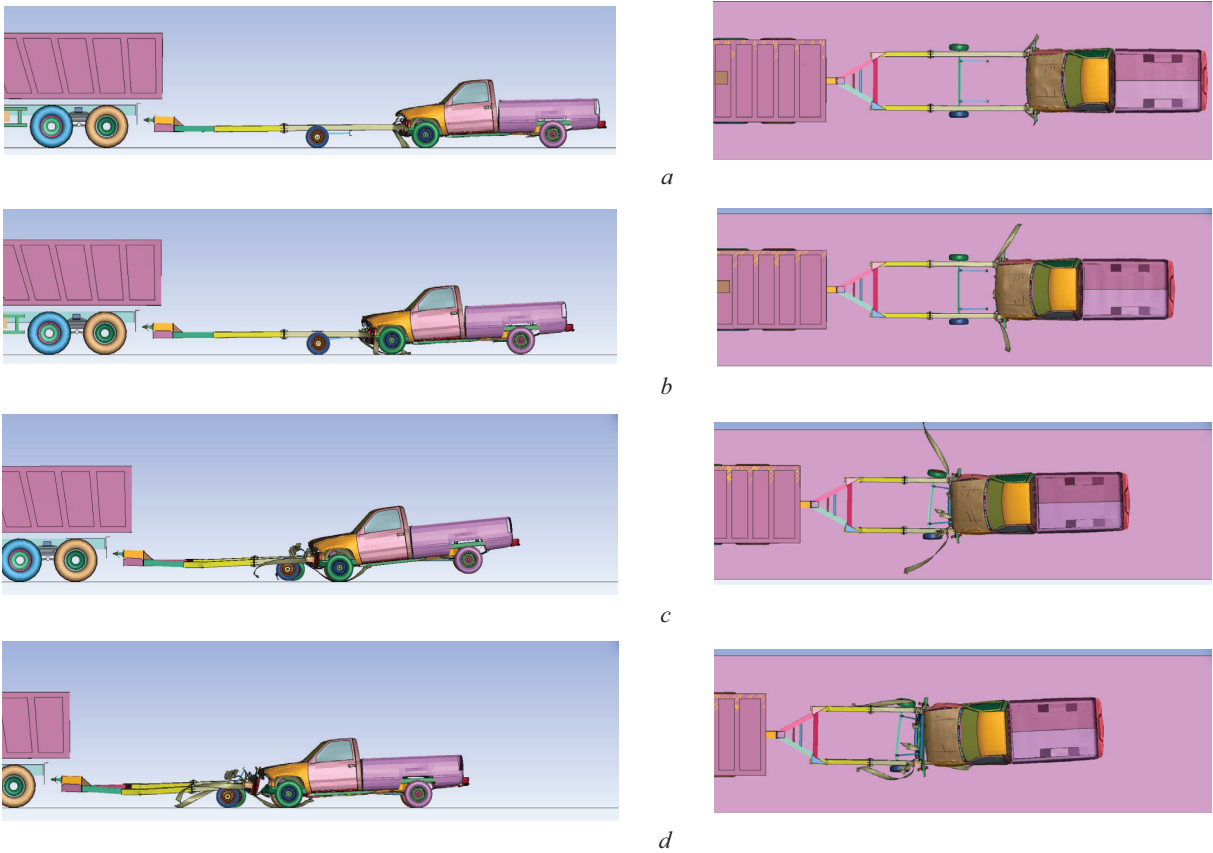


Рис. 25. Виртуальное испытание ФО: *a* — 0,05 с; *b* — 0,1 с; *c* — 0,3 с; *d* — 0,7 с
Fig. 25. Virtual test of front barrier: *a* — 0.05 s; *b* — 0.1 s; *c* — 0.3 s; *d* — 0.7 s

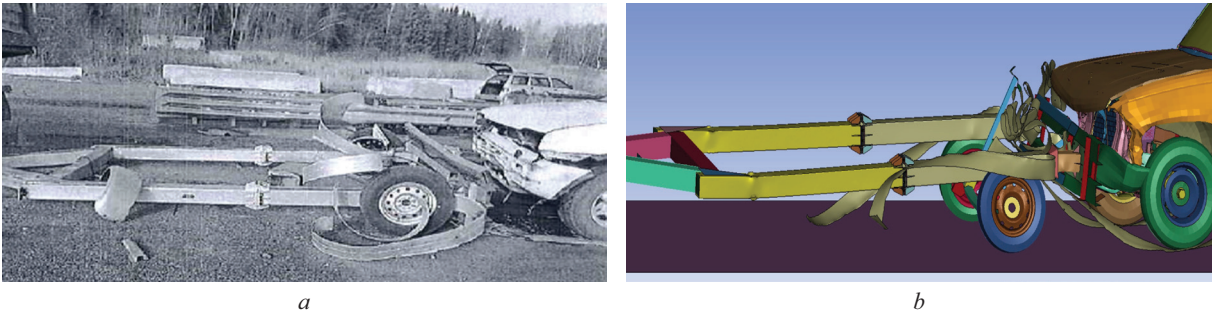


Рис. 26. ФО после удара: *a* — натурные испытания; *b* — виртуальные испытания
Fig. 26. Front barrier after impact: *a* — full-scale crash-test; *b* — virtual crash-test

Табл. 3. Сравнение результатов натурных и виртуальных испытаний ФО
Table 3. Comparison of the full-scale and virtual crash-test results of front barrier

Параметр / Parameter	Натурные испытания Full-scale test	Виртуальные испытания Virtual crash-test	Различие, % Difference, %
Деформация ограждения Deformation of barrier	3,765 м / m	3,48 м / m	7,57
Длина перемещения АП CV displacement	6,2 м / m	5,61 м / m	9,52
ИТТ / ASI	0,96	0,99	3,13

Примечание: АП — автомобиль прикрытия; ИТТ — индекс тяжести травмирования.
Note: CV — cover vehicle; ASI — acceleration severity index.

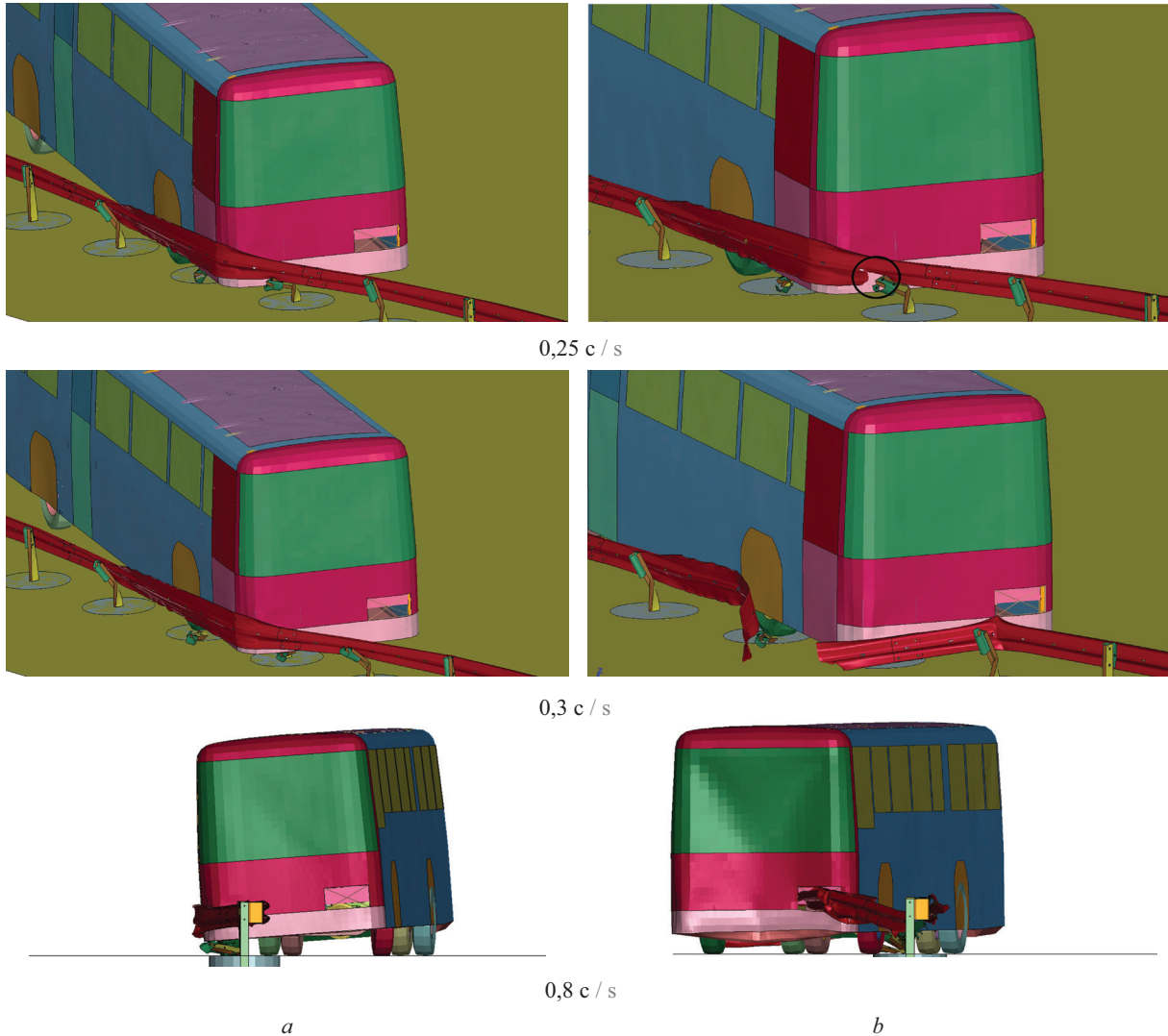


Рис. 27. Виртуальное испытание БДО при различных критериях разрушения: *a* — критерий эффективных пластических деформаций; *b* — GISSMO

Fig. 27. Virtual crash-test of guardrail barrier with various failure criteria: *a* — effective plastic strain; *b* — GISSMO

что свидетельствует о высокой точности и адекватности разработанных моделей;

- при цифровом моделировании конструкции БДО в случае применения в качестве критерия разрушения модели поврежденности GISSMO происходит разрушение секции балки, что согласуется с результатами натурных испытаний, в то время как при использовании критерия разрушения по эффективным пластическим деформациям разрыва балки не происходит.

Указанное выше свидетельствует о высокой точности и адекватности разработанных моделей по предложенному подходу проведения виртуальных испытаний по схеме поэтапной валидации: материал – деталь – изделие, с валидацией отдельных конструктивных элементов посредством стендовых испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании анализа результатов цифрового моделирования разрушения элементов дорожных ограждений безопасности на примере стендовых

и полномасштабных испытаний различных конструкций ДО (БДО и ФО) было выявлено, что наибольшую точность в описании процессов разрушения элементов конструкций ДО по сравнению с ранее применяемыми дает использование в физико-математической модели материала модели поврежденности GISSMO. Следует отметить, что при идентификации и калибровке параметров моделей материалов, в частности построении истинных диаграмм деформирования, особенно в зоне локализации деформаций, а также параметров модели поврежденности GISSMO, целесообразно использовать обратный метод, а проверку корректности определенных параметров для моделей материалов и моделей поврежденности выполнять посредством сравнения натурных стендовых и виртуальных испытаний исследуемой детали, т.е. проведением процедуры валидации отдельной детали. В дальнейшем валидированные модели отдельных основных элементов объединяются в общие модели ограждений

для осуществления полномасштабных виртуальных испытаний и последующего анализа.

Результаты проведенных исследований следует учитывать при проектировании новых безопасных

и конкурентоспособных конструкций ДО, особенно конструкций, работающих по принципу прогнозируемого разрушения, а также при анализе разрушения конструкций при испытаниях и в эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сторожев С.А., Логинов В.Ю., Аристархова А.Н. Влияние сертификации дорожных ограждений на безопасность дорожного движения // Безопасность дорожного движения. 2022. № 2. С. 52–56. EDN OWTNRQ.

2. Андреев К.П., Борычев С.Н., Терентьев В.В., Шемякин А.В. Дорожные ограждения: современные решения для повышения безопасности движения // Грузовик. 2021. № 6. С. 43–48. EDN JXOXJJ.

3. Андреев К.П., Терентьев В.В., Шемякин А.В. Применение дорожного энергопоглощающего ограждения для повышения безопасности движения // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2018. № 1. С. 5–12. DOI: 10.15593/24111678/2018.01.01. EDN YVGQRA.

4. Qiao W., Huang E., Guo H., Liu Y., Ma X. Barriers involved in the safety management systems: a systematic review of literature // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19. Issue 15. P. 9512. DOI: 10.3390/ijerph19159512

5. Сунгатуллина К.А. Условия и факторы, влияющие на безопасность дорожного движения на современном этапе // Вестник НЦБЖД. 2022. № 2 (52). С. 126–135. EDN UKXUKI.

6. Дергунов С.А., Орехов С.А., Тарановская Е.А., Самигуллин Н.Р. Дорожные ограждения, рассеивающие энергию удара // Тенденции развития науки и образования. 2017. № 26–4. С. 69–71. DOI: 10.18411/lj-31-05-2017-72. EDN ZCNFPT.

7. Тавшавадзе Б.Т. Разработка и обоснование методологии расчетов, испытаний и сертификации дорожных удерживающих ограждений барьерного типа : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 147 с. EDN CNLKWQ.

8. Карпов И.А. Механика конструкций тросовых дорожных ограждений при ударном взаимодействии с транспортным средством и разработка математических моделей расчета : дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 151 с. EDN YANQXS.

9. Демьянушко И.В., Карпов И.А., Тавшавадзе Б.Т., Титов О.В., Михеев П.С., Самигуллин Л.Ф. Цифровое моделирование механики поведения энергопоглощающих элементов дорожных фронтальных ограждений при ударе // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2023. № 3 (74). С. 20–30. EDN FIWFLE.

10. Borovinšek M., Vesenjak M., Ulbin M., Ren Z. Simulation of crash tests for high containment levels of road safety barriers // Engineering Failure Analysis.

2007. Vol. 14. Issue 8. Pp. 1711–1718. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.068

11. Тавшавадзе Б.Т., Локоть А.Г. Перспектива применения парапетных дорожных ограждений. Современные методы их расчета // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2022. № 2 (32). EDN SZMJSM.

12. Кисельков А.Л., Шукюров А.О. Методические рекомендации к расчетной оценке прочности дорожных ограждений на основе компьютерного моделирования процессов // Актуальные вопросы машиноведения. 2020. Т. 9. С. 124–130. EDN WSJTHE.

13. Mohan P., Marzougui D., Meczowski L., Bedewi N. Finite element modeling and validation of a 3-strand cable guardrail system // International Journal of Crashworthiness. 2005. Vol. 10. Issue 3. Pp. 267–273. DOI: 10.1533/ijcr.2005.0345

14. Tran Thanh T., Tso-Liang T. Analysis of truck crashes with W-beam guardrail // Acta Technica Jaurinensis. 2023. Vol. 16. Issue 3. Pp. 107–115. DOI: 10.14513/actatechjaur.00690

15. Gheres M.I., Scurtu I.L. Crash testing and evaluation of W-beam guardrail using finite elements method // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1220. Issue 1. P. 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/1220/1/012049

16. Демьянушко И.В., Карпов И.А., Михеев П.С., Мухаметова А.А. Цифровое моделирование работы мобильного фронтального устройства с прогнозируемым разрушением // XXXII Междунар. инновационная конф. молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения : сб. тр. конф. 2021. С. 48–53. EDN YVKVJB.

17. Ray M.H., Plaxico C.A., Engstrand K. Performance of W-beam splices // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2001. Vol. 1743. Issue 1. Pp. 120–125. DOI: 10.3141/1743-16

18. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов : учебное пособие. М. : Наука, 1986. 560 с.

19. Монахов А.Д., Гуляев М.М., Гладышева Н.Е., Контельцева О.Ю., Автаев В.В., Яковлев Н.О. и др. Применение метода корреляции цифровых изображений для построения диаграмм деформирования в истинных координатах // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2023. Т. 29. № 3. С. 79–88. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-3-79-88. EDN KIDSEJ.

20. Ilg C., Liebold C., Sreenivasa V., Haufe A., Karadogan C., Liewald M. Displacement based simulation and material calibration based on digital image cor-

relation part II — application // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2023. Vol. 1284. Issue 1. P. 012056. DOI: 10.1088/1757-899X/1284/1/012056

21. Ilg C., Witowski K., Koch D., Roehl Suanno P., Haufe A. Constitutive model parameter identification via full-field calibration // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 651. Issue 1. P. 012070. DOI: 10.1088/1757-899X/651/1/012070

22. Васильев Б.Е., Волков М.Е., Бредихина Е.Н., Плещеев И.И. Построение расчетных кривых деформирования в обеспечение наполнения банка данных по конструкционной прочности материалов авиационных двигателей // Materials Physics and Mechanics. 2019. Т. 42. № 5. С. 656–670. DOI: 10.18720/MPM.4252019_19. EDN KHEMRA.

23. Cao J., Li F., Ma W., Li D., Wang K., Ren J. et al. Constitutive equation for describing true stress–strain curves over a large range of strains // Philosophical Magazine Letters. 2020. Vol. 100. Issue 10. Pp. 476–485. DOI: 10.1080/09500839.2020.1803508

24. Chen J.J., Lian C.W., Lin J.P. Validation of constitutive models for experimental stress-strain relationship of high-strength steel sheets under uniaxial tension // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 668. Issue 1. P. 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/668/1/012013

25. Tu S., Ren X., He J., Zhang Z. Stress–strain curves of metallic materials and post-necking strain hard-

ening characterization: A review // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2019. Vol. 43. Issue 1. Pp. 3–19. DOI: 10.1111/ffe.13134

26. Zeng X., Wu W., Zou J., Elchalakani M. Constitutive model for equivalent stress-plastic strain curves including full-range strain hardening behavior of high-strength steel at elevated temperatures // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 22. P. 8075. DOI: 10.3390/ma15228075

27. Hockett J.E., Sherby O.D. Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperature // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1975. Vol. 23. Issue 2. Pp. 87–98. DOI: 10.1016/0022-5096(75)90018-6

28. Meißner P., Winter J., Vietor T. Methodology for neural network-based material card calibration using LS-DYNA MAT_187_SAMP-1 considering failure with GISSMO // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 2. P. 643. DOI: 10.3390/ma15020643

29. Andrade F.X.C., Feucht M., Haufe A., Neukamm F. An incremental stress state dependent damage model for ductile failure prediction // International Journal of Fracture. 2016. Vol. 200. Issue 1–2. Pp. 127–150. DOI: 10.1007/s10704-016-0081-2

30. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Engineering Fracture Mechanics. 1985. Vol. 21. Issue 1. Pp. 31–48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9

Поступила в редакцию 12 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 16 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 11 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ирина Вадимовна Демьянушко** — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 158270, Scopus: 6602540287, ResearcherID: G-5604-2013, ORCID: 0000-0001-6726-1131; demj-ir@mail.ru;

Олег Вадимович Титов — старший преподаватель кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 966854, Scopus: 57214069454, ResearcherID: IWU-9537-2023, ORCID: 0000-0002-0401-8326; gaqui4@yandex.ru;

Павел Сергеевич Михеев — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 1037466, Scopus: 57216146601, ResearcherID: AEE-1037-2022, ORCID: 0000-0003-0760-2138; psmikheev95@gmail.com;

Илья Анатольевич Карпов — кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 971215, Scopus: 57209366542, ResearcherID: AAL-8344-2021, ORCID: 0000-0003-2574-2839; ilya.karpov@outlook.com.

Вклад авторов:

Демьянушко И.В. — научное руководство, редактирование итогового текста.

Титов О.В. — написание текста, идентификация и калибровка параметров для моделей материалов и модели поврежденности, идея поэтапной валидации, проведение стендовых натурных и виртуальных испытаний элементов, построение валидированных цифровых моделей исследованных элементов, разработка цифровых моделей барьерного и фронтального ограждений, проведение виртуальных краш-тестов ограждений, обработка результатов.

Михеев П.С. — участие в проведении стендовых натурных испытаний элементов, разработка цифровой модели автомобиля прикрытия (АП), разработка цифровой модели фронтального ограждения.
Карпов И.А. — редактирование текста, разработка цифровой модели фронтального ограждения, проведение виртуальных краш-тестов, обработка результатов.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Storozhev S.A., Loginov V.Yu., Aristarkhova A.N. The impact of road barriers certification on road safety. *Road Safety*. 2022; 2:52-56. EDN OWTHRQ. (rus.).
2. Andreev K.P., Borychev S.N., Terentyev V.V., Shemyakin A.V. Road barriers: modern solutions for improving traffic safety. *Truck*. 2021; 6:43-48. EDN JXOXJJ. (rus.).
3. Andreev K.P., Terentyev V.V., Shemyakin A.V. The use of energy-absorbing traffic guardrail to improve traffic safety. *Transport. Transport facilities. Ecology*. 2018; 1:5-12. DOI: 10.15593/24111678/2018.01.01. EDN YVGQRA. (rus.).
4. Qiao W., Huang E., Guo H., Liu Y., Ma X. Barriers involved in the safety management systems: a systematic review of literature. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19(15):9512. DOI: 10.3390/ijerph19159512
5. Sungatullina K.A. Conditions and factors affecting road safety at the present stage. *Vestnik NTsBZhD*. 2022; 2(52):126-135. EDN UKXUKI. (rus.).
6. Dergunov S.A., Orekhov S.A., Taranovskaya E.A., Samigullin N.R. Road barriers that dissipate impact energy. *Trends in the Development of Science and Education*. 2017; 26-4:69-71. DOI: 10.18411/lj-31-05-2017-72. EDN ZCNFPT. (rus.).
7. Tavshavadze B.T. *Development and justification of a methodology for calculations, testing and certification of barrier-type road restraint barriers : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2019; 147. EDN CNLKWQ. (rus.).
8. Karpov I.A. *Mechanics of cable road barrier structures during impact interaction with a vehicle and development of mathematical calculation models : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2021; 151. EDN YANQXS. (rus.).
9. Demiyanyushko I.V., Karpov I.A., Tavshavadze B.T., Titov O.V., Mikheev P.S., Samigullin L.F. Virtual digital modelling of the operation energy-absorbing elements of frontal road barriers. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2023; 3(74):20-30. EDN FIWFLE. (rus.).
10. Borovinšek M., Vesenjāk M., Ulbin M., Ren Z. Simulation of crash tests for high containment levels of road safety barriers. *Engineering Failure Analysis*. 2007; 14(8):1711-1718. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.068
11. Tavshavadze B.T., Lokit A.G. Prospect of application of concrete road barrier. Modern methods for their calculation. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2022; 2(32). EDN SZMJSM. (rus.).
12. Kiselkov A.L., Shukurov A.O. Guidelines for calculating the strength of road barriers based on computer simulation of processes. *Topical Issues of Mechanical Engineering*. 2020; 9:124-130. EDN WSJTJE. (rus.).
13. Mohan P., Marzougui D., Meczowski L., Bedewi N. Finite element modeling and validation of a 3-strand cable guardrail system. *International Journal of Crashworthiness*. 2005; 10(3):267-273. DOI: 10.1533/ijcr.2005.0345
14. Tran Thanh T., Tso-Liang T. Analysis of truck crashes with W-beam guardrail. *Acta Technica Jaurinensis*. 2023; 16(3):107-115. DOI: 10.14513/actatech-jaur.00690
15. Gheres M.I., Scurtu I.L. Crash testing and evaluation of W-beam guardrail using finite elements method. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2022; 1220(1):012049. DOI: 10.1088/1757-899X/1220/1/012049
16. Demiyanyushko I.V., Karpov I.A., Mikheev P.S., Mukhametova A.A. Virtual modelling of the crash cushion operation with projected destruction. *XXXII International innovative conference of young scientists and students on problems of mechanical engineering : collection of conference proceedings*. 2021; 48-53. EDN YVKVJB. (rus.).
17. Ray M.H., Plaxico C.A., Engstrand K. Performance of W-beam splices. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2001; 1743(1):120-125. DOI: 10.3141/1743-16
18. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Strength of materials : tutorial*. Moscow, Nauka, 1986; 560. (rus.).
19. Monakhov A.D., Gulyaev M.M., Gladysheva N.E., Kopteltseva O.Yu., Avtaev V.V., Yakovlev N.O. et al. Using the method of correlation of digital images for plotting stress-strain curves in true coordinates. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023; 29(3):79-88. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-3-79-88. EDN KIDSEJ. (rus.).
20. Ilg C., Liebold C., Sreenivasa V., Haufe A., Karadogan C., Liewald M. Displacement based simulation and material calibration based on digital image correlation part II — application. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2023; 1284(1):012056. DOI: 10.1088/1757-899X/1284/1/012056

21. Ilg C., Witowski K., Koch D., Roehl Suanno P., Haufe A. Constitutive model parameter identification via full-field calibration. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 651(1):012070. DOI: 10.1088/1757-899X/651/1/012070
22. Vasilyev B.E., Volkov M.E., Bredihina E.N., Pleshcheev I.I. Construction of stress-strain curves for aviation materials database formation. *Materials Physics and Mechanics*. 2019; 42(5):656-670. DOI: 10.18720/MPM.4252019_19. EDN KHEMRA. (rus.).
23. Cao J., Li F., Ma W., Li D., Wang K., Ren J. et al. Constitutive equation for describing true stress-strain curves over a large range of strains. *Philosophical Magazine Letters*. 2020; 100(10):476-485. DOI: 10.1080/09500839.2020.1803508
24. Chen J.J., Lian C.W., Lin J.P. Validation of constitutive models for experimental stress-strain relationship of high-strength steel sheets under uniaxial tension. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 668(1):012013. DOI: 10.1088/1757-899X/668/1/012013
25. Tu S., Ren X., He J., Zhang Z. Stress-strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization: a review. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2019; 43(1):3-19. DOI: 10.1111/ffe.13134
26. Zeng X., Wu W., Zou J., Elchalakani M. Constitutive Model for Equivalent Stress-Plastic Strain Curves Including Full-Range Strain Hardening Behavior of High-Strength Steel at Elevated Temperatures. *Materials*. 2022; 15(22):8075. DOI: 10.3390/ma15228075.
27. Hockett J.E., Sherby O.D. Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperature. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1975; 23(2):87-98. DOI: 10.1016/0022-5096(75)90018-6
28. Meißner P., Winter J., Vietor T. Methodology for neural network-based material card calibration using LS-DYNA MAT_187_SAMP-1 considering failure with GISSMO. *Materials*. 2022; 15(2):643. DOI: 10.3390/ma15020643
29. Andrade F.X.C., Feucht M., Haufe A., Neukamm F. An incremental stress state dependent damage model for ductile failure prediction. *International Journal of Fracture*. 2016; 200(1-2):127-150. DOI: 10.1007/s10704-016-0081-2
30. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*. 1985; 21(1):31-48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9

Received September 12, 2024.

Adopted in revised form on September 16, 2024.

Approved for publication on October 11, 2024.

B I O N O T E S : **Irina V. Demiyanyushko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 158270, Scopus: 6602540287, ResearcherID: G-5604-2013, ORCID: 0000-0001-6726-1131; demj-ir@mail.ru;

Oleg V. Titov — senior lecturer of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 966854, Scopus: 57214069454, ResearcherID: IWU-9537-2023, ORCID: 0000-0002-0401-8326; gaqui4@yandex.ru;

Pavel S. Mikheev — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 1037466, Scopus: 57216146601, ResearcherID: AEE-1037-2022, ORCID: 0000-0003-0760-2138; psmikheev95@gmail.com;

Ilya A. Karpov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 971215, Scopus: 57209366542, ResearcherID: AAL-8344-2021, ORCID: 0000-0003-2574-2839; ilya.karpov@outlook.com.

Contribution of the authors:

Irina V. Demiyanyushko — scientific guidance, editing the final version of the text.

Oleg V. Titov — writing the text, identification and calibration parameters of materials models and damage model, idea of step-by-step validation, carrying out full-scale and virtual bench tests of elements, development of validated digital models of the studied elements, development of digital models of guardrail barrier and crush cushion, carrying out virtual crash tests of barriers, processing of results.

Pavel S. Mikheev — participation in carrying out full-scale bench tests of elements, development of digital model of cover vehicle (CV), development of digital model of crush cushion.

Ilya A. Karpov — editing of the text, development of digital model of crush cushion, carrying out virtual crash tests of barriers, processing of results.

The authors declare no conflict of interest.

Упрощенный вариант методики расчета многослойных составных стержней по теории А.Р. Ржаницына

Владимир Владимирович Филатов, Тхи Линь Куен Хоанг

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Предложена модификация теории составных стержней (ТСС) А.Р. Ржаницына. Она является одним из наиболее распространенных методов расчета многослойных строительных конструкций. Напряженно-деформированное состояние многослойных составных балок устанавливается функциями прогибов, изгибающих моментов и усилий в непрерывно распределенных межслойных связях, препятствующих взаимному сдвигу слоев. Усилия в связях сдвига определяются из решения системы n обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, где n — количество межслойных швов. Предложенная методика строится на гипотезе функциональной зависимости между сдвигающими усилиями в швах балки. Данное предположение позволяет свести задачу определения функций сдвигающих усилий к решению одного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка. Таким образом, число совместно решаемых дифференциальных уравнений, описывающих задачу, сокращается с $n + 2$ до трех при любом количестве слоев.

Материалы и методы. Для решения системы дифференциальных уравнений как в постановке Ржаницына, так и в упрощенной постановке, привлекаются разностные уравнения метода последовательных аппроксимаций.

Результаты. Получены результаты расчета шестислойной балки с использованием трех моделей: в постановке А.Р. Ржаницына, с привлечением упрощенной методики Р.Ф. Габбасова и В.В. Филатова, в постановке авторов статьи. Выполнено сравнение результатов расчета по упрощенным методикам с ТСС. Исследовано влияние различных параметров (геометрических и механических характеристик слоев, жесткости швов на сдвиг) на работу упрощенных моделей. Построены эпюры максимальных продольных и касательных напряжений для разных вариантов компоновки поперечного сечения составной балки.

Выводы. Представлены рекомендации и описаны ограничения по возможностям применения предлагаемой методики расчета многослойных балок на действие статических нагрузок. Методика может быть рекомендована к использованию в практике проектных организаций и в учебном процессе профильных учебных заведений высшего образования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теория А.Р. Ржаницына, теория составных стержней, коэффициент жесткости шва на сдвиг, многослойные балки, метод последовательных аппроксимаций

Благодарности. Исследование профинансировано Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2023-0004.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Филатов В.В., Хоанг Т.Л.К. Упрощенный вариант методики расчета многослойных составных стержней по теории А.Р. Ржаницына // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1920–1936. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1920-1936

Автор, ответственный за переписку: Владимир Владимирович Филатов, stroitmeh@mgsu.ru.

A simplified version of the method of calculation of multilayer composite rods according to the theory of A.R. Rzhnitsyn

Vladimir V. Filatov, Thi Linh Quyen Hoang

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

ABSTRACT

Introduction. A modification of the theory of composite rods (TCR) by A.R. Rzhnitsyn is proposed. It is one of the most common methods for calculating multilayer building structures. The stress-strain state of multilayer composite beams is determined by the functions of deflections, bending moments and forces in continuously distributed interlayer connections that prevent mutual shear of the layers. The forces in the shear connections are determined by solving a system of n ordinary differential equations of the second order, where n is the number of interlayer seams. The proposed method is based on the hypothesis of a functional relationship between the shear forces in the beam seams. This assumption allows us to reduce the problem of determining the functions of shear forces to solving one ordinary differential equation of the second order. Thus, the number of simultaneously solved differential equations describing the problem is reduced from $n + 2$ to three for any number of layers.

Materials and methods. To solve the system of differential equations, both in Rzhanitsyn's formulation and in a simplified formulation, difference equations of the method of successive approximations (MSA) are used.

Results. The results of calculation of a six-layer beam using three models are obtained: in the formulation of A.R. Rzhanitsyn, with the involvement of the simplified method of R.F. Gabbasov and V.V. Filatov, in the formulation of the authors of the paper. The results of calculation by simplified methods with TCR are compared. The influence of various parameters (geometric and mechanical characteristics of layers, shear stiffness of seams) on the operation of simplified models is studied. Diagrams of maximum longitudinal and tangential stresses are constructed for different options for the layout of the cross section of a composite beam

Conclusions. Recommendations are presented and limitations on the possibilities of using the proposed calculation method for multilayer beams under static loads are described. The method can be recommended for use in the practice of design organizations and in the educational process of specialized higher education institutions.

KEYWORDS: theory of A.R. Rzhanitsyn, theory of composite rods, joint shear stiffness coefficient, multilayer beams, method of successive approximations

Acknowledgments. The study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSWG-2023-0004.

FOR CITATION: Filatov V.V., Hoang T.L.Q. A simplified version of the method of calculation of multilayer composite rods according to the theory of A.R. Rzhanitsyn. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1920-1936. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1920-1936 (rus.).

Corresponding author: Vladimir V. Filatov, stroitmeh@mgso.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Теория составных стержней и пластин, предложенная Алексеем Руфовичем Ржаницыным [1] в середине XX в., и сегодня находит широкое применение при проектировании строительных конструкций.

Начнем наш краткий обзор с трудов, ставших настольными книгами многих поколений инженеров-конструкторов и посвященных использованию теории составных стержней (ТСС) к расчету многэтажных каркасных зданий и сооружений [2–4]. Моделирование работы диафрагм жесткости в составе каркаса здания с учетом ослабления диафрагм проемами реализовано в исследованиях [5–7]. Рассмотрен расчет металлических перфорированных балок с вырезами различной формы [8–11]. Предложена модифицированная зависимость А.Р. Ржаницына, позволяющая с инженерной точностью определять напряжения в крайних волокнах перфорированных балок [8]. На основе сравнения с экспериментальными данными и численным решением по МКЭ продемонстрирована эффективность полученного на базе ТСС аналитического решения для определения перемещений шарнирно опертых перфорированных балок с разной формой вырезов при разных видах нагружения [11]. Изучена совместная работа сквозных моностабильных и бистабильных балок с железобетонной плитой проезжей части моста [12, 13]. Похожая задача по расчету пролетной конструкции моста из дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков и включенной в совместную работу с ними железобетонной плиты проезжей части приведена в публикации [14]. Демонстрирована методика расчета четырехслойных мостовых прогонов, состоящих из окантованных бревен [13, 15]. Предложено применение ТСС к расчету многослойной клееной деревоплиты [16]. Вопросы проектирования плитно-ребристых панелей с обшивкой из фанеры рассмотрены в статье [17]. Определению сдвиговой жесткости соединительных стальных элементов при проек-

тировании многослойных деревянных балок с привлечением теории А.Р. Ржаницына посвящены исследования [18, 19].

Применяется теория составных стержней и при расчете железобетонных конструкций. Это могут быть конструкции со слоями, механические характеристики которых отличаются друг от друга [20]; конструкции после введения дополнительного слоя усиления [21]; конструкции, слоистость которых обусловлена образованием трещин [22–24]; конструкции, при моделировании которых учитывается многослойность и трещинообразование [25, 26]. Рассмотрено использование модели составного стержня для расчета монолитных деревянных балок с учетом влияния образования трещин на напряженно-деформированное состояние [27]. Показан расчет двухслойных составных балок, контактирующих с упругим основанием [28–30]. Предложена численная методика расчета составных балок и пластин [30, 31].

Среди зарубежных ученых к расчету многослойных балок одним из первых обратился Ньюмарк. В работе [32] приведен расчет двухслойной балки в линейной постановке. Построению различных аналитических моделей двухслойных стержней посвящены публикации [33–36]. Выполнено обобщение модели Ньюмарка на работу трехслойных шарнирно опертых деревянных балок с одинаковыми слоями [37]. Исследован трехслойный стержень, образованный слоями разного поперечного сечения, изгибаемый распределенной и сосредоточенной нагрузками [38]. Предложены аналитические и численные модели расчета многослойных балок [39–48]. Проведен расчет балок в геометрически нелинейной постановке [49, 50]. Приведены результаты исследований модульных сэндвич панелей с оболочкой из полиэтилена высокой плотности [51]. Выявлена зависимость сдвиговой прочности слоев от способа штамповки изделия. Статья [52] посвящена расчету изгибаемых трехслойных сборных железобетонных

панелей при использовании различных связей между слоями. Произведен расчет панелей из углеродного волокна и стекловолокна с ребрами жесткости Z и L профиля на устойчивость [53]. Изучена работа деревянных панелей, в которых крепление листов обшивки к деревянному каркасу выполнено при помощи шурупов [54]. Авторами [55] предложен способ соединения слоев в трехслойной композитной панели, позволяющий значительно повысить сопротивление взаимному сдвигу внутреннего и внешних слоев.

В подавляющем большинстве исследований рассматривается модель двух- или трехслойного стержня. При большем количестве слоев решение задачи усложняется. В рамках ТСС неизвестными являются функции усилий, возникающих в связях, непрерывно распределенных по длине швов составной конструкции и препятствующих взаимному сдвигу слоев по плоскости разделяющего эти слои шва при деформировании составного стержня. Для краткости будем называть их сдвигающими усилиями. Они определяются из решения системы n дифференциальных уравнений, где n — количество швов.

Далее отметим работы, в которых предложены допущения, упрощающие расчет именно многослойных конструкций. Многослойная деревоплита, опертая по двум противоположным сторонам, рассматривается как шарнирно опертая составная балка [16]. В силу симметрии поперечного сечения сдвигающие усилия в швах, равноудаленных от продольной оси балки, принимаются равными по величине. В качестве примера рассмотрена четырехслойная балка, имеющая три продольных шва. С учетом введенных допущений расчет балки сведен к решению двух дифференциальных уравнений относительно функций сдвигающих усилий в среднем и крайнем швах.

Работы [13, 15] посвящены расчету пролетных мостовых конструкций. В качестве основных несущих конструкций проанализированы составные балки из нескольких рядов окантованных бревен, объединенных нагельными узлами. Соединяющие бревна узлы расположены вдоль плоскости шва с определенным шагом. Это позволило отказаться от принятой в ТСС гипотезы о равномерно и непрерывно распределенных вдоль оси шва связях, препятствующих взаимному сдвигу слоев. При таком подходе усилия, возникающие в дискретных связях сдвига, можно считать сосредоточенными и определить из решения системы линейных алгебраических уравнений метода сил. Количество неизвестных, определяющих размерность системы уравнений, будет равно суммарному числу соединяющих узлов по всем швам составной балки.

В труде [31] предложено допущение, упрощающее расчет многослойных конструкций в рамках ТСС. Предполагается, что все слои одинаковые как по геометрическим, так и по механическим параметрам. Для таких случаев авторы предлагают принять гипотезу равенства сдвигающих усилий во всех

швах составной балки, что позволяет свести задачу определения функции распределения этих усилий по длине шва к решению единственного дифференциального уравнения.

В настоящей работе в развитие исследования [31] вводится гипотеза функциональной зависимости между сдвигающими усилиями в разных швах составной конструкции. Это, с одной стороны, дает возможность отказаться от идеи равенства сдвигающих усилий во всех швах составного стержня, с другой — как и в публикации [31], позволяет свести задачу определения этих усилий при любом количестве слоев (швов) от решения системы n дифференциальных уравнений к решению одного дифференциального уравнения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В труде [31] предложена численная методика расчета многослойных составных балок и плит, базирующаяся на теории Ржаницына. Эта методика достаточно просто позволяет получать решения для многослойных балок при любом количестве слоев, произвольных краевых условий, при действии произвольных статических нагрузок. Для составных балок система разрешающих дифференциальных уравнений будет состоять из $n + 2$ обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. Приведем их ниже в безразмерном виде:

$$\frac{d^2 m}{d\Psi^2} = -p; \quad (1)$$

$$\frac{d^2 w}{d\Psi^2} = -\alpha(m - \omega); \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d^2 t_1}{d\Psi^2} &= -\xi_1 \left[(m - \omega) \alpha \bar{c}_1 - g_2 t_1 + g_2 t_2 \right]; \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{d^2 t_i}{d\Psi^2} &= -\xi_i \left[(m - \omega) \alpha \bar{c}_i + g_i t_i - (g_i + g_{i+1}) t_i + g_{i+1} t_{i+1} \right]; \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{d^2 t_n}{d\Psi^2} &= -\xi_n \left[(m - \omega) \alpha \bar{c}_n + g_n t_{n-1} - (g_n + g_{n+1}) t_n \right]; \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где

$$\Psi = \frac{x}{l}; \quad t_i = T_i \frac{l^2}{E_i I_i}; \quad m = M \frac{l}{E_i I_i};$$

$$w = \frac{y}{l}; \quad \alpha = \frac{EI}{\sum EI}; \quad \bar{c}_i = \frac{c_i}{l};$$

$$\omega = \sum_{j=1}^n t_j \bar{c}_j; \Sigma EI = \sum_{j=1}^{n+1} E_j I_j; p = \frac{ql^3}{EI};$$

M — суммарный изгибающий момент в сечении составного стержня от действия внешней нагрузки без учета усилий, передающихся от поперечных связей и связей сдвига; T_i — суммарное сдвигающее усилие в i -м шве, накапливаемое по длине стержня от его начала до рассматриваемого сечения; $E_i I_i$ — изгибная жесткость i -й ветви; $E_i F_i$ — жесткость i -й ветви при продольной деформации; l — длина балки; y — прогибы составного стержня, благодаря абсолютной жесткости поперечных связей одни и те же для каждой ветви; x — координата, отсчитываемая вдоль оси балки; ξ_i — коэффициент жесткости i -го шва; c_i — расстояния между центрами тяжести сечений двух соседних стержней, разделенных i -м швом; q — интенсивность распределенной по произвольному закону нагрузки.

Как указывалось выше, в той же работе [31] для приближенного расчета балок, состоящих из одинаковых слоев прямоугольного сечения и при равных коэффициентах жесткости на сдвиг всех швов, принято допущение о равенстве усилий во всех швах. Авторы указывают, что при числе слоев не более четырех приближенное решение можно принять за окончательное, а при числе слоев более четырех — за первоначальное. Но при этом значительно упрощается вычислительный процесс.

Рассмотрим балку, состоящую из четного числа прямоугольных слоев так, что один из швов совпадает со срединной плоскостью составного сечения общей высотой H (рис. 1). Обозначение швов и слоев примем как в публикации [1], i -й шов разделяет i и $i + 1$ слои. Будем полагать, что между сдвигающими усилиями в швах балки существует функциональная зависимость и что закон изменения сдвигающих усилий в швах балки описывается квадратной параболой:

$$t(z) = az^2 + bz + c, \quad (4)$$

где z — координата, отсчитываемая по высоте поперечного сечения от верхней грани балки. Постоян-

ные a, b, c определим из условий $t(0) = 0$; $t\left(\frac{H}{2}\right) = t$; $t(H) = 0$. Окончательно получим выражение для установления сдвигающего усилия в i -м шве:

$$t(z_i) = 4t \left(\frac{z_i}{H} - \frac{z_i^2}{H^2} \right). \quad (5)$$

Преобразуем систему разрешающих дифференциальных уравнений (1)–(3) с учетом выражения (5). Уравнение (1) останется без изменений. В уравнении (2) необходимо произвести замену ω на $\bar{\omega}$. Вместо n в уравнениях типа (3) запишем:

$$\frac{d^2 t}{d\Phi^2} = - \left[\beta (m - \bar{\omega}) + t (\gamma_{i-1} + \gamma_{i+1}) \right]; \quad (6)$$

где

$$\bar{\omega} = 4t \sum_{j=1}^n \left(\frac{z_j}{H} - \frac{z_j^2}{H^2} \right) \frac{c_j}{l}; \beta = \xi_i c_i \frac{l^3}{\Sigma EI};$$

$$\gamma_{i-1} = \xi_i \frac{l^2}{E_i F_i} \left[4 \left(\frac{z_{i-1}}{H} - \frac{z_{i-1}^2}{H^2} \right) - 1 \right];$$

$$\gamma_{i+1} = \xi_i \frac{l^2}{E_{i+1} F_{i+1}} \left[4 \left(\frac{z_{i+1}}{H} - \frac{z_{i+1}^2}{H^2} \right) - 1 \right].$$

После определения по выражению (6) функции сдвигающих усилий в среднем слое усилия t в других слоях вычисляются с использованием соотношения (5). Таким образом, задача сводится к решению трех дифференциальных уравнений при любом количестве слоев, составляющих многослойную балку.

Для решения полученной системы дифференциальных уравнений (1), (2) и (6) воспользуемся разностной формой метода последовательных аппроксимаций (МПА). Методика применения МПА к расчету составных балок подробно изложена в работе [31]. Приведем разностное уравнение, аппроксимирующее выражение (1) в регулярной точке, с учетом возможных конечных разрывов иско-

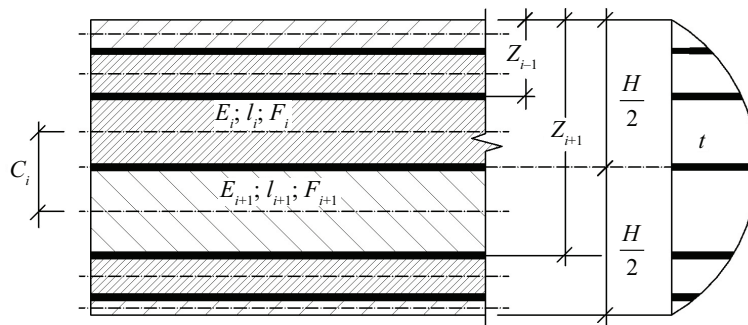


Рис. 1. Поперечное сечение составного стержня и график функции интенсивности сдвигающих усилий в зависимости от положения шва в составном сечении

Fig. 1. Cross section of a composite bar and graph of the shear force intensity function as a function of the joint position in the composite section

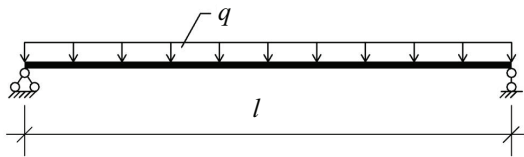


Рис. 2. Расчетная схема шестислойной балки
Fig. 2. Calculation diagram of a six-layer beam

функции, ее первой производной и правой части исходного дифференциального уравнения:

$$\begin{aligned} m_{k-1}^{\Pi} - 2m_k^{\Pi} + m_{k+1}^{\Pi} + \Delta m_k + \tau \Delta m_k' = \\ = \frac{-\tau^2}{12} (p_{k-1}^{\Pi} + 10p_k^{\Pi} + p_{k+1}^{\Pi}) + \frac{5}{12} \tau^2 \Delta p_k + \\ + \frac{\tau^3}{12} \Delta p_k', \end{aligned} \tag{7}$$

где $\Delta m_k = m_k^{\Pi} - m_{k-1}^{\Pi}$; $m_k^{\Pi} = m_{k-0}$; $m_k^{\Pi} = m_{k+0}$, остальные значения такого типа имеют аналогичный смысл $\Delta p_k' = p_k^{\Pi} - p_{k-1}^{\Pi}$; $p_k^{\Pi} = p_{k-0}'$; $p_k^{\Pi} = p_{k+0}'$; $p_k' = dp/d\Psi$; k — номер точки расчетной сетки, наносимой на ось балки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера, иллюстрирующего предложенную методику, рассмотрим расчет шестислойной составной шарнирно опертой балки, нагруженной распределенной нагрузкой (рис. 2). Интенсивность распределенной нагрузки $q = 2$ кН/м, длина балки $l = 6$ м, ширина поперечного сечения $b = 0,15$ м, высо-

та поперечного сечения $H = 0,3$ м. Ниже описаны три варианта компоновки поперечного сечения составной балки. В первом случае балка собрана из одинаковых слоев со следующими параметрами: модуль упругости слоев $E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = E_5 = E_6 = 12\,600$ МПа, высота слоев $h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = h_5 = h_6 = 0,05$ м. Во втором варианте высоты слоев остаются одинаковыми $h = 0,05$ м, а модули упругости крайних слоев по значению в два раза превышают соответствующие значения внутренних слоев $E_1 = 15\,000$ МПа, $E_2 = E_3 = E_4 = E_5 = 7500$ МПа, $E_6 = 15\,000$ МПа. В третьем варианте при одинаковом модуле упругости слоев $E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = E_5 = E_6 = 12\,600$ МПа отличаются их высоты $h_1 = 0,1$ м; $h_2 = h_3 = h_4 = h_5 = 0,025$ м, $h_6 = 0,1$ м. Во всех случаях сдвиговые характеристики швов приняты одинаковыми и характеризуются коэффициентом жесткости шва. Для всех вариантов результаты получены при нескольких значениях коэффициента жесткости шва:

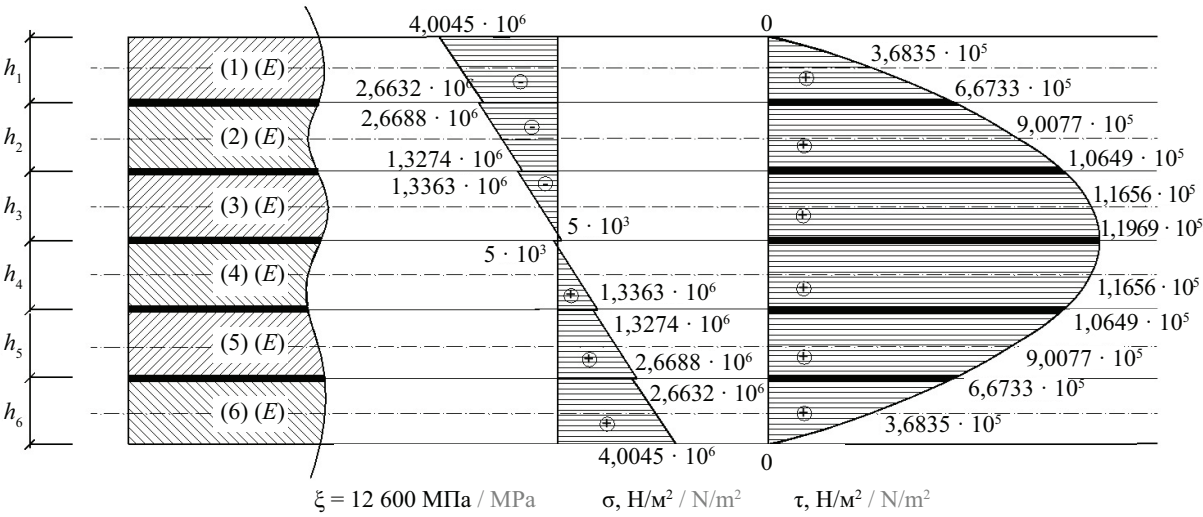
$$\begin{aligned} \xi = 12 \text{ кПа, } 12 \text{ МПа; } \xi = 126 \text{ МПа; } \\ \xi = 1260 \text{ МПа; } \xi = 12\,600 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

В табл. 1–3 показаны полученные значения сдвигающих усилий в швах составной балки и максимальных прогибов для трех вариантов соответственно. В трех правых столбцах таблиц приведены численные решения по: упрощенной методике [31] (сдвигающие усилия во всех швах равны между собой); упрощенной методике, представленной в данной работе; теории составных стержней А.Р. Ржаницына (решение получено численно с привлечением уравнений МПа, как и для упрощенных теорий).

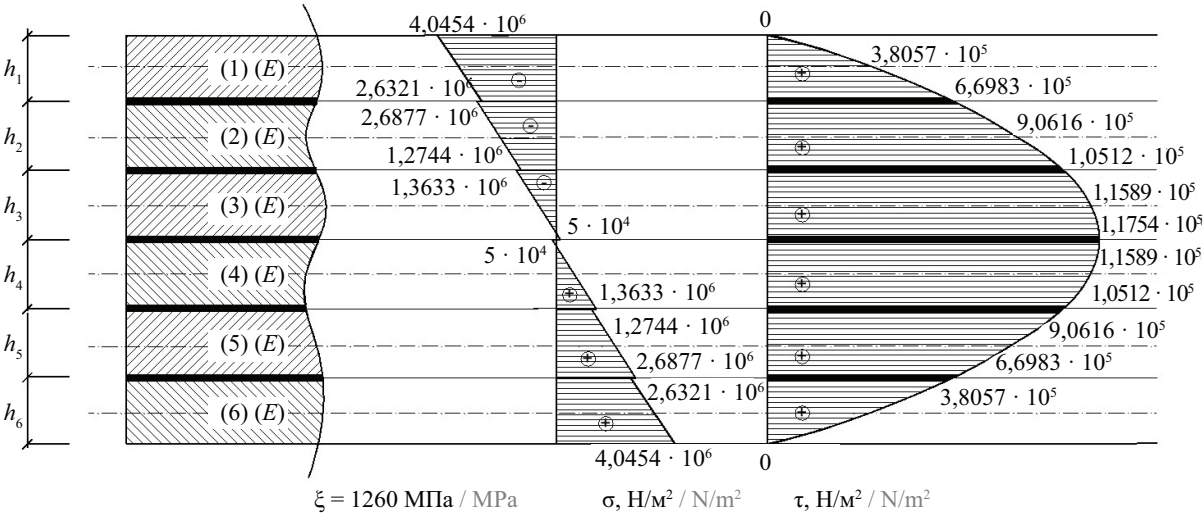
Табл. 1. Значения сдвигающих усилий и максимального прогиба в середине балки, вариант 1

Table 1. Values of shear forces and maximum deflection in the middle of the beam, variant 1

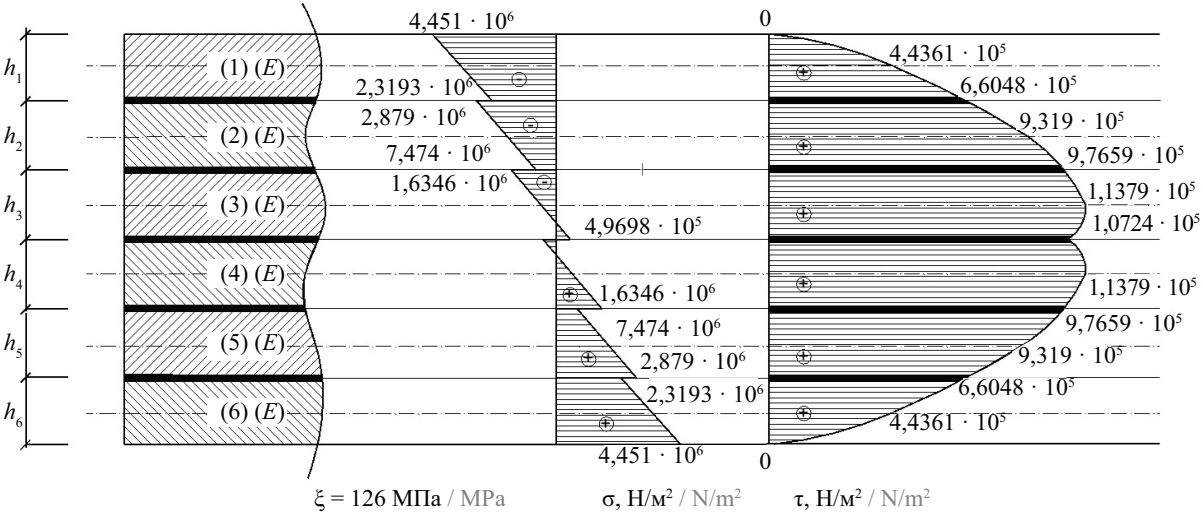
Коэффициент жесткости швов, МПа Joint stiffness coefficient, MPa	Величины Values	Упрощенная методика [31] Simplified methodology [31]	Упрощенная методика Simplified methodology	В постановке А.Р. Ржаницына In the formulation of A.R. Rzhantsyn
$\xi = 12\,600$	T_1 , кН / kN	35,99 (30,5 %)	24,99 (0,04 %)	25
	T_2 , кН / kN	35,99 (10 %)	39,99 (0 %)	39,99
	T_3 , кН / kN	35,99 (19,98 %)	44,99 0,02 %)	44,98
	$y_{\max}$, мм / mm	0,0571 (99,28 %)	8 (0 %)	8
$\xi = 1260$	T_1 , кН / kN	35,94 (30,3 %)	24,94 (0,3 %)	25,04
	T_2 , кН / kN	35,94 (9,9 %)	39,91 (0,05 %)	39,89
	T_3 , кН / kN	35,94 (19,81 %)	44,9 (0,1 %)	44,82
	$y_{\max}$, мм / mm	0,057 (99,32 %)	8,6 (1,1 %)	8,5
$\xi = 126$	T_1 , кН / kN	35,4 (28,3 %)	24,47 (3,5 %)	25,38
	T_2 , кН / kN	35,4 (9,1 %)	39,16 (0,4 %)	38,98
	T_3 , кН / kN	35,4 (18,15 %)	44 (1,7 %)	43,25
	$y_{\max}$, мм / mm	5,6 (58,5 %)	14,7 (8,1 %)	13,5
$\xi = 12$	T_1 , кН / kN	30,12 (16,4 %)	20,06 (20,33 %)	25,18
	T_2 , кН / kN	30,12 (4,7 %)	32,09 (1,4 %)	31,61
	T_3 , кН / kN	30,12 (8,3 %)	36,11 (9 %)	32,86
	$y_{\max}$, мм / mm	50 (8,3 %)	66,4 (14,6 %)	56,7



a



b



c

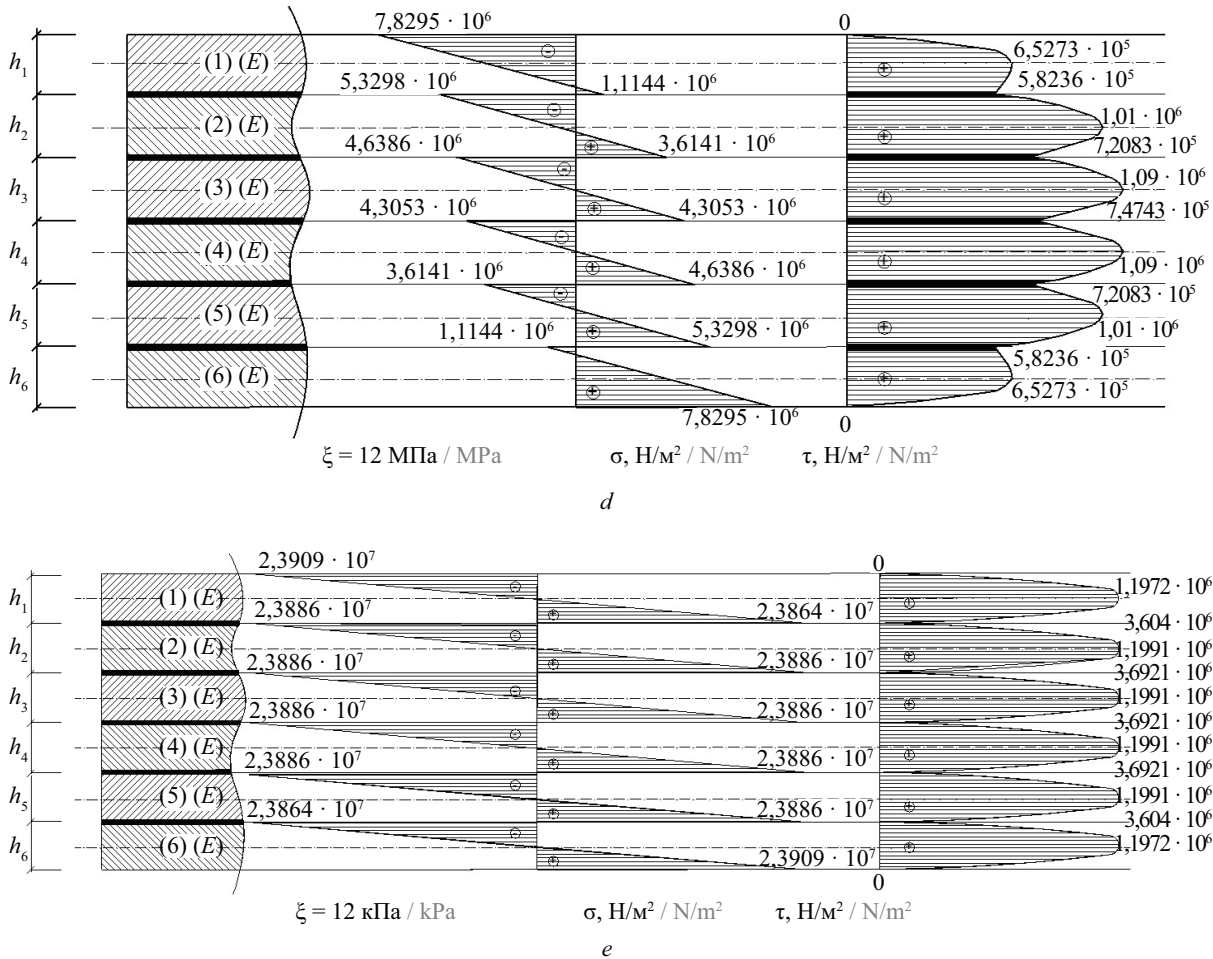


Рис. 3. Эпюры максимальных продольных и касательных напряжений: а — $\xi = 12\,600 \text{ МПа}$; б — $\xi = 1260 \text{ МПа}$; в — $\xi = 126 \text{ МПа}$; д — $\xi = 12 \text{ МПа}$; е — $\xi = 12 \text{ кПа}$

Fig. 3. Epures of maximum longitudinal and tangential stresses: а — $\xi = 12,600 \text{ MPa}$; б — $\xi = 1,260 \text{ MPa}$; в — $\xi = 126 \text{ MPa}$; д — $\xi = 12 \text{ MPa}$; е — $\xi = 12 \text{ kPa}$

Табл. 2. Значения сдвигающих усилий и максимального прогиба в середине балки, вариант 2

Table 2. Values of shear forces and maximum deflection in the middle of the beam, variant 2

Коэффициент жесткости швов, МПа Joint stiffness coefficient, MPa	Величины Values	Упрощенная методика [31] Simplified methodology [31]	Упрощенная методика Simplified methodology	В постановке А.Р. Ржаницына In the formulation of A.R. Rzhanytsyn
$\xi = 12\,600$	$T_1, \text{ кН} / \text{ kN}$	36 (18,47 %)	25 (15 %)	29,35
	$T_2, \text{ кН} / \text{ kN}$	36 (5,6 %)	40 (4,6 %)	38,15
	$T_3, \text{ кН} / \text{ kN}$	36 (12 %)	45 (8,6 %)	41,1
	$y_{\text{max}}, \text{ мм} / \text{ mm}$	0,057 (99 %)	10,1 (22 %)	7,9
$\xi = 1260$	$T_1, \text{ кН} / \text{ kN}$	35,95 (18,4 %)	24,94 (14,9 %)	29,34
	$T_2, \text{ кН} / \text{ kN}$	35,95 (5,6 %)	39,9 (4,5 %)	38,09
	$T_3, \text{ кН} / \text{ kN}$	35,95 (12,3 %)	44,89 (8,6 %)	41
	$y_{\text{max}}, \text{ мм} / \text{ mm}$	0,057 (99,3 %)	11 (23,6 %)	8,4
$\xi = 126$	$T_1, \text{ кН} / \text{ kN}$	35,52 (17,6 %)	24,38 (16,8 %)	29,3
	$T_2, \text{ кН} / \text{ kN}$	35,52 (5,3 %)	39 (3,8 %)	37,51
	$T_3, \text{ кН} / \text{ kN}$	35,52 (11,5 %)	43,88 (8,5 %)	40,15
	$y_{\text{max}}, \text{ мм} / \text{ mm}$	5,6 (58 %)	20,2 (34,1 %)	13,3

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

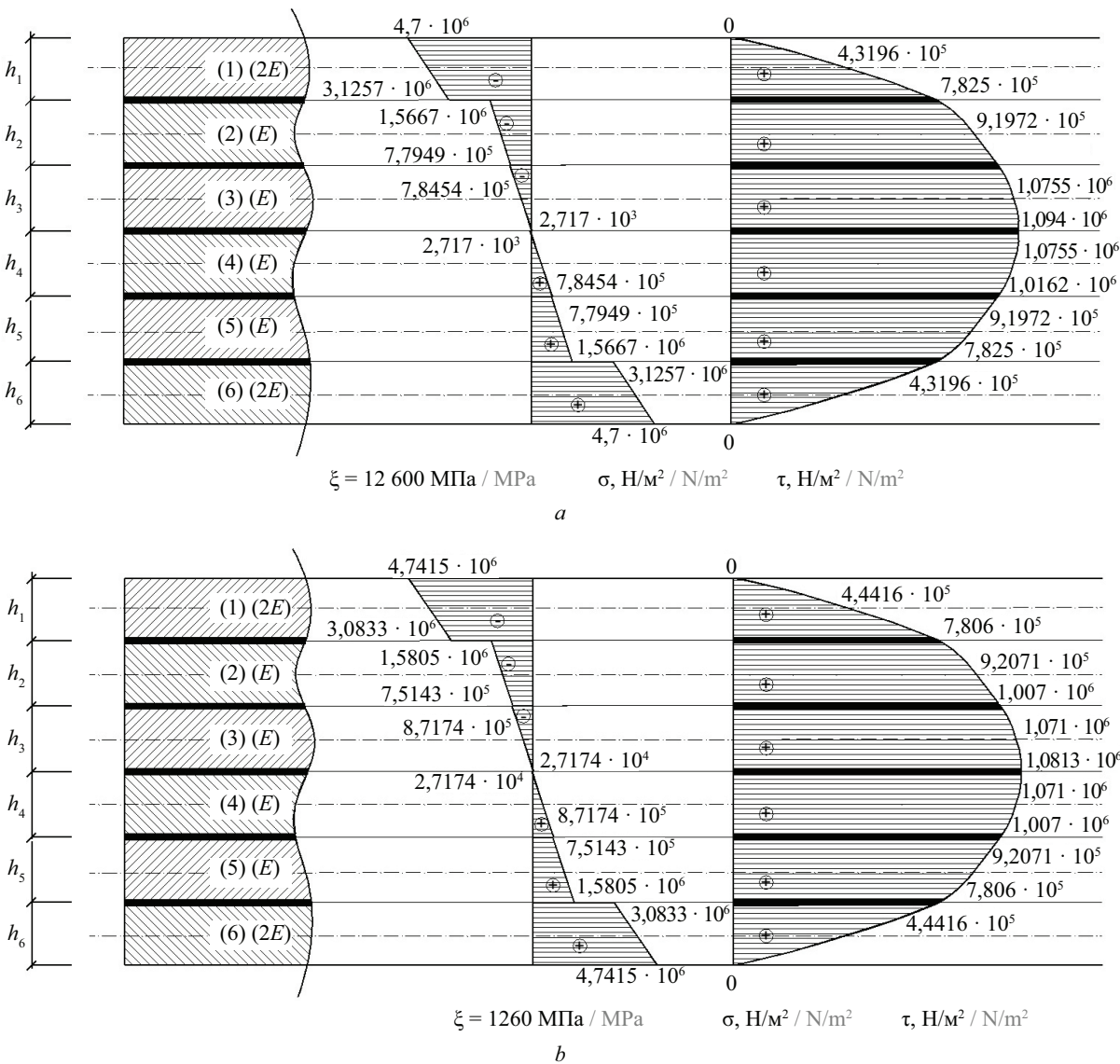
Коэффициент жесткости швов, МПа Joint stiffness coefficient, MPa	Величины Values	Упрощенная методика [31] Simplified methodology [31]	Упрощенная методика Simplified methodology	В постановке А.Р. Ржаницына In the formulation of A.R. Rzhnitsyn
$\xi = 12$	T_1 , кН / kN	31,22 (11,53 %)	19,3 (30 %)	27,62
	T_2 , кН / kN	31,22 (3 %)	30,88 (4,1 %)	32,21
	T_3 , кН / kN	31,22 (6,1 %)	34,74 (4,2 %)	33,28
	y_{max} , мм / mm	52 (10,8 %)	94,4 (38 %)	58,3

На рис. 3 представлены эпюры нормальных и касательных напряжений для первого варианта компоновки сечения в зависимости от значения коэффициента жесткости шва. Аналогичная информация для второго варианта показана на рис. 4, для третьего — на рис. 5. На рис. 3, *e*; 4, *e*; 5, *e* приведены эпюры напряжений для соответствующих вариантов

компоновки при весьма малом значении коэффициента жесткости шва $\xi = 12$ кПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных результатов подтверждает предположение авторов упрощенного подхода расчета многослойных балок [31] о возможности его



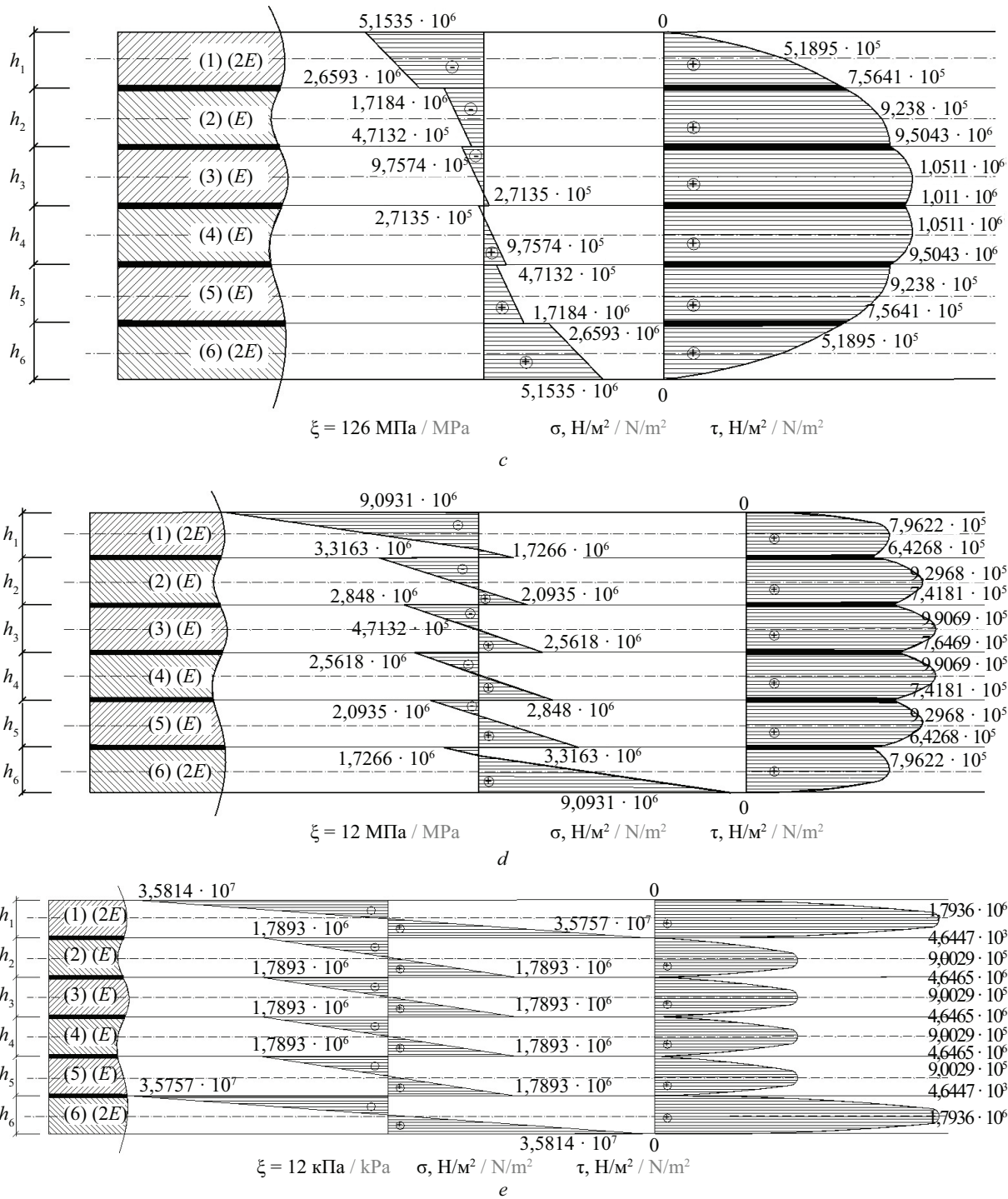


Рис. 4. Эпюры максимальных продольных и касательных напряжений: а — $\xi = 12\,600\text{ МПа}$; б — $\xi = 1260\text{ МПа}$; в — $\xi = 126\text{ МПа}$; д — $\xi = 12\text{ МПа}$; е — $\xi = 12\text{ кПа}$

Fig. 4. Epures of maximum longitudinal and tangential stresses: а — $\xi = 12,600\text{ МПа}$; б — $\xi = 1,260\text{ МПа}$; в — $\xi = 126\text{ МПа}$; д — $\xi = 12\text{ МПа}$; е — $\xi = 12\text{ кПа}$

применения для конструкций с небольшим количеством слоев (не более четырех). Для шестислойных балок значения сдвигающих усилий в крайних швах, вычисленных по методике [31] при достаточно высоких значениях коэффициента жесткости шва на сдвиг, на 30 % превышают значения соответствующих усилий по теории А.Р. Ржаницына, а значе-

ния усилий в швах ближе к центральной части сечения — меньше на 20 %. При этом максимальные значения сдвигающих усилий по ТСС возникают именно в центральном шве. Общая жесткость составной балки оказалась завышенной. Максимальный прогиб по сравнению с ТСС меньше на два порядка. При весьма слабом сопротивлении межслойных свя-

Табл. 3. Значения сдвигающих усилий и максимального прогиба в середине балки, вариант 3

Table 3. Shear forces and maximum deflection in the centre of the beam, variant 3

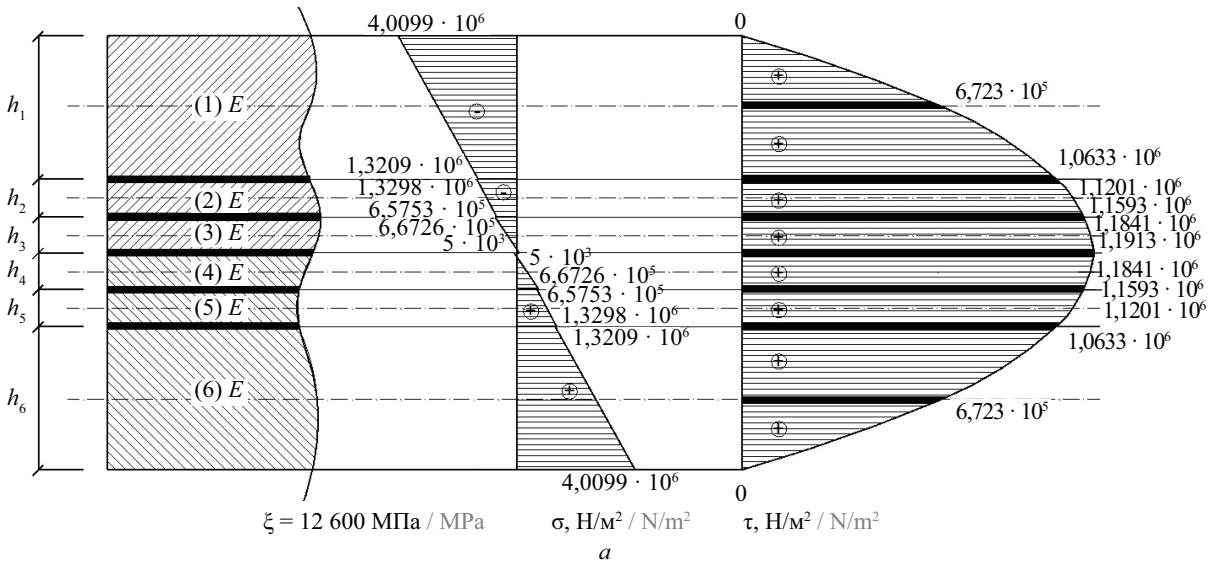
Коэффициент жесткости швов, МПа Joint stiffness coefficient, MPa	Величины Values	Упрощенная методика [31] Simplified methodology [31]	Упрощенная методика Simplified methodology	В постановке А.Р. Ржаницына In the formulation of A.R. Rzhantsyn
$\xi = 12\,600$	T_1 , кН / kN	44,94 (11 %)	39,95 (0,07 %)	39,98
	T_2 , кН / kN	44,94 (2,7 %)	43,7 (0 %)	43,7
	T_3 , кН / kN	44,94 (0 %)	44,94 (0 %)	44,94
	$y_{\max}$, мм / mm	0,14 (98 %)	8,1 (1 %)	8
$\xi = 1260$	T_1 , кН / kN	44,48 (10,4 %)	39,54 (0,6 %)	39,81
	T_2 , кН / kN	44,48 (2,6 %)	43,24 (0,18 %)	43,32
	T_3 , кН / kN	44,48 (0,02 %)	44,48 (0,02 %)	44,49
	$y_{\max}$, мм / mm	1,4 (83,9 %)	9,2 (5 %)	8,7
$\xi = 126$	T_1 , кН / kN	40 (4,7 %)	35,55 (6,7 %)	38,12
	T_2 , кН / kN	40 (1 %)	38,89 (1,7 %)	39,57
	T_3 , кН / kN	40 (0,07 %)	40 (0,07 %)	40,03
	$y_{\max}$, мм / mm	12,7 (16,9 %)	19,7 22,3 %)	15,3
$\xi = 12$	T_1 , кН / kN	18,58 (28,6 %)	16,51 (36,5 %)	26,04
	T_2 , кН / kN	18,58 (5,7 %)	18,06 (8,4 %)	19,72
	T_3 , кН / kN	18,58 (2,3 %)	18,58 (2,3 %)	18,15
	$y_{\max}$, мм / mm	61,9 (17,9 %)	65,1 (21,9 %)	50,8

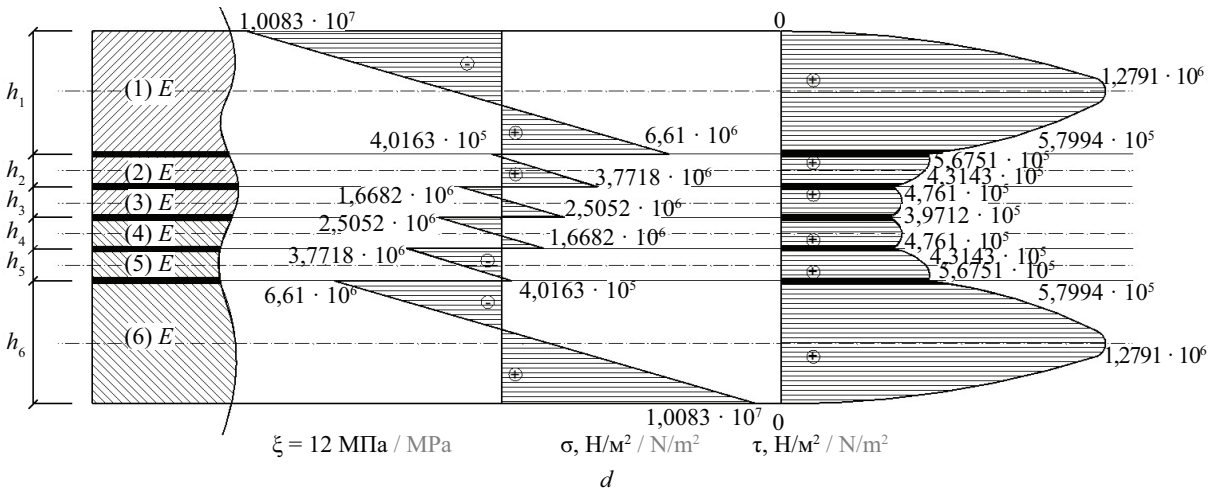
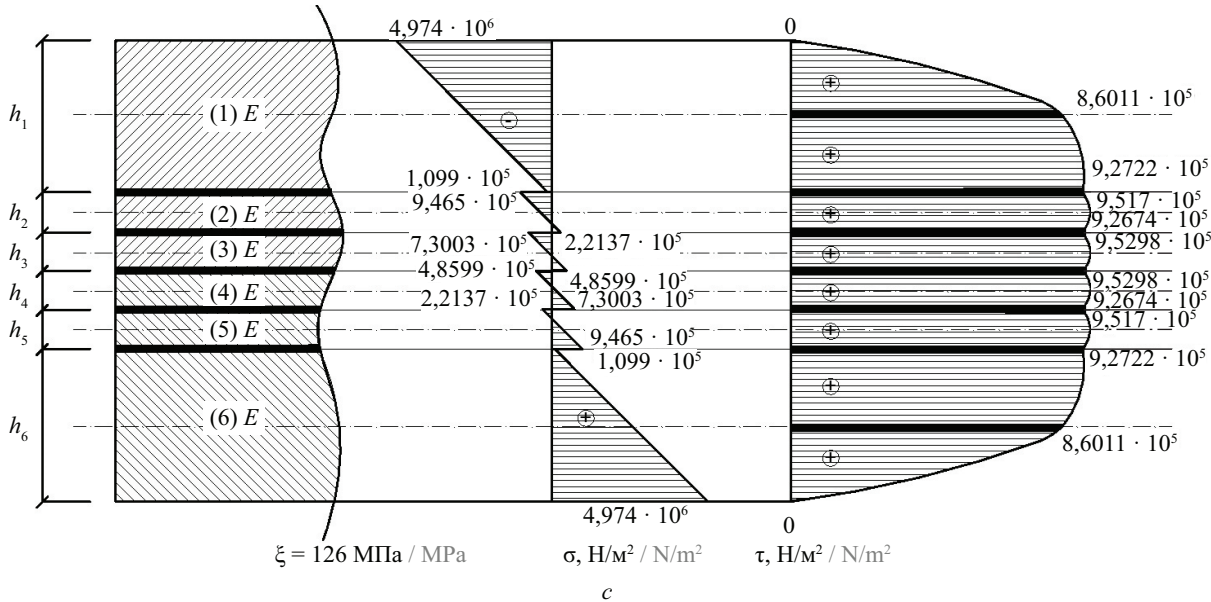
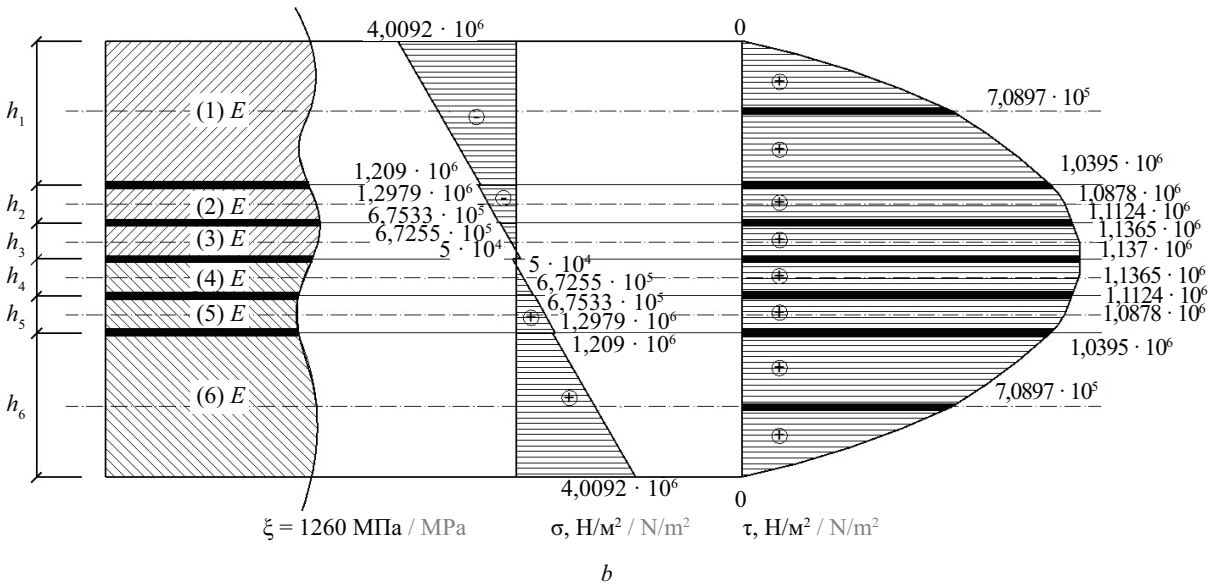
зей взаимному сдвигу слоев максимальные значения сдвигающих усилий и прогиба приближаются к ТСС, но снизу, не обеспечивая запас прочности.

Результаты по упрощенной методике, предложенной в настоящей работе, практически совпадают с результатами по теории составных стержней в широком диапазоне изменения жесткости швов на сдвиг. Исключения составляют данные при существенно малом значении сдвиговой жесткости. Слои в этом случае стремятся к независимой работе друг от друга, а общая изгибная жесткость составной балки определяется суммарной жесткостью слоев. В проектной прак-

тике такая компоновка составного сечения является наименее выгодной и не представляет значительного интереса. Независимая работа слоев при малых значениях коэффициента жесткости шва проиллюстрирована эпюрами напряжений на рис. 3, e; 4, e; 5, e.

Предложенная методика позволяет получать приемлемые результаты не только для балок, состоящих из одинаковых по механическим и геометрическим параметрам слоев, как это было предложено в работе [31]. В табл. 3 приведена информация расчета балки, у которой высота крайних слоев в два раза превышает высоту остальных. При высоких значе-





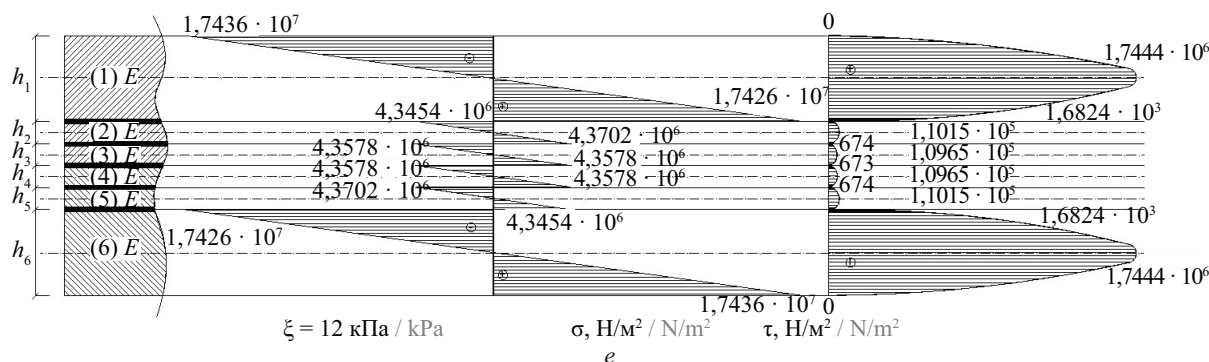


Рис. 5. Эпюры максимальных продольных и касательных напряжений: *a* — $\xi = 12\,600$ МПа; *b* — $\xi = 1\,260$ МПа; *c* — $\xi = 126$ МПа; *d* — $\xi = 12$ МПа; *e* — $\xi = 12$ кПа

Fig. 5. Epures of maximum longitudinal and tangential stresses: *a* — $\xi = 12\,600$ MPa; *b* — $\xi = 1\,260$ MPa; *c* — $\xi = 126$ MPa; *d* — $\xi = 12$ MPa; *e* — $\xi = 12$ kPa

ниях коэффициента жесткости шва отличия нашего решения от ТСС не превышают 5 %. При малых значениях ξ к результатам стоит относиться с осторожностью. Необходимо указать на еще одно ограничение применения предлагаемого подхода. Это случай, когда модули упругости слоев значительно отличаются друг от друга. Во втором варианте компоновки

поперечного сечения при одинаковой высоте всех слоев значение модуля упругости крайних слоев отличалось от остальных в два раза (результаты расчета представлены в табл. 2). По предварительной оценке авторов упрощенный подход может быть использован для случаев, когда значения модулей упругости отличаются не более чем на 50 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки. М. : Стройиздат, 1986. 314 с.
2. Дроздов П.Ф. Конструирование и расчет несущих систем многоэтажных зданий и их элементов : учебное пособие. М. : Стройиздат, 1977. 223 с.
3. Линович Л.Е. Расчет и конструирование частей гражданских зданий. К. : Будівельник, 1972. 663 с.
4. Подольский Д.М. Пространственный расчет зданий повышенной этажности. М. : Стройиздат, 1975. 158 с.
5. Подольский Д.М., Байнатов Ж.Б. Выбор расчетных моделей диафрагм жесткости многоэтажных зданий на основе экспериментальных исследований // Строительная механика и расчет сооружений. 1978. № 1. С. 41–48.
6. Багитова С.Ж., Байнатов Ж.Б., Танжариков Б., Сисембина К. Методика расчета многоэтажных каркасных зданий с диафрагмами жесткости // Наука и техника Казахстана. 2014. № 1–2. С. 17–22. EDN YMYOSM.
7. Байнатов Ж.Б., Багитова С.Ж., Танжариков Б., Даукенова А. Влияние податливости перекрытий на прочность многоэтажных каркасных зданий // Наука и техника Казахстана. 2014. № 1–2. С. 22–27. EDN YMYOSV.
8. Притыкин А.И. Концентрация напряжений в балках с одним рядом шестиугольных вырезов // Вестник МГСУ. 2009. № 1. С. 118–121. EDN KYTCGN.
9. Притыкин А.И., Притыкин И.А. Применение теории составных стержней к определению деформаций перфорированных балок // Вестник МГСУ. 2009. № 4. С. 177–181. EDN KZHBVU.
10. Притыкин А.И., Емельянов К.А. Определение прогибов балок с ромбовидной перфорацией стенки // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 814–823. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.814-823
11. Притыкин А.И. Prediction of the castellated beams deflections // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 9. С. 1160–1174. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1160-1174
12. Картопольцев В.М., Балашов Е.В. К вопросу исследования напряженно-деформированного состояния совместной работы сквозных балок с железобетонной плитой на металлическом поддоне // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2004. № 1 (9). С. 169–178. EDN JUCXUF.
13. Уткин В.А., Синиговская Н.В. Исследование несущей способности составных прогонов из бревен с соединениями на глухих цилиндрических нагелях, защемленных в стальных пластинах // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 5 (51). С. 134–144. EDN XQRQOX.
14. Уткин В.А., Готовцев И.И. Применение гребенчатых упоров для объединения железобетонной плиты и дощато-гвоздевой конструкции пролетного строения моста // Вестник Сибирского государственного

ного автомобильно-дорожного университета. 2020. Т. 17. № 3 (73). С. 414–427. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-3-414-427. EDN JZVZVV.

15. Уткин В.А., Кобзев П.Н., Шатунова Е.Г. Учет взаимодействия продольных сил и изгибающих моментов в расчетах составных прогонов из бревен // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2020. Т. 17. № 1 (71). С. 136–149. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-136-149. EDN UEIZYN.

16. Краснощёков Ю.В. Применение модели составного стержня для расчета деревоплиты из склеенных досок // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2009. № 4 (14). С. 28–32. EDN PBOJWX.

17. Лабудин Б.В., Попов Е.В., Ощепкова Е.С., Сопилов В.В., Русланова А.В., Фукалов А.А. Влияние разрывов (стыков) в обшивке на напряженно-деформированное состояние плитно-ребристых деревокомпозитных панелей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 6. С. 439–451. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-6-439-451. EDN WQVROM.

18. Сафин Д.Р., Хасанов Р.Р. Экспериментальные значения коэффициента жесткости гвоздевых соединений // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2006. № 2 (6). С. 69–70. EDN KBDZXH.

19. Линьков В.И. Моделирование работы деревянных балок составного сечения на податливых связях с применением теории составных стержней А.Р. Ржаницына // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 5 (238). С. 30–35. EDN OJYOIZ.

20. Король Е.А. Трехслойные ограждающие железобетонные конструкции из легких бетонов и особенности их расчета. М.: Изд-во ACB, 2001. 256 с. EDN TSSGZD.

21. Фардиев Р.Ф., Аиранов А.Х. Применение теории составных стержней к определению характера распределения напряжений в поперечном сечении усиленного внецентренно сжатого элемента // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4 (34). С. 363–369. EDN SVMISA.

22. Колчунов В.И., Марьенков Н.Г., Омельченко Е.В., Тугай Т.В., Бухтиярова А.С. Методика определения жесткости плосконапряженных и стержневых железобетонных составных конструкций при сейсмических воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 2. С. 12–15. EDN RWGCJD.

23. Балушкин А.Л. Железобетонные конструкции с различными способами фиксации арматурных элементов // Умные композиты в строительстве. 2021. Т. 2. № 3. С. 7–20. DOI: 10.52957/27821919_2021_3_7 EDN VNCQXP.

24. Савин С.Ю. Устойчивость внецентренно сжатых железобетонных элементов при особых воз-

действиях с учетом деформаций сдвига // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 1. С. 49–58. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.49-58

25. Федоров В.С., Баширов Х.З., Колчунов В.И. Элементы теории расчета железобетонных составных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 116–118. EDN SNDSHP.

26. Федоров В.С., Баширов Х.З. Расчетная модель сопротивления сдвигу составного железобетонного стержня // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 1. С. 109–111. EDN YMQVQP.

27. Стрельцов Д.Ю., Тарасов М.А. Влияние трещин на напряженное состояние деревянных балок // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2003. № 2–3. С. 27–34. EDN ICGPNZ.

28. Леонтьев А.Н., Леонтьева И.Г. Расчет бесконечно длинной составной балки, расположенной на упругом основании // Вестник МГСУ. 2010. № 4. С. 167–172. EDN RTSCWL.

29. Атаров Н.М., Леонтьев А.Н., Леонтьева И.Г. Изгиб составной балки, расположенной на упругом основании // Вестник МГСУ. 2011. № 4. С. 212–216. EDN OWCOJD.

30. Филатов В.В., Кужин Б.Ф., Тхи Линь Куен Хоанг. Расчет двухслойной составной балки, свободно лежащей на упругом основании // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 12. С. 1685–1692. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1685-1692

31. Габбасов Р.Ф., Филатов В.В. Численный метод расчета составных стержней и пластин с абсолютно жесткими поперечными связями: монография. М.: Издательство ACB, 2014. 200 с. EDN VOCOZX.

32. Newmark N.M., Siess C.P., Viest I.M. Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction // Proceedings of the Society of Experimental Stress Analysis. 1951. Vol. 9. Issue 1. Pp. 75–92.

33. Girhammar U.A., Gopu V.K.A. Composite Beam-Columns with Interlayer Slip — Exact Analysis // Journal of Structural Engineering. 1993. Vol. 119. Issue 4. Pp. 1265–1282. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445 (1993)119:4(1265)

34. Schnabl S., Saje M., Turk G., Planinc I. Analytical solution of two-layer beam taking into account interlayer slip and shear deformation // Journal of Structural Engineering. 2007. Vol. 133. Issue 6. Pp. 886–895. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2007)133:6(886)

35. Xu R., Wu Y. Static, dynamic, and buckling analysis of partial interaction composite members using Timoshenko's beam theory // International Journal of Mechanical Sciences. 2007. Vol. 49. Issue 10. Pp. 1139–1155. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2007.02.006

36. Xu R., Wu Y.F. Two-dimensional analytical solutions of simply supported composite beams with interlayer slips // International Journal of Solids and Structures. 2007. Vol. 44. Issue 1. Pp. 165–175. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.04.027

37. Goodman J.R., Popov E.P. Layered beam systems with interlayer slip // *Journal of the Structural Division*. 1968. Vol. 94. Issue 11. Pp. 2535–2547. DOI: 10.1061/jsdeag.0002116
38. Chui Y.H., Barclay D.W. Analysis of three-layer beams with non-identical layers and semi-rigid connections // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1998. Vol. 25. Issue 2. Pp. 271–276. DOI: 10.1139/197-093
39. Schnabl S., Planinc I., Saje M., Cas B., Turk G. An analytical model of layered continuous beams with partial interaction // *Structural Engineering and Mechanics*. 2006. Vol. 22. Issue 3. Pp. 263–278. DOI: 10.12989/sem.2006.22.3.263
40. Ranzi G. Short- and long-term analyses of composite beams with partial interaction stiffened by a longitudinal plate // *Steel and Composite Structures*. 2006. Vol. 6. Issue 3. Pp. 237–255. DOI: 10.12989/scs.2006.6.3.237
41. Ranzi G., Gara F., Ansourian P. General method of analysis for composite beams with longitudinal and transverse partial interaction // *Computers & Structures*. 2006. Vol. 84. Issue 31–32. Pp. 2373–2384. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.07.002
42. Ranzi G. Locking problems in the partial interaction analysis of multi-layered composite beams // *Engineering Structures*. 2008. Vol. 30. Issue 10. Pp. 2900–2911. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.006
43. Heinisuo M. An exact finite element technique for layered beams // *Computers & Structures*. 1988. Vol. 30. Issue 3. Pp. 615–622. DOI: 10.1016/0045-7949(88)90297-0
44. Gattesco N. Analytical modeling of nonlinear behavior of composite beams with deformable connection // *Journal of Constructional Steel Research*. 1999. Vol. 52. Issue 2. Pp. 195–218. DOI: 10.1016/S0143-974X(99)00026-7
45. Gara F., Ranzi G., Leoni G. Displacement-based formulations for composite beams with longitudinal slip and vertical uplift // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2006. Vol. 65. Issue 8. Pp. 1197–1220. DOI: 10.1002/nme.1484
46. Da Silva A.R., Sousa J.B.M. A family of interface elements for the analysis of composite beams with interlayer slip // *Finite Elements in Analysis and Design*. 2009. Vol. 45. Issue 5. Pp. 305–314. DOI: 10.1016/j.finel.2008.10.007
47. Sousa J.B.M., da Silva A.R. Nonlinear analysis of partially connected composite beams using interface elements // *Finite Elements in Analysis and Design*. 2007. Vol. 43. Issue 11–12. Pp. 954–964. DOI: 10.1016/j.finel.2007.06.010
48. Sousa J.B.M., da Silva A.R. Analytical and numerical analysis of multilayered beams with interlayer slip // *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32. Issue 6. Pp. 1671–1680. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.02.015
49. Krawczyk P., Frey F., Zieliński A.P. Large deflections of laminated beams with interlayer slips // *Engineering Computations*. 2007. Vol. 24. Issue 1. Pp. 17–32. DOI: 10.1108/02644400710718556
50. Krawczyk P., Rebora B. Large deflections of laminated beams with interlayer slips // *Engineering Computations*. 2007. Vol. 24. Issue 1. Pp. 33–51. DOI: 10.1108/02644400710718565
51. Tahmoorian F., Nemati S., Sharafi P., Samali B., Khakpour S. Punching behaviour of foam filled modular sandwich panels with high-density polyethylene skins // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 33. P. 101634. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101634
52. Gombeda M.J., Naito C.J., Quiel S.E. Flexural performance of precast concrete insulated wall panels with various configurations of ductile shear ties // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 33. P. 101574. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101574
53. Elumalai E.S., Krishnaveni G., Sarath Kumar R., Dominic Xavier D., Kavitha G., Seralathan S. et al. Buckling analysis of stiffened composite curved panels // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 33. Pp. 3604–3611. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.662
54. Baszen M. Semi-rigid behavior of joints in wood light-frame structures // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172. Pp. 88–95. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.022
55. Naik R.K., Panda S.K., Racherla V. A new method for joining metal and polymer sheets in sandwich panels for highly improved interface strength // *Composite Structures*. 2020. Vol. 251. P. 112661. DOI: 10.1016/j.compositestruct.2020.112661

Поступила в редакцию 26 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 27 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Владимирович Филатов** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4433-9609, Scopus: 57194451687, ResearcherID: AAZ-8347-2021, ORCID: 0000-0002-4329-4403; stroitmeh@mgsu.ru;

Тхи Линь Куэн Хоанг — аспирантка кафедры строительной и теоретической механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; hoanglinhquyen@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Rzhantsyn A.R. *Composite rods and plates*. Moscow, Stroyizdat, 1986; 314. (rus.).
2. Drozdov P.F. *Design and calculation of load-bearing systems of multi-storey buildings and their elements : textbook*. Moscow, Stroyizdat, 1977; 223. (rus.).
3. Linovich L.E. *Calculation and design of parts of civil buildings*. Kyiv, Budivel'nik, 1972; 664. (rus.).
4. Podolsky D.M. *Spatial calculation of high-rise buildings*. Moscow, Stroyizdat, 1975; 158. (rus.).
5. Podolsky D.M., Baynatov Zh.B. Selection of calculation models of rigidity diaphragms of multi-story buildings based on experimental studies. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 1978; 1:41-48. (rus.).
6. Bagitova S.Zh., Baynatov Zh.B., Tanzharikov B.K., Sissembina K.S. Calculation of the multistory frame buildings diaphragm stiffness. *Science and Technology of Kazakhstan*. 2014; 1-2:17-22. EDN YMYOSM. (rus.).
7. Baynatov Zh.B., Bagitova S.Zh., Tanzharikov B.K., Daukenova A.N. Influences of the pliability of overlappings on the durability of multistoried frame buildings. *Science and Technology of Kazakhstan*. 2014; 1-2:22-27. EDN YMYOSV. (rus.).
8. Pritykin A.I. Stress concentration in beams with one row of hexagonal cutouts. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2009; 1:118-121. EDN KYTCGN. (rus.).
9. Pritykin A.I., Pritykin I.A. Application of the theory of composite rods to the determination of deformations of perforated beams. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2009; 4:177-181. EDN KZHBV. (rus.).
10. Pritykin A.I., Emelianov K.A. Determination of deflections of beams with rhombic perforation of the web. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; 13(7):(118):814-823. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.814-823 (rus.).
11. Pritykin A.I. Prediction of the castellated beams deflections. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2022; 17(9):1160-1174. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1160-1174 (rus.).
12. Kartopoltsev V.M., Balashov E.V. On the issue of studying the stress-strain state of the joint work of through beams with a reinforced concrete slab on a metal pallet. *Journal of Construction and Architecture*. 2004; 1(9):169-178. EDN JUCXUF. (rus.).
13. Utkin V.A., Sinigovskaya N.V. Study of carrying capacity of compound girders made of logs with boundings on deaf cylindrical nog embedded in steel plates. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; 5(51):134-144. EDN XQRQOX. (rus.).
14. Utkin V.A., Gotovtsev I.I. Crested shear connectors application to combine reinforced concrete slab and plank-nailed structure of bridge span. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(3):(73):414-427. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-3-414-427. EDN JZVZVV. (rus.).
15. Utkin V.A., Kobzev P.N., Shatunova E.G. Compound runs of logs calculation: accounting of longitudinal forces' and bending moments' interaction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1):(71):136-149. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-136-149. EDN UEIZYN. (rus.).
16. Krasnoshchekov Yu.V. Application of the composite rod model for calculating wood panels made of glued boards. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2009; 4(14):28-32. EDN PBOJWX. (rus.).
17. Labudin B.V., Popov E.V., Oshchepkova E.S., Sopilov V.V., Ruslanova A.V., Fukalov A.A. Influence of cover splices on the stress-strain state of plate-ribbed wood-composite panels. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(6):439-451. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-6-439-451. EDN WQVROM. (rus.).
18. Safin D.R., Khasanov R.R. Experimental values of the stiffness coefficient of nail joints. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2006; 2(6):69-70. EDN KBDZXX. (rus.).
19. Linkov V.I. Modeling the work of wooden beams of composite section on flexible connections using the theory of composite rods of A.R. Rzhantsyn. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2011; 5(238):30-35. EDN OJYOIZ. (rus.).
20. Korol E.A. *Three-layer enclosing reinforced concrete structures made of lightweight concrete and features of their calculation*. Moscow, ASV Publishing House, 2001; 256. EDN TSSGZD. (rus.).
21. Fardiev R.F., Ashrapov A.H. Application of the theory of compound bars for the assessment of stress pattern in the cross section of a strengthened beam column. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2015; 4(34):363-369. EDN SVMISA. (rus.).
22. Kolchunov V.I., Mar'enkova N. G., Omel'chenko E.V., Tugai T.V., Bukhtiyarova A.S. Methods for determining the stiffness of planar stressed and frame reinforced concrete composite structures under seismic actions. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 2:12-15. EDN RWGCJD. (rus.).
23. Balushkin A.L. Reinforced concrete constructions with different methods of armouring fixing. *Smart Composites in Construction*. 2021; 2(3):7-20. DOI: 10.52957/27821919_2021_3_7. EDN VNCQXP. (rus.).
24. Savin S.Yu. Stability of eccentrically compressed reinforced concrete elements under special impacts with account taken of shear deformations. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(1):49-58. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.1.49-58 (rus.).

25. Fyodorov V.S., Bashirov H.Z., Kolchunov V.I. Elements of composite reinforced concrete construction calculation theory. *Academia. Architecture and Construction*. 2014; 2:116-118. EDN SNDSHP. (rus.).
26. Fedorov V.S., Bashirov H.Z. Calculated resistance model of composite shear bar. *Academia. Architecture and Construction*. 2017; 1:109-111. EDN YMQVQP. (rus.).
27. Streltsov D.Yu., Tarasov M.A. Influence of cracks on stress condition of wooden beams. *Lesnoy Zhurnal*. 2003; 2-3:27-34. EDN ICGPNZ. (rus.).
28. Leontiev A.N., Leontieva I.G. Analysis of an infinite composite beam located on elastic foundation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 4:167-172. EDN RTSCWL. (rus.).
29. Atarov N.M., Leontiev A.N., Leontieva I.G. Analysis of an composite beam located on elastic foundation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 4:212-216. EDN OWCOJD. (rus.).
30. Filatov V.V., Kuzhin B.F., Thi Linh Quyen Hoang. The analysis of a free two-layer composite beam on the elastic foundation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(12):1685-1692. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1685-1692 (rus.).
31. Gabbasov R.F., Filatov V.V. *Numerical method for calculating composite rods and plates with absolutely rigid transverse connections : monograph*. Moscow, ASV Publishing House, 2014; 200. EDN VOCOZX. (rus.).
32. Newmark N.M., Siess C.P., Viest I.M. Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction. *Proceedings of the Society of Experimental Stress Analysis*. 1951; 9(1):75-92.
33. Girhammar U.A., Gopu V.K.A. Composite Beam-Columns with Interlayer Slip — Exact Analysis. *Journal of Structural Engineering*. 1993; 119(4):1265-1282. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1993)119:4(1265)
34. Schnabl S., Saje M., Turk G., Planinc I. Analytical solution of two-layer beam taking into account interlayer slip and shear deformation. *Journal of Structural Engineering*. 2007; 133(6):886-895. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2007)133:6(886)
35. Xu R., Wu Y. Static, dynamic, and buckling analysis of partial interaction composite members using Timoshenko's beam theory. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2007; 49(10):1139-1155. DOI: 10.1016/j.jimecs.2007.02.006
36. Xu R., Wu Y.F. Two-dimensional analytical solutions of simply supported composite beams with interlayer slips. *International Journal of Solids and Structures*. 2007; 44(1):165-175. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.04.027
37. Goodman J.R., Popov E.P. Layered beam systems with interlayer slip. *Journal of the Structural Division*. 1968; 94(11):2535-2547. DOI: 10.1061/jsdeag.0002116
38. Chui Y.H., Barclay D.W. Analysis of three-layer beams with non-identical layers and semi-rigid connections. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1998; 25(2):271-276. DOI: 10.1139/197-093
39. Schnabl S., Planinc I., Saje M., Cas B., Turk G. An analytical model of layered continuous beams with partial interaction. *Structural Engineering and Mechanics*. 2006; 22(3):263-278. DOI: 10.12989/sem.2006.22.3.263
40. Ranzi G. Short- and long-term analyses of composite beams with partial interaction stiffened by a longitudinal plate. *Steel and Composite Structures*. 2006; 6(3):237-255. DOI: 10.12989/scs.2006.6.3.237
41. Ranzi G., Gara F., Ansourian P. General method of analysis for composite beams with longitudinal and transverse partial interaction. *Computers & Structures*. 2006; 84(31-32):2373-2384. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.07.002
42. Ranzi G. Locking problems in the partial interaction analysis of multi-layered composite beams. *Engineering Structures*. 2008; 30(10):2900-2911. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.006
43. Heinisuo M. An exact finite element technique for layered beams. *Computers & Structures*. 1988; 30(3):615-622. DOI: 10.1016/0045-7949(88)90297-0
44. Gattesco N. Analytical modeling of nonlinear behavior of composite beams with deformable connection. *Journal of Constructional Steel Research*. 1999; 52(2):195-218. DOI: 10.1016/s0143-974x(99)00026-7
45. Gara F., Ranzi G., Leoni G. Displacement-based formulations for composite beams with longitudinal slip and vertical uplift. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2006; 65(8):1197-1220. DOI: 10.1002/nme.1484
46. Da Silva A.R., Sousa J.B.M. A family of interface elements for the analysis of composite beams with interlayer slip. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2009; 45(5):305-314. DOI: 10.1016/j.finel.2008.10.007
47. Sousa J.B.M., da Silva A.R. Nonlinear analysis of partially connected composite beams using interface elements. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2007; 43(11-12):954-964. DOI: 10.1016/j.finel.2007.06.010
48. Sousa J.B.M., da Silva A.R. Analytical and numerical analysis of multilayered beams with interlayer slip. *Engineering Structures*. 2010; 32(6):1671-1680. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.02.015
49. Krawczyk P., Frey F., Zieliński A.P. Large deflections of laminated beams with interlayer slips. *Engineering Computations*. 2007; 24(1):17-32. DOI: 10.1108/02644400710718556
50. Krawczyk P., Rebora B. Large deflections of laminated beams with interlayer slips. *Engineering Computations*. 2007; 24(1):33-51. DOI: 10.1108/02644400710718565
51. Tahmoorian F., Nemati S., Sharafi P., Samali B., Khakpour S. Punching behaviour of foam filled modular sandwich panels with high-density polyethylene skins.

Journal of Building Engineering. 2021; 33:101634. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101634

52. Gombada M.J., Naito C.J., Quiel S.E. Flexural performance of precast concrete insulated wall panels with various configurations of ductile shear ties. *Journal of Building Engineering*. 2021; 33:101574. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101574

53. Elumalai E.S., Krishnaveni G., Sarath Kumar R., Dominic Xavier D., Kavitha G., Seralathan S. et al. Buckling analysis of stiffened composite curved pan-

els. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 33:3604-3611. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.662

54. Baszen M. Semi-rigid behavior of joints in wood light-frame structures. *Procedia Engineering*. 2017; 172:88-95. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.022

55. Naik R.K., Panda S.K., Racherla V. A new method for joining metal and polymer sheets in sandwich panels for highly improved interface strength. *Composite Structures*. 2020; 251:112661. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112661

Received September 26, 2024.

Adopted in revised form on October 27, 2024.

Approved for publication on October 27, 2024.

B I O N O T E S: **Vladimir V. Filatov** — Doctor of Technical Sciences, Associated Professor, Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4433-9609, Scopus: 57194451687, ResearcherID: AAZ-8347-2021, ORCID: 0000-0002-4329-4403; stroitmeh@mgsu.ru;

Thi Linh Quyen Hoang — postgraduate student of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; hoanglinhquyen@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the publication.

The authors declare no conflicting interests.

Исследование эффективности использования шлаков черной металлургии в слоях основания дорожной одежды

Сергей Анатольевич Чернов¹, Евгений Валерьевич Леконцев²,
Виктория Сергеевна Шрейнер¹, Александр Владимирович Фукс³,
Алексей Игоревич Пискунов⁴

¹ Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия;

² Центр инновационных компетенций ООО «Доринжсервис»; г. Азов, Россия;

³ Общество с ограниченной ответственностью «БФБ» (ООО «БФБ»); г. Москва, Россия;

⁴ Публичное акционерное общество «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК»);
г. Липецк, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены результаты исследования характеристик металлургических шлаков, рассмотрена возможность их применения в органоминеральных смесях для слоев основания дорожной одежды с учетом технологических особенностей их приготовления и показателей эксплуатационных свойств. Тема исследования является актуальной как для отдельных регионов, так и для страны в целом. Количество отходов металлургического производства ежегодно увеличивается и исчисляется сотнями миллионов тонн. Главным направлением снижения отходов производства является их утилизация. Еще большую актуальность данная проблема приобретает на фоне постоянно снижающихся запасов природных материалов, увеличение потребности которых обусловлено высокими темпами развития материального производства и ускорением научно-технического прогресса. Таким образом, применение шлаковых материалов в дорожном строительстве не только способствует утилизации отходов, но и позволит решить ряд экологических и экономических задач. Целью исследования является комплексное изучение влияния шлаков черной металлургии на показатели физико-механических и эксплуатационных свойств органоминеральных смесей слоев основания дорожной одежды и обоснование их эффективного применения в дорожном строительстве. Для реализации поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи: 1) определить химический анализ исследуемых шлаков и изучить механизм взаимодействия шлаковых материалов с вяжущими; 2) оценить степень влияния шлаковых материалов на физико-механические и эксплуатационные свойства органоминеральных смесей; 3) разработать методику определения накопления остаточных деформаций в органоминеральных смесях и установить закономерности их изменения во времени; 4) определить модуль жесткости и количество циклов до отказа в исследуемых органоминеральных смесях в зависимости от природы происхождения материала. Сталеплавильные шлаки черной металлургии могут способствовать получению органоминеральных смесей, обладающих повышенными физико-механическими и эксплуатационными показателями свойств, за счет повышенного содержания кальциевых соединений, микропористых сложений кристаллической структуры и активных процессов гидратации, что может оказать благоприятное влияние на долговечность конструктивного слоя дорожной одежды при их применении.

Материалы и методы. Все материалы, используемые в рамках данного исследования, подвергались испытаниям по определению их физико-механических параметров, а материалы, представляющие собой побочные промышленные продукты, дополнительно подвергались химическому анализу. Такой подход позволил оценить соответствие инертных материалов требованиям, предъявляемым в Российской Федерации к исходным материалам для применения их в составе органоминеральных смесей, и выявить критические характеристики материалов, которые могут повлиять на показатели прочностных и эксплуатационных свойств. Применение отходов металлургической промышленности имеет ряд преимуществ перед обычными природными материалами, среди которых низкая экономическая и экологическая стоимость. В качестве отходов металлургической промышленности использовались конверторные и доменные шлаки различной granulometрии. Для оценки химического состава сталеплавильных шлаков был проведен рентгенофлуоресцентный тест. Определение содержания серы производилось на элементном анализаторе путем сжигания навески образца при температуре 1350 °С. Определение содержания углерода производилось на анализаторе общего органического углерода путем сжигания навески образца при температуре 950 °С. Анализ прочих компонентов проводился на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой после разложения образца пробы смесью неорганических кислот. Для подбора составов органоминеральных смесей на комплексном вяжущем были выполнены исследования по изучению характера взаимодействия органического вяжущего со шлаками. Для оценки эффективности применения исследуемых шлаковых материалов были подобраны оптимальные составы органоминеральных смесей в соответствии с ГОСТ 30491–2012, из которых были изготовлены и испытаны образцы цилиндрической формы для показателей физико-механических свойств, а также образцы-плиты и образцы-балочки для показателей эксплуатационных свойств. При проведении экспериментальных исследований применялось универсальное устройство для испытания на сжатие и изгиб Unifame 70-TO108E и пресс испытательный. Оценка степени устойчивости образцов из органоминеральных смесей к накоплению остаточных деформаций осуществлялась на приборе динамических испытаний (патент № RU 152287 U1) в соответствии с разработанной для этих целей методикой испытаний. Для оценки показателей эксплуатационных свойств по модулю жесткости и количеству циклов до отказа и водостойкости выполнена адаптация методологии испытаний, применяемой для оценки качества свойств асфальтобетонов, с учетом технологических условий, характерных для органоминеральных смесей. Для этих целей использовался прибор CRT-RC-H2, имитирующий работу катка, и прибор CRT-SA4PT-BB,

представляющий собой серво-пневматическую систему, подающую на образец-балочку синусоидальную нагрузку с постоянной деформацией и частотой.

Результаты исследования. Проанализирован химический и элементный состав шлаковых материалов, на основании которого определены основные направления возможности применения отходов металлургической промышленности в дорожной отрасли. Изучен механизм взаимодействия шлакового щебня и песка с вяжущими. Установлено, что применение сталеплавильных шлаков позволяет повысить показатели прочностных и эксплуатационных свойств органоминеральных смесей. Разработаны условия испытаний и апробирована методика оценки водостойкости образцов из органоминеральной смеси по пределу прочности при непрямом растяжении, модулю жесткости и количеству циклов до отказа. Предложен метод оценки устойчивости органоминеральных смесей к накоплению остаточных деформаций на приборе динамических испытаний и установлена зависимость изменения показателя во времени. По результатам экспериментальных исследований подтверждена целесообразность, экономическая и экологическая эффективность применения отходов металлургической промышленности в слоях основания конструкции дорожной одежды.

Выводы. Выполнен химический анализ сталеплавильных шлаков, отмечены их положительные стороны и изучен механизм их взаимодействия с вяжущими. Сталеплавильные шлаки черной металлургии позволили получить органоминеральные смеси с повышенными показателями физико-механических и эксплуатационных свойств относительно аналогичных смесей из природных минеральных материалов. Впервые в рамках экспериментальных исследований получены фактические значения эксплуатационных свойств по показателям «остаточные деформации», «модуль жесткости» и «количество циклов до отказа» в органоминеральных смесях из природных и шлаковых материалов, что может быть использовано при принятии проектных решений. Применение органоминеральных смесей из шлаковых материалов в слоях основания на 30–35 % замедляет процессы накопления остаточных деформаций относительно аналогичных смесей из природных минеральных материалов, что позволяет продлить срок службы конструктивного слоя дорожной одежды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: шлаки, отходы металлургии, остаточные деформации, органоминеральные смеси, модуль жесткости, предел прочности при непрямом растяжении, водостойкость, длительная водостойкость

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллегам и анонимным рецензентам за время, затраченное на рассмотрение статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чернов С.А., Леконцев Е.В., Шрейнер В.С., Фукс А.В., Пискунов А.И. Исследование эффективности использования шлаков черной металлургии в слоях основания дорожной одежды // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1937–1950. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1937-1950

Автор, ответственный за переписку: Сергей Анатольевич Чернов, sergey_a_chernov@mail.ru.

Research of efficiency of ferrous metallurgy slag use in pavement base layers

Sergey A. Chernov¹, Evgeny V. Lekontsev², Victoria S. Schreine¹, Alexander V. Fuchs³, Alexey I. Piskunov⁴

¹ Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation;

² Center for Innovative Competences Dorinzhservice LLC; Azov, Russian Federation;

³ Limited Liability Company “BFB” (LLC “BFB”); Moscow, Russian Federation;

⁴ Public Joint Stock Company “Novolipetsk Iron and Steel Works” (NLMK PJSC); Lipetsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The results of research of metallurgical slags characteristics are presented, the possibility of their application in organomineral mixtures for pavement base layers is considered, taking into account technological features of their preparation and indicators of operational properties. The research topic is relevant both for individual regions and for the country as a whole. The amount of waste from metallurgical production increases annually and is estimated in hundreds of millions of tons. The main direction of reducing production waste is their disposal. This problem is becoming even more urgent against the background of constantly decreasing reserves of natural materials, the increase in demand for which is due to the high rates of development of material production and the acceleration of scientific and technological progress. Thus, the use of slag materials in road construction will not only contribute to waste disposal, but will also solve a number of environmental and economic problems. The aim of the research is a comprehensive study of the influence of ferrous metallurgy slags on the physical, mechanical and operational properties of organomineral mixtures of pavement base layers and substantiation of their effective application in road construction. To achieve this goal, it is necessary to perform the following tasks: 1) to determine the chemical analysis of the studied slags and to study the mechanism of interaction of slag materials with binders; 2) to assess the degree of influence of slag materials on the physical, mechanical and operational properties of organomineral mixtures; 3) to develop a methodology for determining the accumulation of residual deformations in organomineral mixtures and to establish patterns of their change over time; 4) to determine the modulus of stiffness and the number of cycles to failure in the studied organomineral mixtures, depending on the nature of the origin of the material. Steelmaking slags of ferrous metallurgy can contribute to the production of organomineral mixtures with increased physical, mechanical and operational properties due to the increased content of calcium compounds, microporous additions of the crystal structure and active hydration processes, which can have a beneficial effect on the durability of the structural layer of the pavement when used.

Materials and methods. All materials used in this study were subjected to tests to determine their physical and mechanical parameters, and materials representing industrial by-products were additionally subjected to chemical analysis. This approach

made it possible to assess the compliance of inert materials with the requirements imposed in the Russian Federation for starting materials for their use in organomineral mixtures, and to identify critical characteristics of materials that can affect the strength and performance properties. The use of waste from the metallurgical industry has a number of advantages over conventional natural materials, including low economic and environmental costs. Converter and blast furnace slags of various granulometry were used as waste products of the metallurgical industry. An X-ray fluorescence test was performed to assess the chemical composition of steelmaking slags. The sulfur content was determined on an elemental analyzer by burning a specimen at a temperature of 1350 °C. Carbon content was determined on a total organic carbon analyzer by burning a specimen at a temperature of 950 °C. The analysis of other components was carried out on an atomic emission spectrometer with inductively coupled plasma after decomposition of the specimen with a mixture of inorganic acids. To select the compositions of organomineral mixtures based on a complex binder, studies were carried out to study the nature of the interaction of an organic binder with slags. To assess the effectiveness of the use of the studied slag materials, optimal compositions of organomineral mixtures were selected in accordance with GOST 30491–2012, from which cylindrical specimens were made and tested for indicators of physical and mechanical properties, as well as plate specimens and beam specimens for performance properties. During the experimental studies, a universal device for compression and bending testing, Unifame 70-TO108E, and a test press were used. The degree of stability of specimens from organomineral mixtures to the accumulation of residual deformations was assessed using a dynamic testing device (patent No. RU 152287 U1), in accordance with the test procedure developed for this purpose. To assess the performance parameters in terms of modulus of rigidity and the number of cycles to failure and water resistance, the test methodology used to assess the quality of asphalt concrete properties was adapted, taking into account the technological conditions characteristic of organomineral mixtures. For these purposes, the CRT-RC-H2 device was used, simulating the operation of a roller, and the CRT-SA4PT-BB device, which is a servo-pneumatic system that supplies a sinusoidal load with constant deformation and frequency to the specimen beam.

Research results. The chemical and elemental composition of slag materials is analyzed, on the basis of which the main directions of the possibility of using metallurgical industry waste in the road industry are determined. The mechanism of interaction of slag gravel and sand with binders was studied. It was established that the use of steelmaking slags makes it possible to increase the strength and performance properties of organomineral mixtures. Test conditions were developed and a method for evaluating the water resistance of specimens from an organomineral mixture according to the tensile strength under indirect tension and resistance to the accumulation of residual deformations was tested. A method for assessing the stability of organomineral mixtures to the accumulation of residual deformations on a dynamic test device is proposed and the dependence of the change in the indicator over time is established. According to the results of experimental studies, the expediency, economic and environmental efficiency of using waste from the metallurgical industry in the layers of the base of the pavement structure was confirmed.

Conclusions. A chemical analysis of steelmaking slags was performed, their positive sides were noted and the mechanism of their interaction with binders was studied. Steelmaking slags of ferrous metallurgy made it possible to obtain organomineral mixtures with increased physical, mechanical and operational properties relative to similar mixtures of natural mineral materials. For the first time, within the framework of experimental studies, the actual values of operational properties were obtained in terms of "residual deformations", "modulus of rigidity" and "number of cycles to failure" in organomineral mixtures of natural and slag materials, which can be used in making design decisions. The use of organomineral mixtures of slag materials in the base layers slows down the accumulation of residual deformations by 30–35 % relative to similar mixtures of natural mineral materials, which makes it possible to extend the service life of the structural layer of the pavement.

KEYWORDS: slags, metallurgical waste, residual deformations, organomineral mixtures, stiffness modulus, indirect tensile strength, water resistance, long-term water resistance

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the anonymous reviewers for their time in reviewing the paper.

FOR CITATION: Chernov S.A., Lekontsev E.V., Schreine V.S., Fuchs A.V., Piskunov A.I. Research of efficiency of ferrous metallurgy slag use in pavement base layers. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1937-1950. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1937-1950 (rus.).

Corresponding author: Sergey A. Chernov, sergey_a_chernov@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение безопасности, комфорта и срока службы конструктивных элементов дорожной одежды является важной и актуальной задачей дорожной отрасли. Ежегодно на строительство и ремонт автомобильных дорог расходуется до 30 млн тонн природных дорожно-строительных материалов. Поскольку большинство дорожно-строительных материалов получают из невозобновляемых природных источников, то в процессе их добычи происходит не только изменение ландшафта, но и глобальные выбросы парниковых газов. Альтернативой минеральным материалам по качеству и стоимости может служить применение отходов промышленности, в том числе шлаков черной металлургии. Существующий отечественный [1–3] и зарубежный опыт [4–6] использования шлаковой продукции в строитель-

стве подчеркивают актуальность и значимость проводимых исследований в настоящее время. Однако следует обратить внимание на тот факт, что для расширения области применения шлаковой продукции необходимо, чтобы исходный материал обладал требуемым набором свойств [7–10] и соответствовал нормативно-технической документации. В рамках исследования аналитически и экспериментально осуществлена качественная и количественная оценка эффективности влияния шлаковых материалов на основные показатели физико-механических и эксплуатационных свойств подобранных составов органоминеральных смесей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных материалов применялись конверторные и доменные шлаки черной металлур-

гии различной гранулометрии (щебни шлаковые фр. 5–10 мм, фр. 10–20 мм и фр. 20–40 мм, песок шлаковый).

Конверторный шлак образуется на первой стадии процесса получения стали, называемой стадией плавки.

Доменный шлак — неметаллический продукт, состоящий в основном из силикатов и алюминатов кальция, который получается вместе со сталью в доменной печи в виде расплава и затем охлаждается. При быстром охлаждении водой, паром или воздухом образуется гранулированный шлак, при медленном — комовой. Высокую гидравлическую активность доменный шлак приобретает при очень быстром охлаждении или грануляции водой. Медленно охлаждаемый шлак успевает до некоторой степени закристаллизоваться, и гидравлические свойства его снижаются. Однако при повышении температуры и давления активность шлака настолько возрастает, что его иногда следует применять с замедлителями сроков схватывания.

Для идентификации химических элементов в шлаковых материалах был проведен рентгенофлуоресцентный тест, а для оценки потенциальных химических соединений, присутствующих в шлаках, был выполнен рентгеноструктурный анализ.

Определение содержания серы производилось на элементном анализаторе путем сжигания навески образца при температуре 1350 °С, а содержания углерода на анализаторе общего органического углерода путем сжигания навески образца при температуре 950 °С.

Анализ прочих компонентов проводился на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой после разложения образца пробы смеси неорганических кислот.

Определение фазового и минерального составов проб шлакового материала проводилось на рентгеновском порошковом дифрактометре.

Применяемые сырьевые материалы: щебни осадочной горной породы фр. 5–10 мм, фр. 10–20 мм и фр. 20–40 мм, песок из отсевов дробления щебня, портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н, минеральный порошок марки МП-1 (неактив.), эмульсия битумная дорожная катионная медленнораспадающаяся марки ЭБДК-М. В соответствии с требованиями ГОСТ 30491–2012¹, табл. 1, для проектируемых составов органоминеральных смесей предъявлены следующие требования: максимальная крупность зерен щебня — 40 мм; содержание щебня — не более 70 % по массе; содержание зерен мельче 0,63 мм — не менее 12 % по массе; содержание зерен мельче 0,071 мм — не нормируется; марка по дробимости (прочности) — не менее 800. В качестве органического вяжущего

использовалась эмульсия битумная дорожная катионная медленнораспадающаяся марки ЭБДК-М по ГОСТ Р 58952.1–2020². Процентное содержание битумной эмульсии во всех исследуемых смесях составляло 3, 4 и 5 %. В качестве неорганического вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108–2020³. Процентное содержание портландцемента во всех исследуемых смесях составляло 2 и 4 %.

Подбор состава осуществлялся в соответствии с ГОСТ 12801–98⁴.

Условие твердения образцов — нормальное.

Исследования проводились для следующих смесей:

- органоминеральная смесь из природных минеральных материалов плотной горной породы, укрепленная органическим вяжущим с добавлением портландцемента;
- органоминеральная смесь из конверторных шлаков, укрепленных органическим вяжущим с добавлением портландцемента;
- органоминеральная смесь из доменных шлаков, укрепленных органическим вяжущим с добавлением портландцемента.

Образцы испытывались на соответствие требованиям по следующим *физико-механическим показателям*: предел прочности на сжатие при температуре 20 и 50 °С в возрасте 14 суток; водонасыщение; набухание; водостойкость и водостойкость при длительном водонасыщении.

В качестве *показателей эксплуатационных свойств* определялись предел прочности при непрямом растяжении, коэффициент водостойкости по методу TSR, устойчивость к накоплению остаточных деформаций на приборе динамических испытаний, модуль жесткости и количество циклов до отказа.

Для определения предела прочности при непрямом растяжении и коэффициента водостойкости были изготовлены для каждой смеси по 6 образцов, которые в дальнейшем были разделены на две группы. Образцы первой группы выдерживали на воздухе при температуре (22 ± 3) °С в течение (24 ± 3) ч, а затем помещали в герметичный полиэтиленовый пакет. Образцы второй группы водонасыщали в вакуумной установке с давлением (2000 ± 100) Па в течение (5 ± 1) мин. После доведения давления до атмосферного образцы в воде не выдерживали. Насыщенные водой образцы помещали в полиэтиленовые пакеты, каждый отдельно, и добавляли (10 ± 1) мл воды. Образцы в плотно закрытых полиэтиленовых пакетах помещали в морозильную камеру при температу-

² ГОСТ Р 58952.1–2020. Дороги автомобильные общего пользования. Эмульсии битумные дорожные. Технические требования.

³ ГОСТ 31108–2020. Цементы общественные. Технические условия.

⁴ ГОСТ 12801–98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства.

¹ ГОСТ 30491–2012. Смесей органоминеральные и грунты, укрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия.

ре минус $(18 \pm 3)^\circ\text{C}$ на срок не менее 16 ч. По прошествии указанного времени вынимали образцы из морозильной камеры и в полиэтиленовых пакетах помещали в водяной термостат при температуре $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$ на (24 ± 1) ч. Далее образцы из первой группы в герметичных пакетах и из второй группы без пакетов помещали в воду с температурой $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ на (120 ± 10) мин. Уровень воды над поверхностью образцов составлял 25 мм. После термостатирования измеряли толщину каждого образца t и определяли максимальную нагрузку при сжатии P с использованием пресса и нагрузочных пластин. Нагрузку прикладывали вертикально по диаметральной оси образца. Для каждого испытуемого образца вычисляли предел прочности при непрямом растяжении S , кПа, по формуле:

$$S = \frac{2000P}{\pi t D},$$

где P — максимальная нагрузка, Н; t — толщина образца, мм; D — диаметр образца, мм.

За результат определения предела прочности при непрямом растяжении принимали среднеарифметическое значение трех определений образцов первой группы.

Коэффициент водостойкости TSR вычисляли как отношение среднеарифметических значений пределов прочности при непрямом растяжении между второй и первой группой образцов по формуле:

$$\text{TSR} = (S_2)/(S_1),$$

где S_2 — среднеарифметическое значение предела прочности при непрямом растяжении образцов из второй группы, кПа; S_1 — среднеарифметическое значение предела прочности при непрямом растяжении образцов из первой группы, кПа.

Модуль жесткости и количество циклов до отказа определяли на образцах-балочках, сформованных из исследуемых органоминеральных смесей. Для подготовки к проведению испытаний были

сформованы образцы-плиты на приборе CRT-RC-H2 (рис. 1), при этом органоминеральная смесь и форма не нагревались. Принцип работы прибора основан на имитации работы катка: сектор цилиндра с контролируемым усилием прокатывается по поверхности образца в форме. Окончание работы происходит по достижении заданного количества циклов или степени уплотнения. В общей сложности было сформовано 36 образцов-плит для всех исследуемых органоминеральных смесей. Образцы-плиты выдерживались в камерах нормального твердения до требуемого возраста проведения испытаний.

Из образца-плиты с помощью распиловочной установки отпиливали по три образца-балочки следующих размеров: длина (380 ± 6) мм; высота (50 ± 6) мм; ширина (63 ± 6) мм. Штангенциркулем измеряли высоту и ширину образца с точностью до 0,1 мм в трех точках, равноудаленных друг от друга по длине испытуемого образца. Определяли среднее значение трех измерений каждого габарита и фиксировали его с точностью до 0,1 мм. Непосредственно перед испытанием образцы-балочки термостатировались в климатической камере при заданной температуре испытаний не менее 3 часов. Затем образец-балочку устанавливали в прибор для определения усталостного трещинообразования CRT-SA4PT-BB (рис. 2), который представляет собой серво-пневматическую систему, подающую на образец синусоидальную нагрузку с постоянной деформацией и частотой. После начала испытания на образец подавалась циклическая нагрузка с постоянной частотой и деформацией. После выбора соответствующих параметров тестирования включали установку, устанавливали необходимую периодичность записи результатов и начинали испытание. Испытания завершали, как только модуль жесткости образца снижался на 50 %. Для всех испытаний были заданы следующие условия: температура испытания $+10^\circ\text{C}$; частота приложения нагрузки 5 Гц; деформация 75 мкм/м.



Рис. 1. Прибор CRT-RC-H2

Fig. 1. CRT-RC-H2 device





Рис. 2. Прибор CRT-SA4PT-BB



Fig. 2. CRT-RC-H2 device

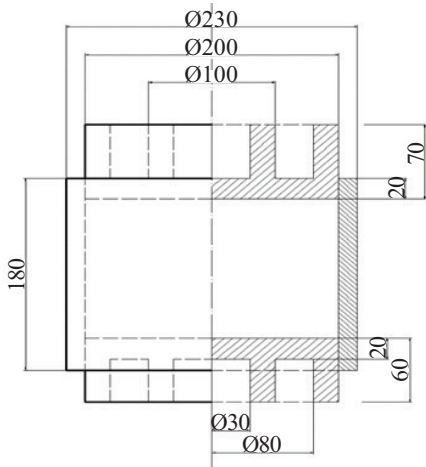


Рис. 3. Форма для изготовления образцов-цилиндров высотой 100 мм

Fig. 3. A mold for the manufacture of cylinder specimens with a height of 100 mm

Испытания проводились для органоминеральных смесей оптимального состава, выдержанных в камере нормального твердения 7, 14, 28, 42 и 56 суток.

Определение накопления остаточных деформаций осуществлялось на приборе динамических испытаний. Для изготовления цилиндрических образцов использовалась стальная форма с диаметром 200 мм и двумя вкладышами (верхний и нижний) (рис. 3).

Смесь перемешивали и засыпали в форму в 3 приема, равномерно распределяя и штыкуя каждый слой 25 раз металлическим стержнем диаметром 12–18 мм. После укладки всей смеси производили ее уплотнение в один прием методом прессования под давлением 20 МПа. Время выдержки образцов под расчетной нагрузкой составляло 3 мин. После снятия нагрузки образец извлекался из формы вместе с нижним вкладышем (для предотвращения разрушения готового образца). Контроль высоты лабораторных образцов производился в четырех точках, принадлежащих вза-

имно перпендикулярным сечениям, проходящих через центр образца. Четыре измерения не отличались друг от друга более чем на 2 мм. Значение толщины образца вычисляли как среднее арифметическое четырех измерений. Затем образец помещался в камеру нормального твердения набора для набора прочности. Образцы на приборе ПДИ испытывали в промежуточном возрасте (1 и 7 суток) и в возрасте 14, 28, 42 и 56 суток. Перед испытанием образец помещали в стальную форму бокового обжатия (рис. 4), промежутки между стенками формы и образца заполняли гипсовым раствором. К испытанию приступали только после полного застывания гипса.

От обжимающей формы отделяли нижнее съемное основание и помещали форму с образцом непосредственно в прибор динамических испытаний (рис. 5).

Для передачи динамической нагрузки на образец использовался металлический штамп диаметром 100 мм, который размещался по центру образца. Для проверки соосности расположения штампа и толкателя подъемный стол с установленным об-

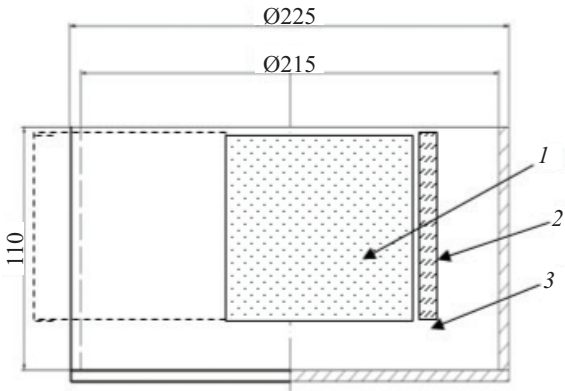


Рис. 4. Форма для испытания образцов высотой до 150 мм: 1 — образец; 2 — гипс; 3 — съемное основание

Fig. 4. A mold for testing specimens up to 150 mm high: 1 — specimen; 2 — plaster; 3 — removable base



Рис. 5. Общий вид прибора динамических испытаний
Fig. 5. General view of the dynamic test device

разцом поднимался вращением энкодера до соприкосновения верха шарнира с толкателем. При верном расположении образца и штампа металлический шар штампа должен попасть в углубление толкателя.

Испытания проводились в автоматическом режиме с использованием разработанной программы PDI. Предварительно в программу были внесены следующие исходные данные: частота приложений нагрузки — 15 Гц; максимальная нагрузка — 320 кг (0,4 МПа); температура испытания — без нагрева; количество приложений нагрузки — 400 000. По достижении заданного количества приложений нагруз-

ки прибор отключался в автоматическом режиме. По результатам экспериментальных исследований строился график зависимостей деформаций, мм, от количества приложений нагрузки (времени).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический анализ материалов из побочных промышленных продуктов предполагает элементный анализ, позволяющий выявить органическую часть шлака, а также оценить возможную карбонизацию и гидратацию соединений.

Результаты атомно-эмиссионной спектроскопии исследуемого шлака представлены в табл. 1.

Химический состав исследуемого материала определялся методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой и представлен в оксидной форме в табл. 2.

Результаты дифрактометрического анализа показали, что образцы представлены в основном портландитом ($\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$), магнетитом (Fe_3O_4), бруситом ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), кальцитом (CaCO_3), сперритом ($2\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{CaCO}_3$), алюминатом кальция ($5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$), шпинелью (MgAl_2O_4), периклазом (MgO), силикатом кальция (Ca_2SiO_4).

По результатам петрографического исследования сталеплавильный конверторный шлак можно отнести к кристаллическим изверженным породам типа долеритов и габбро-долеритов.

Шлаковые материалы с высоким содержанием двух и трехвалентных катионов Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , Fe^{+3} образуют сравнительно прочные и плотные системы.

Хуже взаимодействуют с битумом зерна щебня, песка и частицы порошка с высоким потенциалом отрицательного заряда и значительным количеством адсорбционных центров в виде ионов O^{-2} (кварцит, гранит и т.д.). При контакте с органическим вяжущим такие материалы вызывают явление отрицательной

Табл. 1. Результаты атомно-эмиссионной спектроскопии исследуемого образца сталеплавильного щебня
Table 1. Results of atomic emission spectrometry of the studied specimen of steelmaking crushed stone

Химический элемент A chemical element	Фракция, мм Fraction, mm				
	Менее 0,063 Less than 0.063	От 0,063 до 0,250 From 0.063 to 0.250	От 0,250 до 0,500 From 0.250 to 0.500	От 4,0 до 10,0 From 4.0 to 10.0	Более 10,0 More than 10.0
C, %	1,54	1,31	1,00	0,77	0,69
S, %	0,14	0,12	0,10	0,07	0,06
Fe, %	12,88	16,50	21,00	18,88	18,50
Ca, %	30,00	29,40	28,10	32,10	32,60
Mg, %	4,88	3,80	2,94	2,29	3,04
Mn, %	0,95	1,01	0,98	1,39	1,84
Cr, %	0,09	0,11	0,10	0,13	0,14
Zn, %	0,07	0,08	0,08	0,06	0,17
Al, %	1,11	1,22	1,30	1,41	2,03
Si, %	5,78	5,78	6,04	5,14	7,14
Ti, %	0,13	0,15	0,19	0,21	0,26
V, %	0,08	0,09	0,08	0,10	0,11

Табл. 2. Химический состав исследуемого образца сталеплавильного шлака

Table 2. Chemical composition of the steelmaking slag specimen under study

Фракция, мм Fraction, mm	Менее 0,063 Less than 0.063	От 0,063 до 0,250 From 0.063 to 0.250	От 0,250 до 0,500 From 0.250 to 0.500	От 4,0 до 10,0 From 4.0 to 10.0
Fe ₃ O ₄ , %	17,8	22,8	29	23,5
CaO, %	42,0	41,2	39,3	44,7
MgO, %	8,1	6,3	4,9	4,5
Al ₂ O ₃ , %	2,1	2,3	2,5	3,1
SiO ₂ , %	12,4	12,39	12,9	12,0

адсорбции. При объединении минеральных материалов с вяжущим наряду с сорбционными процессами происходит его фильтрация внутрь зерен минерального материала.

У металлургических шлаков (относительно гидрофобных материалов) этот процесс протекает интенсивно и зависит главным образом от характера пористости. Для песчаников и гранитов (более гидрофильных материалов) этот процесс менее выражен и обуславливается микропористостью за счет капиллярной фильтрации. Наличие микропор на поверхности зерен приводит к избирательной диффузии компонентов органического вяжущего. Масла проникают по капиллярам в зерна на большую глубину. Смолы из-за меньшей подвижности и большей активности проникают на меньшую глубину.

В целом взаимодействие органического вяжущего с кристаллическими шлаками различного сложения протекает интенсивно, так как на их границе реализуются физические, механические, химические, электростатистические и диффузионные процессы. А поэтому адгезионные связи на границе «вяжущее – шлаковый материал» прочные и устойчивые к воздействию окружающей среды.

Повышенное содержание кальциевых соединений (табл. 2) обуславливает лучшее сцепление шлаков с органическим вяжущим в сравнении с кислыми породами. Исследования для изучения характера взаимодействия битума со шлаками, проводимые ранее [5], установили, что относительно плотные с микропористым сложением кристаллической структуры шлаки сорбируют органическое вяжущее со значительным изменением его химического группового состава. От центра к периферии зерна размещаются масла, а затем смолы. Асфальтены, почти не проникая вглубь, постепенно переходят к объемному битуму.

Экспериментальные исследования по оценке степени воздействия шлаковых материалов на свойства органоминеральных смесей для слоев основания дорожных одежд позволили выявить их положительное влияние [11–13] не только на прочностные показатели физико-механических свойств, но и на эксплуатационные показатели качества, непосредственно оказывающие влияние на продолжительность их срока службы.

Экспериментально установлено, что при содержании 2 % портландцемента в органоминеральных сме-

сях показатели «предел прочности на сжатии при температуре 20 °С» (рис. 6) и «предел прочности на сжатии при температуре 50 °С» (рис. 7) в смесях из шлаковых материалов выше на 20–30 %, чем в смесях из природных минеральных материалов плотной горной породы [14, 15].

При 4 % портландцемента наибольшей прочностью на сжатие при температуре 20 и 50 °С (рис. 6, 7) обладают смеси из конверторных шлаков, что обусловлено их плотной структурой, в отличие от смесей из доменных шлаков, что во многом связано с повышенным набуханием данных смесей из-за пористой структуры доменных шлаков [16].

Анализ результатов испытаний образцов из органоминеральных смесей по показателям «водостойкость» и «водостойкость при длительном водонасыщении» показал, что водостойкость органоминеральных смесей из конверторных шлаков [17] практически не изменяется от процентного содержания портландцемента и является лучшей относительно всех исследуемых смесей.

Показатель «предел прочности при непрямом растяжении» с увеличением процентного содержания битумной эмульсии и портландцемента возрастает.

Анализ результатов испытаний (рис. 8) позволил сделать вывод, что в образцах из шлаковых материалов [18] при равных условиях испытаний наблюдается увеличение фактических значений показателя «предел прочности при непрямом растяжении» относительно результатов испытаний образцов из органоминеральной смеси из природных минеральных материалов.

Таким образом, требуемые результаты могут быть достигнуты при меньшем содержании цемента в смеси за счет активности самих шлаков и их химического состава [19, 20].

Показатель «водостойкости TSR» (рис. 9) в смесях из шлаковых материалов выше, чем у смесей из природных минеральных материалов, что во многом связано с высоким содержанием кальциевых соединений (табл. 2) в шлаковых материалах и за счет этого — лучшим сцеплением вяжущего с поверхностью шлаковых частиц.

Результаты испытаний органоминеральных смесей, укрепленных 4 % битумной эмульсии с добавлением 4 % портландцемента, по показателям эксплуатационных свойств «модуль жесткости» и «коли-

Табл. 3. Модуль жесткости образцов-балочек из органоминеральных смесей, укрепленных 4 % битумной эмульсии с добавлением 4 % портландцемента

Table 3. Stiffness modulus of beam specimens made of organomineral mixtures reinforced with 4 % bituminous emulsion with 4 % Portland cement added

Наименование смеси Name of mixture	Модуль жесткости, МПа Modulus of rigidity, MPa				
	Возраст испытанных образцов, в сутках Age of tested specimens, in days				
	7	14	28	42	56
Органоминеральная смесь из природных минеральных материалов Organomineral mixture of natural mineral materials	7600	8800	9300	9400	9450
Органоминеральная смесь из конверторных шлаков Organomineral mixture from converter slag	8200	9400	10 200	10 500	10 750
Органоминеральная смесь из доменных шлаков Organomineral mixture from blast furnace slag	7950	9150	9850	10 150	10 300

Табл. 4. Количество циклов до отказа образцов-балочек из органоминеральных смесей, укрепленных 4 % битумной эмульсии с добавлением 4 % портландцемента

Table 4. Number of cycles to failure of beam specimens made of organomineral mixtures reinforced with 4 % bituminous emulsion with 4 % Portland cement added

Наименование смеси Name of mixture	Количество циклов до отказа Number of cycles to failure				
	Возраст испытанных образцов, в сутках Age of tested specimens, in days				
	7	14	28	42	56
Органоминеральная смесь из природных минеральных материалов Organomineral mixture of natural mineral materials	93 300	92 200	91 200	90 150	88 750
Органоминеральная смесь из конверторных шлаков Organomineral mixture from converter slag	86 200	88 500	89 100	90 400	91 200
Органоминеральная смесь из доменных шлаков Organomineral mixture from blast furnace slag	83 400	86 100	88 200	89 850	91 100

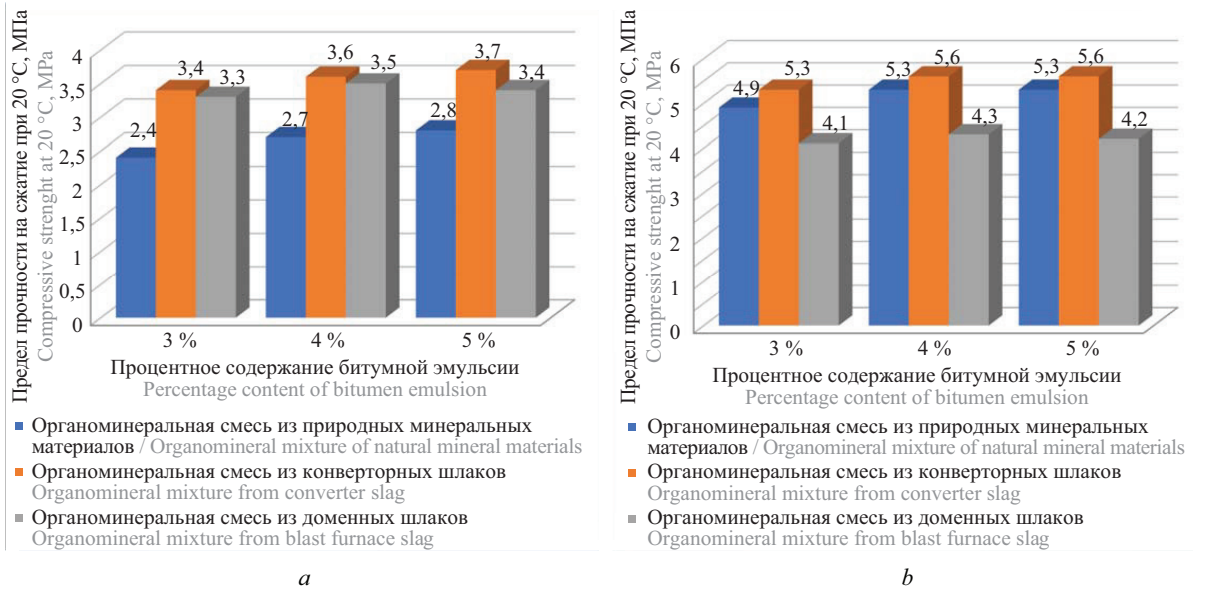


Рис. 6. Предел прочности на сжатие при температуре 20 °С в зависимости от процентного содержания битумной эмульсии: а — при 2 % портландцемента; б — при 4 % портландцемента

Fig. 6. Compressive strength at a temperature of 20 °C depending on the percentage of bitumen emulsion content: a — at 2 % Portland cement; b — at 4 % Portland cement

чество циклов до отказа» представлены в табл. 3, 4. Органоминеральные смеси из шлаковых материалов обладают большим модулем жесткости, который возрастает в зависимости от времени выдерживания образцов-балочек в камере нормального твердения [21, 22], что обусловлено процессами гидратации и омоноличивания, протекающими в шлаковых материалах со временем.

Важным показателем качества является устойчивость к накоплению остаточных деформаций.

Как известно, слои основания устраиваются достаточно большой толщины, а их качество оказывает непосредственное влияние на долговечность конструктивных вышележащих слоев из асфальтобетона.

Результаты на накопление остаточных деформаций представлены на рис. 10.

Установлено, что к 28-м суткам времени набора прочности органоминеральных смесей, укрепленных комплексным вяжущим, происходит резкое уменьше-

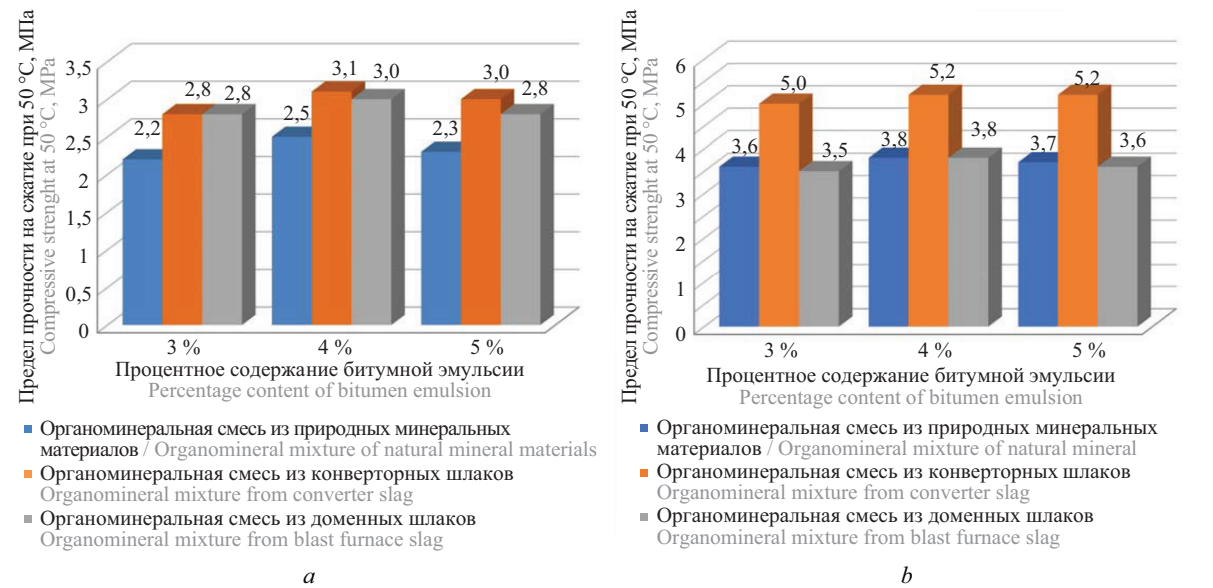


Рис. 7. Предел прочности на сжатие при температуре 50 °С в зависимости от процентного содержания битумной эмульсии: а — при 2 % портландцемента; б — при 4 % портландцемента

Fig. 7. Compressive strength at a temperature of 50 °C depending on the percentage of bitumen emulsion content: a — at 2 % Portland cement; b — at 4 % Portland cement

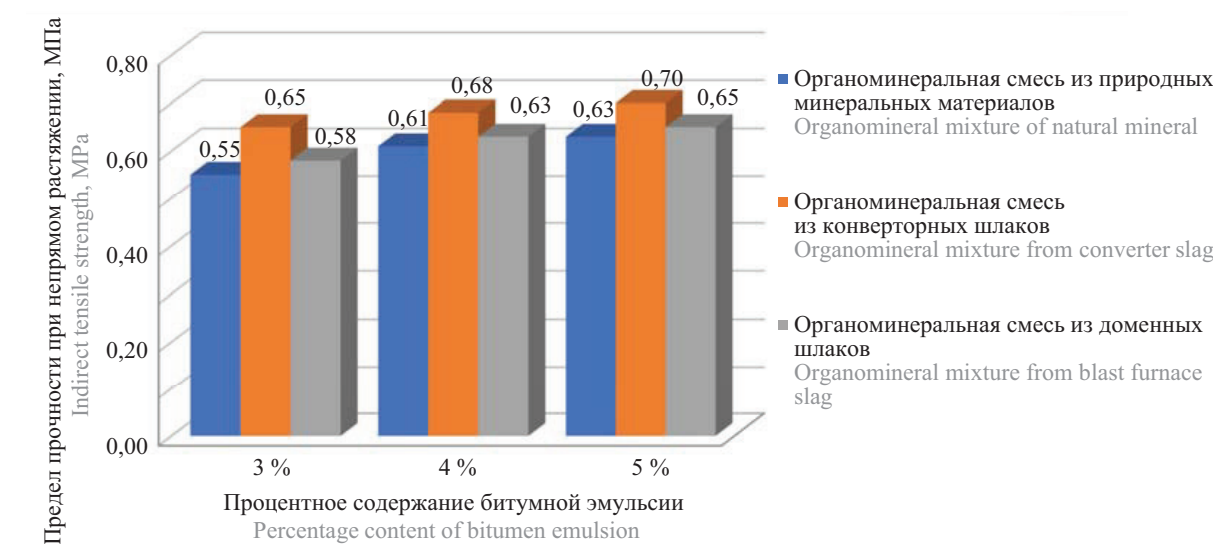


Рис. 8. Предел прочности при непрямом растяжении в зависимости от процентного содержания битумной эмульсии при 4 % портландцемента

Fig. 8. Indirect tensile strength as a function of percentage of bitumen emulsion at 4 % Portland cement

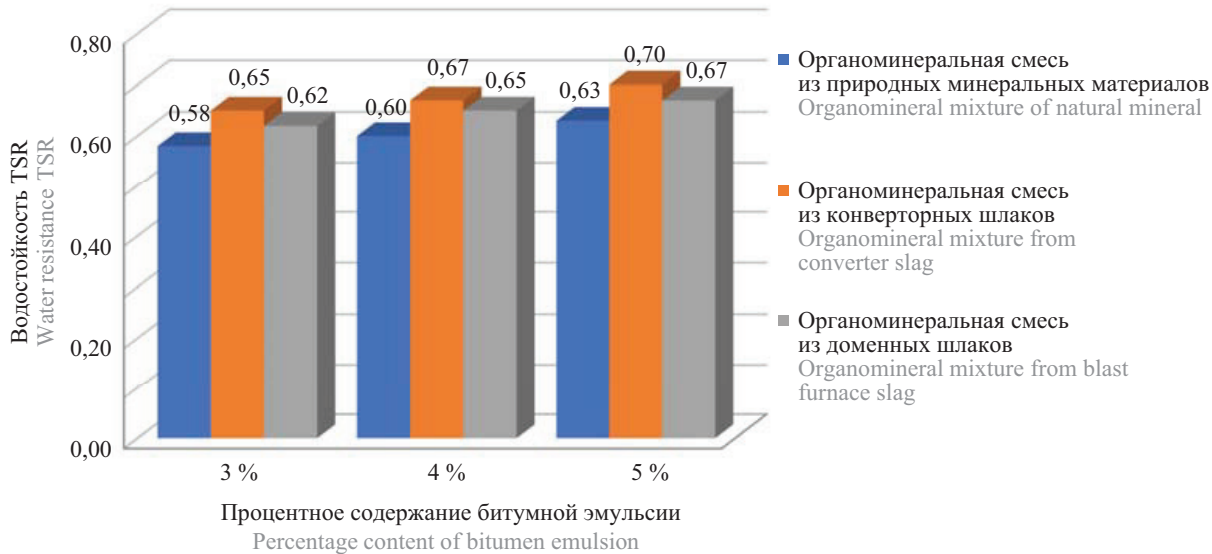


Рис. 9. Показатель «водостойкости TSR» в зависимости от процентного содержания битумной эмульсии при 4 % портландцемента

Fig. 9. Water resistance TSR as a function of percentage of bitumen emulsion at 4 % Portland cement

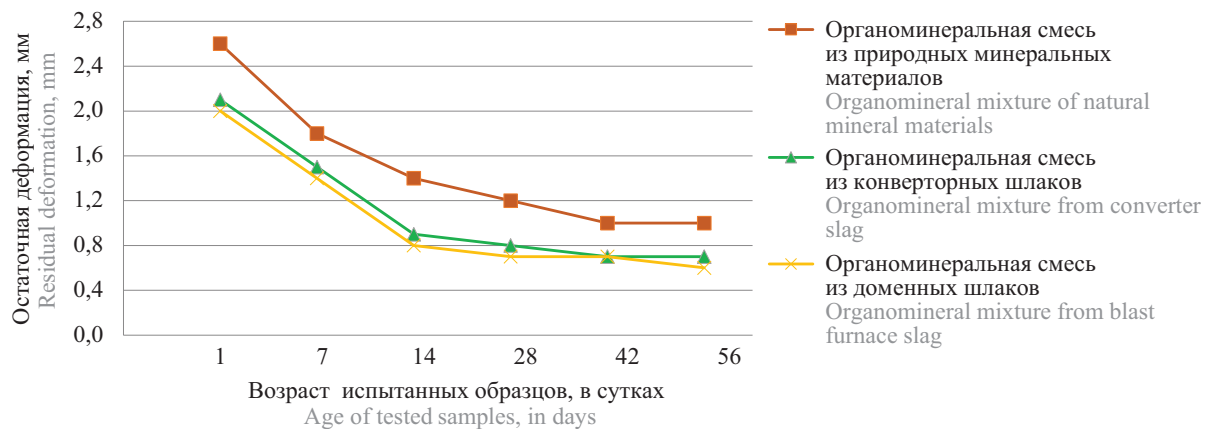


Рис. 10. Накопление остаточных деформаций в образцах из органоминеральных смесей, укрепленных 4 % битумной эмульсии с добавлением 4 % портландцемента

Fig. 10. Accumulation of residual deformations in specimens made of organomineral mixtures reinforced with 4 % bituminous emulsion and 4 % Portland cement added

ние накопления остаточных деформаций во всех исследуемых смесях.

Устойчивость к накоплению остаточных деформаций в органоминеральных смесях из шлаковых материалов на 30–35 % выше, чем в смесях из природных минеральных материалов плотной горной породы. При испытании образцов на 42 и 56-е сутки выдерживания в камере нормального твердения продолжается незначительное уменьшение накопления остаточных деформаций для органоминеральных смесей из шлаковых материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химический анализ сталеплавильных шлаков, анализ их физических и физико-механических

свойств, а также изучение механизма их взаимодействия с вяжущими позволили получить органоминеральные смеси оптимального гранулометрического состава с высокими физико-механическими и эксплуатационными показателями качества.

Установлено, что по своим свойствам шлаковые материалы не уступают природным материалам и могут быть использованы в качестве альтернативного материала в дорожном строительстве.

Предложенные методы испытаний органоминеральных смесей по показателям эксплуатационных свойств позволили выявить преимущества шлаковых материалов относительно природных минеральных материалов.

Впервые получены значения остаточных деформаций, модуля жесткости и количества циклов до отказа в органоминеральных смесях из природных и шлаковых материалов, что может быть использовано в дальнейшем при разработке нормативно-технической документации и при принятии проектных решений.

Применение органоминеральных смесей из шлаковых материалов в слоях основания на 30–35 % замедляет процессы накопления остаточных деформаций относительно аналогичных смесей из природных минеральных материалов, что позволяет продлить срок службы конструктивного слоя дорожной одежды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Abdullah H.H., Shahin M.A., Walske M.L., Karrech A.* Cyclic behaviour of clay stabilised with fly-ash based geopolymers incorporating ground granulated slag // *Transportation Geotechnics*. 2021. No. 26. P. 100430. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100430

2. *Шестаков Н.И., Кориунов А.В., Путилин С.В.* Перспективы применения шлака медеплавильного производства в дорожном строительстве // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 6. С. 90–97. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-98-6-90-97. EDN HSHJQP.

3. *Пименов А.Т., Прибылов В.С.* Применение шлаковых заполнителей в составе асфальтобетона для повышения долговечности дорожных покрытий // *Вестник СибАДИ*. 2019. № 16 (6). С. 766–769. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-6-766-779. EDN UDBGMM.

4. *Motevalizadeh S.M., Sedghi R., Rooholamini H.* Fracture properties of asphalt mixtures containing electric arc furnace slag at low and intermediate temperatures // *Construction and Building Materials*. 2020. No. 240. Article 117965. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117965

5. *Keymanesh M.R., Ziari H., Zalnezhad H., Zalnezhad M.* Mix design and performance evaluation of micro-surfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler // *Construction and Building Materials*. 2020. Article 121336. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121336

6. *Orešković M., Santos J., Mladenović G., Rajaković-Ognjanović V.* The feasibility of using copper slag in asphalt mixtures for base and surface layers based on laboratory results // *Construction and Building Materials*. 2023. P. 384. Article 131285. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131285

7. *Raposeiras A.C., Movilla-Quesada D., Bilbao-Novoa R., Cifuentes C., Ferrer-Norambuena G., Castro-Fresno D.* The use of copper slags as an aggregate replacement in asphalt mixes with RAP: physical-chemical and mechanical behavioural analysis // *Construction and Building Materials*. 2018. No. 190. Pp. 427–438. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.120

8. *Yang J., Liu L., Zhang G., Ding Q., Sun X.* The Preparation of Ground Blast Furnace Slag-Steel Slag Pavement Concrete Using Different Activators and Its Performance Investigation // *Buildings*. 2023. No. 13 (7). P. 1590. DOI: 10.3390/buildings13071590

9. *Cahyani R.A.T., Rusdianto Y.* An Overview of Behaviour of Concrete with Granulated Blast Furnace Slag as Partial Cement Replacement // *IOP Conference Series*

Earth and Environmental Science. 2021. No. 933 (1). P. 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/933/1/012006

10. *Ahmad J., Kontoleon K.J., Majidi A., Naqash M.T., Deifalla A.F., Ben Kahla N. et al.* A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production // *Sustainability*. 2022. No. 14. P. 8783. DOI: 10.3390/su14148783

11. *Popescu D., Burlacu A.* Considerations on the benefits of using recyclable materials for road construction // *Romanian Journal of Transport Infrastructure*. 2017. No. 6. Pp. 43–53. DOI: 10.1515/rjti-2017-0053

12. *Icu L.M., Corbu O., Iliescu M., Dumitras D.G.* Using the blast furnace slag as alternative source in mixtures for the road concrete for a more sustainable and a cleaner environment // *Romanian Journal of Transport Infrastructure*. 2020. No. 50. Pp. 545–555.

13. *Ling Y., Wang K., Li W., Shi G., Lu P.* Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash — Based engineered geopolymers composites // *Composites Part B: Engineering*. 2019. No. 164. Pp. 747–757. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.01.092

14. *Thakur Nisha, Saklecha P.P.* Comparison of properties of steel slag and natural aggregate for road construction. 2019. URL: <https://ssrn.com/abstract=3376488> DOI: 10.2139/ssrn.3376488

15. *Li Chuangmin, Liu Qiangdong, Ding Xikun, Liu Lubiao, Li Minggu, Li Huihui et al.* Large-size macadam mixture stabilized with industrial solid waste fly ash and slag powder: A new mixture to improve the performance of pavement base material. URL: <https://ssrn.com/abstract=4697933> DOI: 10.2139/ssrn.4697933

16. *Черникова И.И., Кострикина Т.В., Тюмнева К.В., Ермолаева Т.Н.* Применение стандартных образцов доменных, сталеплавильных, конверторных шлаков и сварочных плавящихся флюсов при разработке методики анализа шлакообразующих смесей методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой // *Стандартные образцы*. 2017. № 3–4. С. 29–40. DOI: 10.20915/2077-1177-2017-13-3-4-29-40. EDN USNGNX.

17. *Zalnezhad M., Hesami E.* Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2020. No. 7. Pp. 215–226. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.12.005

18. *Смирнов Д.С., Мавлиев Л.Ф., Хузиахметова К.Р., Мотыгуллин И.Р.* Влияние минеральной добавки на основе молотого доменного шлака на свойства

бетонов и бетонных смесей // Известия КГАСУ. 2022. № 4 (62). С. 61–69. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_61

19. Behiry A.E.A.E.M. Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement // Ain Shams Engineering Journal. 2013. Vol. 4. No. 1. Pp. 43–53. DOI: 10.1016/j.asej.2012.07.006

20. Papayianni I., Anastasiou E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag // Cement and Concrete Composites. 2012. No. 34. Pp. 400–407. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.015

21. Li J., Cao S., Yilmaz E. Characterization of macro mechanical properties and microstructures of cement-based composites prepared from fly ash, gypsum and steel slag // Minerals. 2022. No. 12. P. 6. DOI: 10.3390/min12010006

22. Yüksel I., Bilir T., Ozkan Ö. Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate // Building & Environment. 2007. No. 42 (7). Pp. 2651–2659. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.07.003

Поступила в редакцию 4 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 3 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 15 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Анатольевич Чернов** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильных дорог; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 34400, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; РИНЦ ID: 649095, Scopus: 57204526095, ResearcherID: ADF-9841-2022, ORCID: 0009-0007-5532-2604; sergey_a_chernov@mail.ru;

Евгений Валерьевич Леконцев — кандидат технических наук, руководитель Центра инновационных компетенций; **Центр инновационных компетенций ООО «Доринжсервис»**; 346780, г. Азов, ул. Южная, д. 7; РИНЦ ID: 781914, ORCID: 0009-0006-4245-6286; cikdis@mail.ru;

Виктория Сергеевна Шрейнер — ассистент кафедры автомобильных дорог; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 34400, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; РИНЦ ID: 1234101; hanna0504@mail.ru;

Александр Владимирович Фукс — кандидат экономических наук, заместитель генерального директора; **Общество с ограниченной ответственностью «БФБ» (ООО «БФБ»)**; 121205, г. Москва, б-р Большой (Инновационного Центра Сколково), д. 42, стр. 1, эт. 0, пом. 327 РАБ 2; comerc@dornerud.ru;

Алексей Игоревич Пискунов — начальник отдела развития продаж и технической поддержки; **Публичное акционерное общество «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК»)**; 398040, г. Липецк, пл. Металлургов, д. 2; piskunov_ai@nlmk.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Abdullah H.H., Shahin M.A., Walske M.L., Karrech A. Cyclic behaviour of clay stabilised with fly-ash based geopolymer incorporating ground granulated slag. *Transportation Geotechnics*. 2021; 26:100430. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100430

2. Shestakov N.I., Korshunov A.V., Putilin S.V. Prospects for the application of copper melting slag in road construction. *Building and Reconstruction*. 2021; (6):90-97. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-98-6-90-97. EDN HSHJQP. (rus.).

3. Pimenov A.T., Pribylov V.S. The use of slag aggregates in asphalt concrete to increase the durability of road surfaces. *Bulletin of SibADI*. 2019; 16(6):766-769. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-6-766-779. EDN UDBGMM. (rus.).

4. Motevalizadeh S.M., Sedghi R., Rooholamini H. Fracture properties of asphalt mixtures containing electric arc furnace slag at low and intermediate temperatures. *Construction and Building Materials*. 2020; 240:117965. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117965

5. Keymanesh M.R., Ziari H., Zalnezhad H., Zalnezhad M. Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler. *Construction and Building Materials*. 2020; 121336. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121336

6. Orešković M., Santos J., Mladenović G., Rajaković Ognjanović V. The feasibility of using copper slag in asphalt mixtures for base and surface layers based on laboratory results. *Construction and Building Materials*. 2023; 384:131285. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131285

7. Raposeiras A.C., Movilla-Quesada D., Bilbao-Novoa R., Cifuentes C., Ferrer-Norambuena G., Castro-Fresno D. The use of copper slags as an aggregate replacement in asphalt mixes with RAP: physical-chemical and mechanical behavioural analysis. *Construction and Building Materials*. 2018; 190:427-438. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.120

8. Yang J., Liu L., Zhang G., Ding Q., Sun X. The Preparation of ground blast furnace slag-steel slag pavement concrete using different activators and its per-

formance investigation. *Buildings*. 2023; 13(7):1590. DOI: 10.3390/buildings13071590

9. Cahyani R.A.T., Rusdianto Y. An overview of behaviour of concrete with granulated blast furnace slag as partial cement replacement. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021; 933(1):012006. DOI: 10.1088/1755-1315/933/1/012006

10. Ahmad J., Kontoleon K.J., Majdi A., Naqash M.T., Deifalla A.F., Ben Kahla N. et al. A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in concrete production. *Sustainability*. 2022; 14:8783. DOI: 10.3390/su14148783

11. Popescu D., Burlacu A. Considerations on the benefits of using recyclable materials for road construction. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*. 2017; 6:43-53. DOI: 10.1515/rjti-2017-0053

12. Icula L.M., Corbu O., Iliescu M., Dumitras D.G. Using the blast furnace slag as alternative source in mixtures for the road concrete for a more sustainable and a cleaner environment. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*. 2020; 50:545-555.

13. Ling Y., Wang K., Li W., Shi G., Lu P. Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash — Based engineered geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 164:747-757. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.01.092

14. Thakur Nisha, Saklecha P.P. *Comparison of Properties of Steel Slag and Natural Aggregate for Road Construction*. 2019. URL: <https://ssrn.com/abstract=3376488> DOI: 10.2139/ssrn.3376488

15. Li Chuangmin, Liu Qiangdong, Ding Xikun, Liu Lubiao, Li Minggu, Li Huihui et al. *Large-Size macadam mixture stabilized with industrial solid waste fly ash and slag powder: A new mixture to improve the performance of pavement base material*. URL: <https://ssrn.com/abstract=4697933> DOI: 10.2139/ssrn.4697933

16. Chernikova I.I., Kostrikina T.V., Tyumneva K.V., Ermolaeva T.N. Using reference materials of blast furnace slag, steelmaking slag, converter slag and fused fluxes when developing a procedure for analysis of slag-forming mixtures using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Reference Materials*. 2017; 3-4:29-40. DOI: 10.20915/2077-1177-2017-13-3-4-29-40. EDN USNGNX. (rus.).

17. Zalnezhad M., Hesami E. Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2020; 7:215-226. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.12.005

18. Smirnov D.S., Mavliev L.F., Khuziakmetova K.R., Motygullin I.R. Effect of mineral additive based on ground blast furnace slag on the properties of concrete and concrete mixtures. *News KSUAE*. 2022; 4(62):61-69. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_61

19. Behiry A.E.A.E.M. Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement. *Ain Shams Engineering Journal*. 2013; 4(1):43-53. DOI: 10.1016/j.asej.2012.07.006

20. Papayianni I., Anastasiou E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. 2012; 34:400-407. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.015

21. Li J., Cao S., Yilmaz E. Characterization of Macro Mechanical Properties and Microstructures of Cement-Based Composites Prepared from Fly Ash, Gypsum and Steel Slag. *Mineral*. 2022; 12:6. DOI: 10.3390/min12010006

22. Yüksel I., Bilir T., Ozkan Ö. 2007. Durability of Concrete Incorporating Non-Ground Blast Furnace Slag and Bottom Ash as Fine Aggregate. *Building & Environment*. 2007; 42(7):2651-2659. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.07.003

Received March 4, 2024.

Adopted in revised form on October 3, 2024.

Approved for publication on October 15, 2024.

B I O N O T E S: **Sergey A. Chernov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Highways; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin sq., Rostov-on-Don, 34400, Russian Federation; RSCI ID: 649095, Scopus: 57204526095, ResearcherID: ADF-9841-2022, ORCID: 0009-0007-5532-2604; sergey_a_chernov@mail.ru;

Evgeny V. Lekontsev — Candidate of Technical Sciences, Head of the Center for Innovative Competencies; **Center for Innovative Competencies Dorinzhservice LLC**; 7 Yuzhnaya str., Azov, 346780, Russian Federation; RSCI ID: 781914, ORCID: 0009-0006-4245-6286; cikdis@mail.ru;

Victoria S. Schreiner — Assistant of the Department of Highways; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin sq., Rostov-on-Don, 34400, Russian Federation; RSCI ID: 1234101; hanna0504@mail.ru;

Alexander V. Fuchs — Candidate of Economic Sciences, Deputy General Director; **Limited Liability Company “BFB” (LLC “BFB”)**; 42 Bolshoy Boulevard (Skolkovo Innovation Center), 1 floor, 0 room, 327 ROOM 2, Moscow, 121205, Russian Federation; comerc@dornerud.ru;

Alexey I. Piskunov — Head of Sales Development and Technical Support Department; **Public Joint Stock Company “Novolipetsk Iron and Steel Works” (NLMK PJSC)**; 2 Metallurgov sq., 2 Lipetsk, 398040, Russian Federation; piskunov_ai@nlmk.com.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the publication.

The authors declare no conflicting interests.

Особенности проектирования систем гидротранспорта горнообогатительных фабрик

Людмила Всеволодовна Волгина¹, Станислав Алексеевич Сергеев¹,
Анастасия Андреевна Романова²

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

² Акционерное общество «Институт «Оргэнергострой» (АО ОЭС); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются особенности проектирования системы гидротранспорта, являющейся частью технологической цепочки переработки руды. Проведен критический анализ текущих характеристик пульпопровода хвостового хозяйства горно-обогатительного комплекса «Рябиновский» (ГОК «Рябиновский»), расположенного около г. Алдана. При гидравлических расчетах двухфазных потоков исходными данными были химический состав транспортируемой пустой породы, характеристики производительности обогатительной фабрики, геодезические данные места складирования твердых частиц.

Материалы и методы. На основе теории двухфазных потоков авторами приведены расчеты характеристик твердых частиц, потока и потерь энергии, необходимых при проектировании пульпопроводов. Инженерными задачами расчета двухфазных потоков являются расчеты потерь напора при гидротранспорте различных материалов по трубам, определение предельных скоростей, при которых транспортируемый материал еще не осаждается на дно потока, и выбор оборудования для осуществления гидравлического транспорта. Приведена зависимость удельных потерь энергии двухфазных потоков, при средних скоростях, рекомендуемых нормативными документами на основе экспериментальных данных, полученных на кафедре гидравлики МГСУ. Транспортировка твердых частиц возможна, если поток обладает для этого достаточной энергией и на дне трубопровода не образуется осадок. Средняя скорость, соответствующая режиму транспортирования без осадка, является критической скоростью двухфазного потока.

Результаты. Сформулированные рекомендации о выборе эффективного режима гидротранспорта основаны на принципе минимизации потерь энергии. Выявлен дефицит энергии потока в рассматриваемом пульпопроводе и показана необходимость использования критерия о необходимости превышения средней скорости над критической скоростью двухфазного потока.

Выводы. Обоснована необходимость использования коэффициента запаса скорости для достижения эффективного режима транспортирования. Особое внимание уделено расчету потерь напора при критической скорости транспортирования, что является основой для выбора насосного оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидротранспорт, двухфазные потоки, пульпопровод, потери напора, критическая скорость, режим гидротранспортирования, насосное оборудование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Волгина Л.В., Сергеев С.А., Романова А.А. Особенности проектирования систем гидротранспорта горнообогатительных фабрик // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1951–1962. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1951-1962

Автор, ответственный за переписку: Людмила Всеволодовна Волгина, VolginaLV@gic.mgsu.ru.

Design of hydraulic transport systems for mining and processing plants

Lyudmila V. Volgina¹, Stanislav A. Sergeev¹, Anastasia A. Romanova²

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

² Joint Stock Company "Institute "Orgenergostroy" (JSC IOES); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Peculiarities of design of the hydrotransport system, which is part of the technological chain of ore processing are considered. A critical analysis of the characteristics of the slurry pipeline of the tailing facility of the mining and processing complex "Rybinovskiy" (MPC "Rybinovskiy"), located near the city of Aldan, was carried out.

Materials and methods. In the hydraulic calculations of two-phase flows, the initial data were the chemical composition of the tailings, the basic features of the processing plant, and the geodetic data of the place of tailing storage. Based

on the theory of two-phase flows, the authors provide calculations of the characteristics of solid particles, flow and energy losses necessary for the design of slurry pipelines. The engineering tasks of calculating two-phase flows are the calculation of head losses during the hydrotransportation of various materials through slurry pipes, the determination of the maximum velocity at which the transported material is not yet deposited to the bottom of the flow and the choice of equipment for hydraulic transport. The dependence of specific energy losses of two-phase flows, at average velocity, below those recommended by regulations on the basis of experimental data obtained at the Department of "Hydraulics and Hydrotechnical Engineering", NRU MGSU, is given. Solid particles transport is possible if the flow has sufficient energy for this without sediment formation at the bottom of the pipeline. The average speed corresponding to the sediment-free transport mode is the critical velocity of the two-phase flow.

Results. The recommendation on the choice of an effective mode of hydrotransport is based on the principle of minimizing energy losses. The deficit of flow energy in the slurry pipeline is revealed and the necessity to use the criterion on the need to exceed the average velocity over the critical velocity of the two-phase flow is shown.

Conclusions. The necessity of using the speed reserve coefficient to achieve an effective mode of transportation was formulated. Particular attention is paid to the calculation of head losses at a critical transport speed, which is the basis for the choice of pumping equipment.

KEYWORDS: hydrotransport, two-phase flows, slurry pipeline, pressure losses, critical velocity, hydration mode, pumpin equipment

FOR CITATION: Volgina L.V., Sergeev S.A., Romanova A.A. Design of hydraulic transport systems for mining and processing plants. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1951-1962. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1951-1962 (rus.).

Corresponding author: Lyudmila V. Volgina, VolginaLV@gic.mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортировка твердых частиц водой в виде смеси по трубам (гидротранспортным системам, пульпопроводам) широко используется в промышленности [1–4]. В отличие от транспортировки суспензий [5–8], при гидротранспорте возникает вертикальная сила взвешивания [9–11], связанная с существованием разности в плотностях воды и твердых частиц. В настоящее время эффективно работают системы, переносящие:

- уголь [12];
- песок [13–15];
- рудные материалы, «хвосты» и т.д. [14, 16];
- ил [10];
- торф [11];
- лед [17–19];
- известь [20].

Гидротранспорт по трубопроводам является одним из видов непрерывного транспорта, который обладает рядом достоинств [21–24]:

- обеспечивает непрерывность потока высокой производительности без погрузо-разгрузочных работ¹;
- практически полностью автоматизирован, с высокими технико-экономическими показателями;
- снижает вредное воздействие на окружающую среду.

«Хвостами» обычно называют мелко диспергированные отходы различных производств после изъятия основного компонента из исходного сырья. Извлечение основного компонента может производиться механическим путем и без применения высоких температур. В этом случае «хвосты» представля-

ют собой мелкодробленую горную породу («пустая» порода) с тем или иным, обычно незначительным, содержанием того продукта, в результате добычи которого образовались эти «хвосты». В некоторых случаях извлечение ценного продукта производится не только при механическом воздействии (дроблении и классификации), но и при химической обработке различными реагентами (например, кислотами). В этом случае «хвосты» могут иметь специфические свойства (например, склонность к образованию устойчивых структур в водной среде). При некоторых процессах, связанных с обработкой при высоких температурах, «хвосты» приобретают иные свойства и поступают в поток в виде окалина и т.д.

Во многих случаях представляется технически удобным, эффективным и экономически целесообразным «хвосты» удалять от производства к местам складирования гидравлическим способом — напорным и безнапорным гидротранспортом. По причине специфических свойств «хвостов» (далее — твердых частиц) различных производств с 30-х годов прошлого столетия начались специальные изучения особенностей гидротранспортирования таких твердых частиц, которые актуальны и в настоящее время.

В теории двухфазных потоков транспортировка твердых частиц возможна, если поток обладает для этого достаточной энергией, все частицы подняты со дна и слой заилиenia (труднопроходимые области на дне в виде осадка) не образуется [25–27]. Средняя скорость, соответствующая режиму транспортирования без осадка, является критической скоростью $v_{кр}$ двухфазного потока.

Рассматриваемый в настоящей работе пульпопровод входит в состав технологической цепочки переработки руды горно-обогатительного комплекса «Рябиновый» (ГОК «Рябиновый»), расположенного около г. Алдана. Месторождение рудного золота Рябиновое расположено в Центрально-Алданском

¹ Avksentiev S.Yu., Nikolaev A.K., Dokoukin V.P. Development and operation of hydrotransport systems under severe environmental conditions. URL: http://www.rusnauka.com/18_ADEN_2012/Economics/11_113420.doc.htm

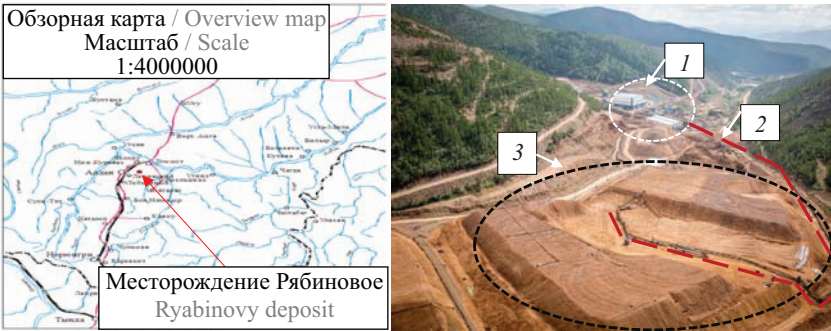


Рис. 1. Месторождение Рябиновое, система гидротранспорта: 1 — обогатительная фабрика; 2 — пульпопроводы; 3 — хвостохранилище

Fig. 1. “Ryabinovy” deposit, hydrotransport system: 1 — processing plant; 2 — pulp pipelines; 3 — tailings

Табл. 1. Характеристики работы обогатительной фабрики

Table 1. Characteristics of the processing plant work

Характеристика, размерность Characteristics, dimensionality	Обозначение Designation	Величина Magnitude	Примечание Note
Производительность ОФ, т/час Production capacity, t/h	$M_{\text{тв}} / M_s$	132,7	Массовый расход по твердому материалу Mass Flow Rate of Solid Material
Массовая доля твердого материала в смеси, % Mass fraction of solid material in the mixture, %	$P_{\text{тв}} / P_s$	43,26	Масса воды соответственно 56,74 % The mass of water is 56.74 % respectively
Производительность по воде, т/час Water capacity, t/h	M_0	255,7	Массовый расход по воде Water Mass Flow Rate
Расчетный расход двухфазного потока, м³/час Design flow rate of two-phase flow, m³/h	$Q_{\text{см}} / Q_{\text{mix}}$	306,75	Объемный расход смеси (пульпы) Volumetric flow rate of the mixture (pulp)

золотоносном районе Якутии. В состав объектов хвостового хозяйства для размещения отходов входит: хвостохранилище, пульпопровод и система возврата в технологический процесс осветленной воды, поступившей с пульпой. Хвостохранилище предназначено для складирования отвальных «хвостов» обогащения, отстоя и осветления воды в отстойном пруду. Чаша хвостохранилища создается ограждающей первичной дамбой. Первичная дамба возводится из вскрышных пород карьера с последующим наращиванием по мере заполнения. Создаваемая емкость хранилища обеспечивает складирование отходов, образующихся за 12,5 лет отработки запасов руды. Система гидротранспорта предназначена для транспортировки твердых частиц из главного корпуса обогатительной фабрики (ОФ) на хвостохранилище. В состав сооружений входят:

- пульпонасосная станция в главном корпусе с узлом опорожнения;
- магистральные пульпопроводы от главного корпуса ОФ до хвостохранилища по гребню дамбы;
- распределительные пульпопроводы, проложенные по гребню дамбы и по левому борту хвостохранилища;
- хвостохранилище.

Принципиальная схема расположения сооружений приведена на рис. 1.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

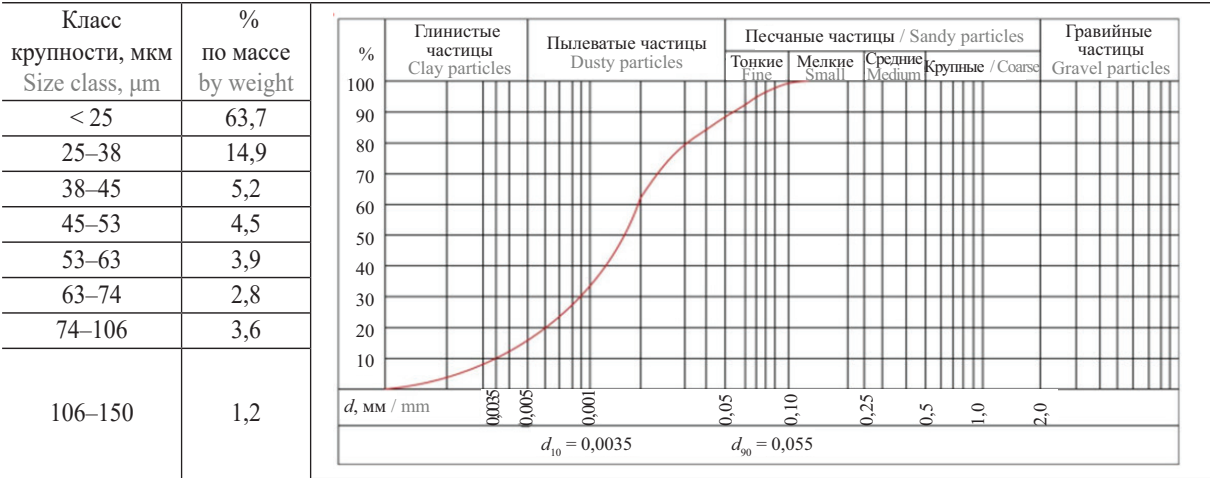
Степень неравномерности работы фабрики в течение суток по расходу смеси выражается коэффициентами $K_1 = 1,15$ и $K_2 = 0,75$.

Основной задачей настоящей работы является инженерный расчет гидротранспортной системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования гидротранспорта твердых частиц, образованных в результате переработки различных руд на территории СССР, были начаты в 1935 г. профессором, д.т.н. А.П. Юфимым (кафедра гидравлики, МИСИ). Им были исследованы твердые частицы после обработки Ононской руды ($d_{\text{ср}} = 0,2\text{--}2,5$ мм), Ново-Троицкие эфеля по трубам малых диаметров ($D = 32, 80$ мм). По экспериментальным данным получена формула для потерь напора $i_{\text{см}}$ для различных плотностей потока $\rho_{\text{см}} = 1,015\text{--}1,422$ т/м³ (т.е. для различных концентраций). В 1952 г. им же были проведены эксперименты по гидротранспорту отходов Березовской обогатительной фабрики, представляющих собой смесь песка с остат-

Табл. 2. Гранулометрический состав твердых частиц
Table 2. Granulometric composition of solid particles



ками неизвлеченной руды (плотность материала 4,5 т/м³) по относительно большим трубам (150, 200 мм). Исследуемые плотности потоков находились в диапазоне $\rho_{\text{см}} = 1,025\text{--}1,323$ т/м³. Анализ кривых гранулометрического состава (определение содержания по весу разноразмерных частиц) позволил определить коэффициент разноразмерности j и средневзвешенный диаметр твердых частиц $d_{\text{ср}} = 0,224\text{--}0,323$ мм. Экспериментальным путем определялась величина критической скорости, которая находилась в диапазоне $v_{\text{кр}} = 1,72\text{--}1,97$ м/с², и величины удельных потерь напора, представленных в виде сводных графиков потерь напора $I = f(Q_{\text{см}})$. В 1939 г. В.С. Кнороз в лаборатории ВНИИГА провел исследования по гидротранспорту отходов рудообогатительной фабрики Балхашского медеплавильного комбината, имеющих следующие физико-механические характеристики твердой составляющей $\rho_{\text{тв}} = 2,65\text{--}2,7$ т/м³, $d_{\text{ср}} = 0,056$ мм, по трубопроводу $D = 250$ мм. Критической скоростью, по определению Кнороза, считается скорость, при которой и выше которой гидравлические сопротивления, выраженные высотой столба гидросмеси, равны гидравлическим сопротивлениям при движении воды. Расчет систем гидротранспорта по этой методике приводит к большим экономически нецелесообразным запасам. В 1960 г. в МИСИ были проведены научно-исследовательские работы по определению параметров для расчета гидротранспорта хвостов и намыва карт хвостохранилищ. Результаты экспериментальных исследований были обобщены в СНиП 2.05.07–85², который является актуальным в настоящее время. Недостатком проведенных исследований для определения гидравлических сопротивлений и критических скоростей при гидротранспорте «хвостов» является то, что они пригодны для твердых частиц, аналогичных по характери-

кам рассматриваемых руд (по удельному весу, степени диспергирования, технологии обогащения основного (извлекаемого) продукта).

При проектировании и анализе эффективности пульпопроводов последовательно рассматриваются характеристики:

- твердых частиц (плотность, виды твердых частиц, геометрические размеры) [26, 27];
- смеси (соотношение твердого и жидкого компонента) [28, 29];
- потока (средние по живому сечению, минимальные скорости транспортирования), позволяющие оценить потери напора по длине транспортирования [30–34].

Характеристики транспортируемых твердых частиц

При переработке руд месторождения «Рябиновое» по рассматриваемой в регламенте технологической схеме образуется отвальный продукт — «хвосты» сорбционного выщелачивания. Химический состав твердой фазы состоит из 18 компонент, основные (по массовой доле свыше 10 %) — диоксид кремния SiO_2 (60,4 %), глинозем Al_2O_3 (16,59 %), оксид калия K_2O (13,2 %). Гранулометрический состав представлен в табл. 2.

Согласно классификации, рассматриваемые твердые частицы относятся к классу пылеватых частиц. Характеристики твердых частиц, необходимых для расчета рассматриваемого двухфазного потока, представлены в табл. 3.

Характеристики потока

Соотношение жидкого и твердого расхода в смеси определяется технологией обработки породы и является рабочей характеристикой пульпонасосной станции. Одной из основных характеристик потока является действительная объемная консистенция [12] C_0 безразмерная величина — отношение суммы объемов движущихся твердых частиц в объеме пото-

² СНиП 2.05.07–85*. Промышленный транспорт. Industrial transport (дата введения: 01.07.92).

ка между двумя поперечными сечениями к величине этого объема:

$$C_0 = \frac{\rho_{\text{см}} - \rho_0}{\rho_{\text{тв}} - \rho_0},$$

(1)

где ρ_0 и $\rho_{\text{см}}$ — соответственно, плотность воды и транспортируемой смеси.

В общем случае, понятие плотности вещества — это масса единицы его объема. Плотность двухфазного потока (смеси) существует только при движении, поскольку твердые частицы могут находиться во взвешенном состоянии, а следовательно, и двигаться, только если поток обладает достаточной энергией для их подъема. Движение обуславливает существующее распределение плотности по сечению, поэтому действительная плотность двухфазного потока зависит от распределения плотности и скорости по живому сечению потока. В теории двухфазных потоков существует два понятия плотности потока: расходная ρ_p и действительная $\rho_{\text{см}}$ плотности³. Действительная плотность рассчитывается для каждой части живого сечения (сегмента, в случае круглой трубы), а расходная плотность определяется через массовое содержание компонентов в смеси:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{M_{\text{см}}}{W_{\text{см}}},$$

(2)

где $M_{\text{см}}$, $W_{\text{см}}$ — масса и объем смеси.

Используя приведенные выше данные (см. табл. 1 и 2), рассчитывается значение действительной

³ СТО СРО-П 6054294800054–2018. Нормы проектирования хвостовых хозяйств гидрометаллургических заводов и обогатительных фабрик (дата введения: 21.12.2018).

Табл. 3. Характеристики твердых частиц

Table 3. Characteristics of solid particles

Характеристика Characteristic	Обозначение, размерность Designation, dimension	Расчетная формула Calculation Formula	Величина Magnitude	Примечание Note
Средневзвешенная крупность твердых частиц Weighted average particulate particle size	$d_{\text{ср}}$, мм $d_{\text{ва}}$, mm	$\frac{\sum d_i p_i}{100}$	0,0262	Пылеватые твердые частицы Dusty particulate matter
Коэффициент разнозернистости Different-grained coefficient	j	$3 \frac{d_{10}}{d_{90}}$	0,1909	—
Коэффициент транспортабельности Transportability coefficient	ψ	[7]	0,0225	—
Средневзвешенная плотность твердых частиц Weighted average solids density	$\rho_{\text{тв}}$, т/м ³ ρ_s , t/m ³	$\rho_{\text{тв}} = 0,67\rho_{\text{SiO}_2} +$ $+ 0,18\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3} + 0,15\rho_{\text{K}_2\text{O}}$	2,61	—

Примечание. p_i — вероятность содержания твердой частицы диаметром d_i в составе; d_{10} и d_{90} — крупности твердых частиц, меньше которых в составе содержится 10 и 90 % соответственно.

Note. p_i — probability of particulate matter diameter d_i in the composition; d_{10} и d_{90} — coarseness of particulate matter smaller than 10 and 90 per cent, respectively.

объемной консистенции $C_0 = 0,16$. Удельный вес потока — произведение плотности потока на ускорение силы тяжести $\gamma_{\text{см}} = \rho_{\text{см}}g = 1,27 \text{ кН/м}^3$.

Инженерными задачами расчета двухфазных потоков являются расчеты потерь напора при гидротранспорте твердых частиц по трубам, определение предельных скоростей, при которых транспортируемый материал еще не осаждается на дно потока, и выбор оборудования для осуществления гидравлического транспорта.

Оценка транспортирующей способности потока — одна из основных задач расчета. Транспортирующая способность представляет собой возможность рассматриваемого потока при данной скорости транспортировать, т.е. поддерживать во взвешенном (или подвижном) состоянии и переносить определенное количество твердых частиц [12]. Эффективная эксплуатация пульпопровода (и всей гидравлической системы) связана с выбором экономически наиболее выгодного (оптимального) режима транспортирования. Основными характеристиками, определяющими режим движения, являются критическая скорость и удельные потери энергии. Критическая скорость — это наименьшая средняя по живому сечению потока скорость, при которой все твердые частицы переносятся потоком. Удельные потери напора при движении двухфазного потока $i_{\text{см}}$ представляют в виде суммы удельных потерь напора при движении условно-однородной жидкости и дополнительных удельных потерь напора (рис. 2):

$$i_{\text{см}} = i_0 \cdot \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_0} + \Delta i.$$

(3)

Удельные потери напора при движении воды i_0 рассчитываются по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$i_0 = \lambda \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}. \tag{4}$$

Зависимость удельных потерь напора двухфазного потока от средней скорости, представленного кривой 2, получена экспериментально многими исследователями в различных странах на протяжении последних 80 лет. Линия 1 построена по уравнению Дарси (4). Пунктиром показан рост потерь напора при рассмотрении двухфазных потоков, которые можно классифицировать как условно однородные. Эффективные средние скорости транспортирования выбираются больше критической скорости [25, 26], поскольку при этих режимах не образуется слой заиливания (т.е. все твердые частицы переносятся потоком). Точка пересечения пунктирной линии I^* с линией 2 — граница применения двух теорий взвешивания. Правее этой точки применяется диффузионная теория взвешивания, и движение двухфазного потока рассчитывается на основе механизма взвешивания и переноса твердых частиц, который отождествляется с механизмом турбулентного переноса. Гравитационная теория (синяя штриховка, область правее критической скорости и выше пунктирной линии) рассматривает механизм взвешивания тесным образом с характеристиками твердых частиц. Автор теории М.А. Великанов (в 1943 г.) [12] указывает, что твердые частицы вмешиваются в разрушение турбулентных образований и в механизм последующего перехода энергии турбулентности в теплоту через вязкое трение слоев жидкости. Для каждой из теории составлены дифференциальные уравнения и предложены методики расчета систем гидротранспорта.

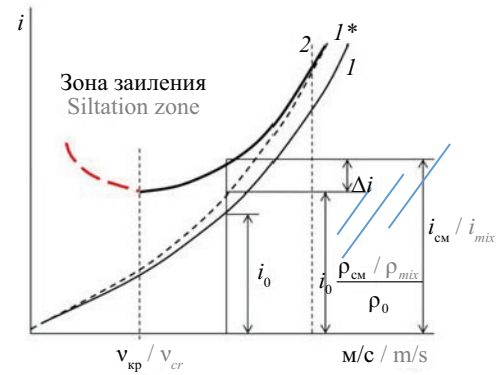


Рис. 2. Зависимость удельных потерь напора от средней скорости потока при движении воды (1) и гидросмеси (2) (I^* — условно однородная жидкость)

Fig. 2. Dependence of specific pressure losses on the average flow velocity during the movement of water (1) and hydraulic mixture (2) (I^* is a conditionally homogeneous liquid)

Область на рис. 2 левее критической скорости — область заиливания. При скоростях ниже критических потери напора растут из-за процесса осаждения твердых частиц. На рис. 3 представлены экспериментальные значения удельных потерь напора для гранулированных доменных шлаков (диаметр твердых частиц до 3 мм) и потоков с удельными весами, находящимися в диапазоне $\gamma_{см} = 1-1,5$ кН/м³. По вертикали i — в мм вод. ст. на единицу длины. На графике видно, что при транспортировке потоков со средней скоростью ниже критической скорости потери напора растут по степенной зависимости и рост относительно минимального значения (соответствующего минимальным удельным потерям энергии в области критических скоростей) может достигать 60–65 процентов, следовательно, для этих условий формулы

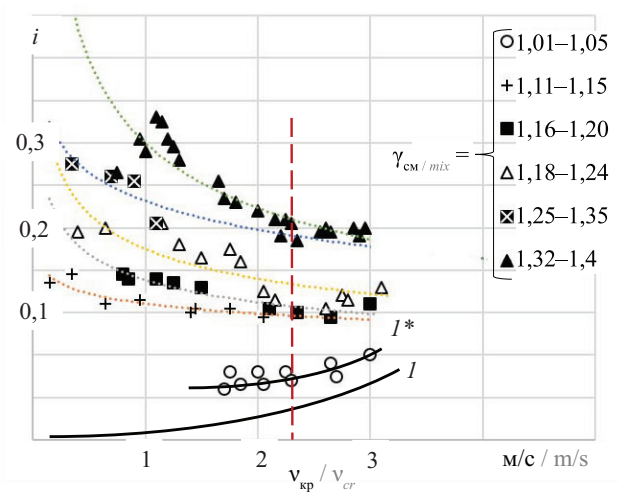


Рис. 3. Потери напора (в области заиливания) при скоростях меньше критических: 1 — вода; I^* — условно однородная жидкость

Fig. 3. Pressure losses (in the siltation area) at speeds less than critical: 1 — water; I^* — conditionally homogeneous liquid

(3) и (4) не применимы. Для потока, сопоставимого с удельным весом с рассматриваемым потоком, рост потерь напора составил 50 %.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что при скоростях ниже критической гидротранспортная система не может считаться эффективной.

Величина критической скорости зависит от диаметра трубопровода, плотности смеси, крупности частиц и для рассматриваемого потока равна (см. (5) и табл. 2) 2,08 м/с:

$$v_{кр} = 8,3\sqrt[3]{D\sqrt{C_0\Psi}}.$$

(5)

Следовательно, расход в пульпопроводе с внутренним диаметром 0,26 м должен быть не ниже: $Q_{кр} = v_{кр} \omega = 0,11 \text{ м}^3/\text{с}$. В противном случае будет образовываться слой заилиения, формулы (1) и (2) не могут быть использованы, а рост потери напора может быть выше до 50 % от минимальных (при эффективном режиме транспортирования).

Проектному расходу пульпы 306,75 м³/час соответствует проектная средняя скорость смеси $v_{см.пр} = 1,64 \text{ м/с}$, значение которой ниже критической ($v_{см.пр} < v_{кр}$), и на дне трубопровода формируется неподвижный слой (осадок). При неравномерной работе фабрики в течение суток выраженная коэффициентами $K_1 = 1,15$ и $K_2 = 0,75$ скорость будет, соответственно, $v_1 = 1,2 \text{ м/с}$ и $v_2 = 2,41 \text{ м/с}$. Режимы транспортирования необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить работу системы без заилиения (см. рис. 4). По оси ординат отложены средние скорости потока, точки — это средние скорости потока, рассчитанные для различных условий работы фабрики. Заштрихована область средних скоростей, соответствующая оптимальному режиму транспортирования.

Сопоставление рекомендованных средних скоростей транспортирования (соответствующих оптимальному режиму транспортирования — при минимальных удельных потерях напора и при отсутствии осадка) с проектными режимами ОФ показывает, что пульпопровод не будет работать эффективно, на дне трубопровода будет образовываться осадок, величину которого следует оценить и контролировать в процессе эксплуатации системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретические и экспериментальные исследования гидротранспорта позволили установить следующее:

- наиболее насыщенной твердыми частицами является нижняя, придонная область двухфазного потока; наибольшая масса твердых частиц движется в слое высотой от дна, равной примерно 1/3 диаметра трубы;
- верхняя часть горизонтального трубопровода занята водой, несущей мелкие и пылеватые частицы.

Первому и второму факторам удовлетворяет, в частности, эллиптическая форма сечения трубопровода с горизонтальной большой осью эллипса. В таком трубопроводе в слое высокой консистенции над дном может перемещаться больше грунта, чем в слое такой же толщины в круглом трубопроводе. Кроме того, относительно будет уменьшена область, не насыщенная твердым материалом, а турбулентное перемешивание в эллиптическом потоке будет интенсивнее, чем в круглом потоке того же расхода. Следовательно, транспортирующая способность эллиптического трубопровода должна быть больше, чем круглого.

Движение двухфазных потоков по круглым горизонтальным трубам с частичным заилиением трубопровода приближается к гидротранспорту по эллип-

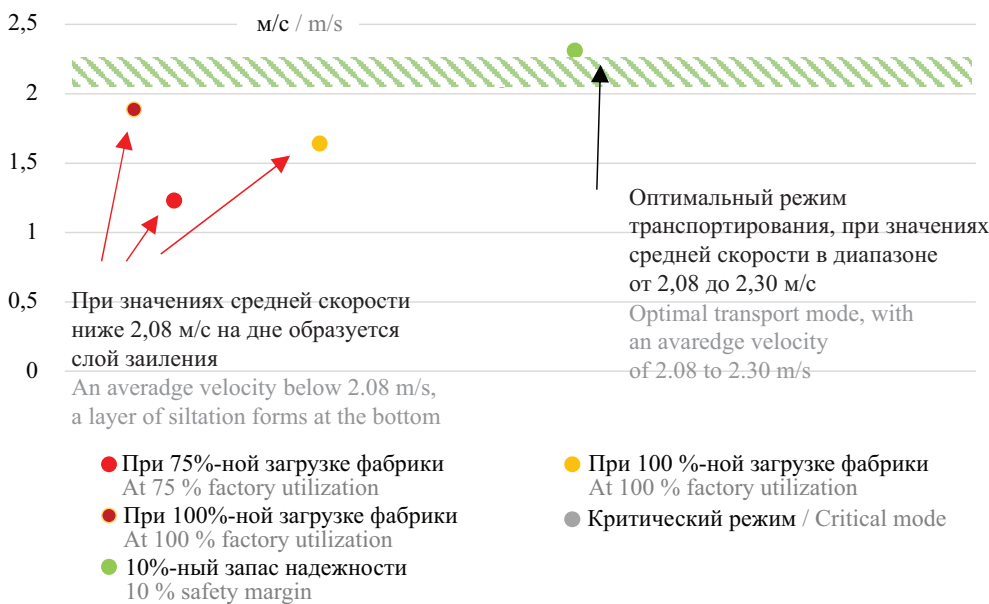


Рис. 4. Режимы транспортирования

Fig. 4. Modes of transportation

тическим трубам. Специальные исследования [12, 14] показали, что более выгодным можно считать заилиение, которое составляет 10–15 % диаметра трубы по высоте. По данным этих исследований установлено, что значение критической скорости в эллиптической трубе составляет 0,9 значения критической скорости в круглой трубе (такой же площади живого сечения).

Частичное заилиение трубопроводов может быть предусмотрено при проектировании гидротранспортной установки, поэтому необходимо производить расчет гидротранспорта по частично заиленным трубам. В то же время неправильно выполненный расчет гидротранспортной установки при незаиленном режиме может быть причиной того, что при некоторых условиях, например при значительном повышении консистенции гидросмеси, разработке более крупнозернистой породы или породы большей плотности против предусмотренной проектом, трубопровод может оказаться частично заиленным. В результате при таком заилинии образуется пробка или закупорка трубопровода.

При транспортировании «хвостов» слой заилиения является сборником для более тяжелых металлических частиц, что является способом дополнительного улавливания полезного металла или материала.

Удельные потери при гидротранспорте по частично заиленным трубам выше считаются как удельные потери напора на трение при движении воды по незаиленной трубе того же диаметра со скоростью, равной критической скорости движения (см. (5)), в которой вместо D используется значение гидравлического радиуса живого сечения трубопровода при выбранной степени заилиения.

Глубину заилиения $H_{\text{заил}}$ определяют по следующей формуле:

$$\frac{H_{\text{заил}}}{D} = 0,4 \sqrt[3]{\frac{Q_{\text{см}}}{Q} - 1}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{см}}$ — расход гидросмеси при $v_{\text{кр}}$; Q — заданный расход гидросмеси.

Формула (6) показывает, что чем меньше расход потока (а следовательно, чем левее по рис. 2 располагается средняя скорость транспортирования), тем больше образуется осадок (глубина заилиения) на дне трубопровода. При снижении расхода или аварийной остановки потока используются аварийные емкости или емкости для опорожнения пульпопроводов.

Как было указано ранее (рис. 2, 3), критической скорости соответствуют минимальные потери энергии. Величина полных потерь по длине всей трассы состоит из трех величин (линейные или потери по длине, местные и потери от перепада высот):

$$\Delta H = \Delta H_L + \Delta H_M + \Delta H_H, \quad (7)$$

Потери напора посчитаны для магистрального и распределительных трубопроводов по обычным формулам гидравлики для расчета трубопроводов:

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \zeta \frac{v^2}{2g} + h, \quad (8)$$

где λ — коэффициент гидравлических сопротивлений; L — длина трубопровода — 1740 м; D — диаметр трубопровода — 0,257 м; v — средняя скорость транспортирования; ζ — коэффициент местных сопротивлений; h — сумма геодезического перепада высот между началом и концом трубопровода (уровень пульпы в зумпфе и уровень наполнения хвостохранилища) и запаса на излив (3 м) — 82,0 м.

Коэффициент гидравлических сопротивлений считается согласно СНиП 2.05.07–85 (97) «Проектирование гидравлического транспорта»⁴ по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg \text{Re} - 1,52)^2}, \quad (9)$$

где Re — число Рейнольдса.

Суммарные потери напора составили $\Delta H = 19,06 + 1,9 + 82 = 102,96$ м, местные потери напора приняты в размере 10 % от потерь напора по длине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. При средней проектной скорости движения двухфазного потока 1,89 м/с (соответствует расходу 0,098 м³/с и коэффициенту неравномерности работы $K_1 = 1,15$) — максимальная проектная скорость пульпы — на дне трубопровода твердые частицы будут осаждаться.

2. При минимальном расходе пульпы 0,064 м³/с ($K_2 = 0,75$) на дне трубопровода будет формироваться максимальный по толщине слой заилиения.

3. Неравномерность расхода пульпы по времени (от 75 до 115 %) может привести к волновому эффекту срыва твердых частиц со дна трубопровода, что снижает технико-экономические характеристики эксплуатации всей системы гидротранспорта.

4. Рекомендуется транспортировать смесь со средней скоростью потока 2,3 м/с, что соответствует уровню $1,1v_{\text{кр}}$.

5. Начальный напор в пульпопроводе, согласно данным заказчика, соответствует 90,27 м, а суммарные потери напора составили 102,96 м, что показывает необходимость расположения пульпонасосной станции в месте соединения магистрального и распределительного трубопровода.

⁴ СП 37.13330.2012. Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07–91* (дата введения: 2013-01-01). СНиП 2.05.07–85*. Промышленный транспорт (дата введения: 01.07.92).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алешков М.В., Волгина Л.В. Кинематические характеристики двухфазных потоков при гидроабразивной резке // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 12. С. 1610–1618. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1610-1618. EDN MDNYHT.
2. Аникина С.А. Утилизация и переработка резервуарных и амбарных нефтешламов // Экологические чтения-2014. 2014. С. 102–105. EDN TMFQED.
3. Ржевский В.В. Открытые горные работы: Технология и комплексная механизация : учебник. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 552 с.
4. Федотов А.И., Шамсутдинов Э.В. Алгоритм расчета систем гидротранспорта водоугольной суспензии на объектах промышленной теплоэнергетики // Современные проблемы науки и образования 2013. № 1. С. 181–188. EDN PWAZHP.
5. Liu Y., Lv X., Zhou S., Pengfei Yu, Yun L., Bohui Sh. et al. Rheological study of low wax content hydrate slurries considering phase interactions // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2021. Vol. 94. Pp. 104–106. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104-106
6. Chen Y.C., Shi B.H., Fu Sh., Li Q., Yao H., Liu Ya. et al. Kinetic and rheological investigation of cyclopentane hydrate formation in waxy water-in-oil emulsions // Fuel. 2021. P. 119568. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119568
7. Ran F., Xu Ch., Chen Yu., Cong R, Fang G. Numerical flow characteristics of microencapsulated phase change slurry flowing in a helically coiled tube for thermal energy storage // Energy. 2021. Vol. 223. Pp. 120–128. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120128
8. Liu Z., Li Ya., Wang J., Zhang M., Liu W., Lang Chen et al. Rheological investigation of hydrate slurry with marine sediments for hydrate exploitation // Energy. 2022. Vol. 259. P. 124958. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124958
9. Ахмеров А.В., Осипов А.Л., Долгова А.Н., Файзуллина Г.Р. Энергосберегающая технология обезвреживания отработанного вторичного активного ила для последующего использования в качестве топливного вторичного энергетического ресурса // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы 2018 : мат. IX Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. 2018. С. 230–234. EDN RCKLSF.
10. Беляков В.А., Купорова А.В. Добыча торфа в северной Якутии и экология // Актуальные проблемы машиноведения, безопасности и экологии в природопользовании : мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1. 2018. С. 305–310. EDN UWWBTA.
11. Волгина Л.В. Экспериментальное исследование вязкости двухфазного потока // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат. Междунар. науч. конф. ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» 2017. 2017. С. 879–883. EDN XSNIMP.
12. Тарасов В.К., Гусак Л.Н., Волгина Л.В. Движение двухфазных сред и гидротранспорт : уч.-метод. пос. М., 2011.
13. Волгина Л.В., Гусев И.А. О гидравлическом сопротивлении при гидроабразивной резке // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 3. С. 399–408. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.399-408. EDN OLJXFW.
14. Горбатов Ю.П., Мосейкин В.В., Хачатрян В.Д. О работе гидротранспорта в режиме частичного заполнения труб // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № S4. С. 376–381. EDN NENOHX.
15. Krishna R., Kumar K.N., Gupta K. CFD investigation of pressure drop reduction in hydrotransport of multisized zinc tailings slurry through horizontal pipes // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48. No. 43. Pp. 16435–16444. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.116
16. Абрамец В.С. Добыча песка и песчано-гравийной смеси в Приамурье средствами гидромеханизации // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений : VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений». Екатеринбург, 4–5 апреля 2019 г. 2019. С. 109–112. EDN IUBMVK.
17. Cai L., Mi Sh., Luo Ch., Liu Zh. Numerical investigation of hydraulic and heat transfer characteristics of two-phase ice slurry in helically coiled tubes // Energy and Buildings. 2022. Vol. 256. P. 111773. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111773
18. Chami N., Salehy Ya., Burgner D., Delahaye A., Dalmazzone D., Pascal C. et al. Rheological study of mixed cyclopentane + CO₂ hydrate slurry in a dynamic loop for refrigeration systems // Energy. 2023. Vol. 263. P. 125661. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125661
19. Li B., Zhang T.T., Wan Q.C. Wei W., Chen L-L, Feng J-Ch. et al. Kinetic study of methane hydrate development involving the role of self-preservation effect in frozen sandy sediments // Applied Energy. 2021. Vol. 300. P. 117398. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117398
20. Chami N., Bendjenni S., Clain P., Fournaison L., Delahaye A., Osswald V. et al. Thermodynamic characterization of mixed gas hydrates in the presence of cyclopentane as guest molecule for an application in secondary refrigeration // Chemical Engineering Science. 2021. Vol. 244. P. 116790. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116790
21. Волгина Л.В., Медзвелья М.Л., Чемерис О.Г. Влияние мелкодисперсных включений на расчет критической скорости двухфазного потока // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 145–153. EDN SZCFEP.
22. Леонов А.М., Михеев В.А., Москаленко Т.В., Данилов О.С. Гидравлический расчет трубопровода от станции Угольная до Нерюнгринской ГРЭС // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S10. С. 404–408. EDN LRGVBD.
23. Jaworska-Jóźwiak, Dziubiński M. Effect of deflocculant addition on energy savings in hydrotransport

in the lime production process // *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 11. P. 3869. DOI: 10.3390/en15113869

24. Ибад-Заде Ю.А., Гурбанов С.Г., Азизов С.Г., Алескеров В.Г. Гидравлика разноплотностного потока. М. : Стройиздат, 1982. 294 с.

25. Юфин А.П. Напорный гидротранспорт. М. : Энергоиздат, 1950.

26. Volgina L.V., Romanova A.A. Resistance coefficient of nonspherical solid particles in turbulent flow // *Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат. VI Междунар. науч. конф.* 2018. С. 178–183. EDN YQGTVZ.

27. Волгина Л.В., Сергеев С.А., Романова А.А. О кинематических характеристиках селевых потоков // *Гидротехническое строительство*. 2018. № 10. С. 59–63. EDN YNAWUX.

28. Третьяк А.Я., Литкевич Ю.Ф., Гроссу А.Н. Технология гидродобычи железной руды на месторождениях Курской магнитной аномалии // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 3. С. 50–54. EDN TJYFTX.

29. Усова А.А. Порядок отработки мокрых песков открытым способом // *Мат. IV Всеросс. науч.-практ. конф.* 2019. С. 71–78. EDN ILQVOT.

30. Чебан А.Ю. Техническое оснащение предприятий по добыче нерудных строительных матери-

алов в Хабаровском крае // *Механизация строительства*. 2017. С. 23–26. EDN ZRRQLD.

31. Araya N., Ramirez Ye., Cisternas L.A., Kraslawski A. Use of real options to enhance water-energy nexus in mine tailings management // *Applied Energy*. 2021. Vol. 303. P. 117626. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117626

32. Araya N., Ramirez Y., Kraslawski A., Cisternas L.A. Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 284. P. 112060. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112060

33. Babaev A., Teshabaeva E., Obidjonov A., Chorsanbiev U. Study of the hydraulic parameters of the flow of solid particles in the process of hydrotransport // *E3S Web of Conferences*. Tashkent : EcoSciences, 2023. Vol. 401. Pp. 30–34. DOI: 10.1051/e3sconf/202340103034

34. Pankov A., Pankova O. Modeling the concentration profile of the solid phase during hydrotransport of ore in pipes // *E3s web of conferences : X International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-X 2024)*, Termez, Uzbekistan, 29–30 апреля 2024 года. Vol. 548. Les Ulis : EDP Sciences, 2024. P. 08009. DOI: 10.1051/e3sconf/202454808009

Поступила в редакцию 30 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 10 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 10 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Людмила Всеволодовна Волгина — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus AuthorID: 57208499016, ORCID: 000-0002-2349-5005, ResearcherID: AAC-3242-2022, SPIN-код: 3032-5165, РИНЦ ID: 289878; VolginaLV@gic.mgsu.ru;

Станислав Алексеевич Сергеев — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Stanislav_sergeev91@mail.ru;

Анастасия Андреевна Романова — главный специалист; Акционерное общество «Институт «Оргэнерго-строй» (АО ОЭС); 115114, г. Москва, Дербеневская набережная, д. 7, стр. 10; Scopus AuthorID: 57208482859, ORCID: 0000-0003-3467-4495, SPIN-код: 4296-6925, РИНЦ ID: 969058; anastasiya.a.romanova@yandex.ru.

Вклад авторов:

Волгина Л.В. — научное руководство, концепция исследования, итоговые выводы.

Сергеев С.А. — идея и написание статьи.

Романова А.А. — сбор и обработка материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Aleshkov M.V., Volgina L.V. Kinematic characteristics of two-phase flows during waterjet cutting. *Bulletin of MGSU*. 2019; 14(12):1610-1618. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1610-1618. EDN MDNYHT. (rus.).

2. Anikina S.A. Utilization and processing of tank and barn oil sludge. *Environmental readings-2014*. 2014; 102-105. EDN TMFQED. (rus.).

3. Rzhetskij V.V. *Open-pit mining: Technology and complex mechanization : textbook*. Moscow, LIBRO-COM Book House, 2013; 552. (rus.).

4. Fedotov A.I., Shamsutdinov E.V. Algorithm of calculation and design of coal water slurry hydrotransport. *Modern problems of science and education*. 2013; 1:181-188. EDN PWAZHP. (rus.).

5. Liu Y., Lv X., Zhou S., Pengfei Yu, Yun L., Bo-hui Sh. et al. Rheological study of low wax content hydrate slurries considering phase interactions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021; 94:104-106. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104-106
6. Chen Y.C., Shi B.H., Fu Sh., Li Q., Yao H., Liu Ya. et al. Kinetic and rheological investigation of cyclopentane hydrate formation in waxy water-in-oil emulsions. *Fuel*. 2021; 119:568. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119568
7. Ran F., Xu Ch., Chen Yu., Cong R, Fang G. Numerical flow characteristics of microencapsulated phase change slurry flowing in a helically coiled tube for thermal energy storage. *Energy*. 2021; 223:120128. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120128
8. Liu Z., Li Ya., Wang J., Zhang M., Liu W., Lang Chen et al et al. Rheological investigation of hydrate slurry with marine sediments for hydrate exploitation. *Energy*. 2022; 259:124958. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124958
9. Ahmerov A.V., Osipov A.L., Dolgova A.N., Fajzullina G.R. Energy-saving technology for dewatering spent secondary activated sludge for subsequent use as a fuel secondary energy resource. *Innovative engineering technologies, equipment and materials 2018 : proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference*. 2018; 1:230-234. EDN RCKLSF. (rus.).
10. Belyakov V.A., Kuporova A.V. Peat extraction in Northern Yakutia and ecology. *Current issues of mechanical engineering, safety and ecology in nature management : materials of the IV-th International Scientific and Practical Conference : in 2 parts. Part 1*. 2018; 305-310. EDN UWWBTA. (rus.).
11. Volgina L.V. Experimental study of the viscosity of a two-phase flow. Integration, partnership and innovation in construction science and education : collection of materials of the international scientific conference. *Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" 2017*. 2017; 879-883. EDN XSNIMP. (rus.).
12. Tarasov V.K., Gusak L.N., Volgina L.V. *Movement of two-phase media and hydraulic transport : an educational and methodical manual*. Moscow, 2011. (rus.).
13. Volgina L.V., Gusev I.A. Hydraulic resistance during waterjet cutting. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(3):399-408. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.399-408. EDN OLJXFW. (rus.).
14. Gorbatov Yu.P., Mosejkin V.V., Hachatryan V.D. On the operation of hydraulic transport in the mode of partial silting of pipes. *Mountain information and analytical bulletin*. 2006; S4:376-381. EDN NENOHX. (rus.).
15. Krishna R., Kumar N., Gupta P.K. CFD investigation of pressure drop reduction in hydrotransport of multisized zinc tailings slurry through horizontal pipes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48(43):16435-16444. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.116
16. Abramec V.S. Extraction of sand and sand-gravel mixture in the Amur region by means of hydro-mechanization. *Innovative geotechnologies in the development of ore and non-metallic deposits : VIII international scientific and technical conference "Innovative geotechnologies in the development of ore and non-metallic deposits". Ekaterinburg, April 4-5, 2019*. 2019; 109-112. (rus.). EDN IUBMVK.
17. Cai L., Mi Sh., Luo Ch., Liu Zh. Numerical investigation of hydraulic and heat transfer characteristics of two-phase ice slurry in helically coiled tubes. *Energy and Buildings*. 2022; 256:111773. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111773
18. Chami N., Salehy Ya., Burgner D., Delahaye A., Dalmazzone D., Pascal C. et al. Rheological study of mixed cyclopentane + CO₂ hydrate slurry in a dynamic loop for refrigeration systems. *Energy*. 2023; 263:125661. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125661
19. Li B., Zhang T.T., Wan Q.C. Wei W., Chen L-L., Feng J-Ch. et al. Kinetic study of methane hydrate development involving the role of self-preservation effect in frozen sandy sediments. *Applied Energy*. 2021; 300:117398. DOI: 10.1016 / j.apenergy. 2021. 117398
20. Chami N., Bendjenni S., Clain P., Fournaison L., Delahaye A., Osswald V. et al. Thermodynamic characterization of mixed gas hydrates in the presence of cyclopentane as guest molecule for an application in secondary refrigeration. *Chemical Engineering Science*. 2021; 244:116790. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116790
21. Volgina L.V., Medzveliia M.L., Chemeris O.G. The influence of fine inclusions on the calculation of the critical velocity of a two-phase flow. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2014; 1:145-153. EDN SZCFEP. (rus.).
22. Leonov A.M., Miheev V.A., Moskalenko T.V., Danilov O.S. Hydraulic calculation of the pipeline from Ugolnaya station to Neryunginskaya GRES. *Mining information and analytical bulletin*. 2009; S10:404-408. EDN LRGVBD. (rus.).
23. Jaworska-Jóźwiak B., Dziubiński M. Effect of Deflocculant Addition on Energy Savings in Hydrotransport in the Lime Production Process. *Energies*. 2022; 15(11):3869. DOI: 10.3390/en15113869
24. Ibad-Zade Yu.A., Gurbanov S.G., Azizov S.G., Aleskerov V.G. *Hydraulics of multi-density flow*. Moscow, Stroyizdat, 1982; 294. (rus.).
25. Yufin A.P. *Pressure hydraulic transport*. Moscow, Energoizdat, 1950. (rus.).
26. Volgina L.V., Romanova A.A. Resistance coefficient of nonspherical solid particles in turbulent flow. *Integration, partnership and innovation in construction science and education : proceedings of the VI International Scientific Conference*. 2018; 178-183. EDN YQGTVZ.
27. Volgina L.V., Sergeev S.A., Romanova A.A. On kinematic characteristics of mudflows. *Hydraulic en-*

gineering construction. 2018; 10:59-63. EDN YNAWUX. (rus.).

28. Tret'yak A. Ya., Litkevich Yu.F., Grossu A.N. Technology of hydraulic extraction of iron ore at the deposits of the Kursk magnetic anomaly. *Mining information and Analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 3:50-54. EDN TJYFTX. (rus.).

29. Usova A.A. The procedure for processing wet sands in an open way. *Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2019; 71-78. EDN ILQVOT. (rus.).

30. Cheban A.Yu. Technical equipment of enterprises for the extraction of non-metallic building materials in the Khabarovsk Territory. *Mechanization of construction*. 2017; 23-26. EDN ZRRQLD. (rus.).

31. Araya N., Ramírez Ye., Cisternas L.A., Kraslawski A. Use of real options to enhance water-energy nexus in mine tailings management. *Applied Energy*. 2021; 303:117626. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117626

32. Araya N., Ramírez Y., Kraslawski A., Cisternas L.A. Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis. *Journal of Environmental Management*. 2021; 284: 112060. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112060

33. Babaev A., Teshabaeva E., Obidjonov A., Chorshanbiev U. Study of the hydraulic parameters of the flow of solid particles in the process of hydrotransport. *E3S Web of Conferences, Tashkent, 2023*. Tashkent, EcoSciences, 2023; 401:30-34. DOI: 10.1051/e3sconf/20234010-3034

34. Pankov A., Pankova O. Modeling the concentration profile of the solid phase during hydrotransport of ore in pipes. *E3s web of conferences : X International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-X 2024), Termez, Uzbekistan, 29–30 April 2024. Vol. 548*. Les Ulis, EDP Sciences, 2024; 08009. DOI: 10.1051/e3sconf/202454808009

Received January 30, 2024.

Adopted in revised form on November 10, 2024.

Approved for publication on November 10, 2024.

B I O N O T E S : **Lyudmila V. Volgina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57208499016, ORCID: 000-0002-2349-5005, ResearcherID: AAC-3242-2022, SPIN-code: 3032-5165, ID RSCI: 289878; VolginaLV@gic.mgsu.ru;

Stanislav A. Sergeev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Stanislav_sergeev91@mail.ru;

Anastasia A. Romanova — Chief Specialist; **Joint Stock Company “Institute “Orgenergostroy” (JSC IOES)**; 7 Derbenevskaya emb., build. 10, Moscow, 115114, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57208482859, ORCID: 0000-0003-3467-4495, SPIN-code: 4296-6925, ID RSCI: 969058; anastasiya.a.romanova@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Lyudmila V. Volgina — scientific guidance, research concept, final conclusions.

Stanislav A. Sergeev — the idea and writing of the article.

Anastasia A. Romanova — collection and processing of material.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Тепловой аккумулятор с теплоизоляционным материалом на основе аэрогеля

Александр Валерьевич Федюхин¹, Владислав Александрович Карасевич²,
Михаил Сергеевич Повернов³, Ольга Валерьевна Афанасьева⁴

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия;

² Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина); г. Москва, Россия;

³ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ); г. Москва, Россия;

⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Установки для аккумулирования тепловой энергии позволяют сглаживать пиковые нагрузки и обеспечивать устойчивость работы теплоэнергетической системы. Особую актуальность данные решения имеют для частных домовладений. Цель исследования — анализ целесообразности применения теплового аккумулятора на основе талькомагнезита и с тепловой изоляцией из аэрогеля.

Материалы и методы. Для определения температуры на поверхности тепловой изоляции и визуализации температурного профиля проведено моделирование в программном пакете ANSYS. В качестве системы автоматического проектирования выбран Autodesk Inventor.

Результаты. Получены изображения температурных профилей на режимах 350 °С для толщины тепловой изоляции: 20 и 50 мм для аэрогеля, 70 и 150 мм для минеральной ваты. Проведенный анализ показал, что для всех вариантов температура поверхности оставалась ниже 60 °С, что свидетельствует о корректности выбора толщины изоляции. Для варианта теплоизоляции из минеральной ваты (150 мм) и аэрогеля (50 мм) температура поверхности оказалась значительно ниже необходимой, что позволило уменьшить толщину слоя изоляции до 70 мм для минеральной ваты и 20 мм для аэрогеля соответственно. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что использование тепловой изоляции на основе аэрогеля существенно уменьшает толщину теплоизолирующего слоя.

Выводы. Несмотря на сложность и дороговизну создания теплоизоляционных материалов на основе аэрогеля, его использование в составе теплового аккумулятора дает возможность избежать множества проблем, связанных со старением, разрушением и частой заменой тепловой изоляции, снизить нагрузку на теплоизоляционные конструкции и значительно повысить экономическую эффективность теплоэнергетических систем, сократив потери при производстве и передаче тепловой энергии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловое аккумулирование, талькомагнезит, аэрогель, моделирование, ANSYS, температурные профили, толщина изоляции

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2024-226/1 от 15.02.2024. Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за содержательную рецензию и редактору, помогающему оформить статью.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федюхин А.В., Карасевич В.А., Повернов М.С., Афанасьева О.В. Тепловой аккумулятор с теплоизоляционным материалом на основе аэрогеля // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1963–1976. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1963-1976

Автор, ответственный за переписку: Ольга Валерьевна Афанасьева, eccolga@mail.ru.

Heat accumulator with aerogel-based thermal insulation material

Alexander V. Fedyukhin¹, Vladislav A. Karasevich²,
Mihail S. Povernov³, Ol'ga V. Afanas'eva⁴

¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (MPEI); Moscow, Russian Federation;

² Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Gubkin University); Moscow, Russian Federation;

³ Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University); Moscow, Russian Federation;

⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Installations for thermal energy storage make it possible to smooth peak loads and provide stability of heat and power system. These solutions are of particular relevance for private households. The purpose of this paper is to analyze the feasibility of using a heat accumulator based on talc-magnesite and with aerogel thermal insulation.

Materials and methods. In order to determine the temperature on the insulation surface and visualize the temperature profile, simulation in the ANSYS software package was carried out. Autodesk Inventor was selected as an automatic design system.

Results. Images of temperature profiles were obtained at 350 °C for thermal insulation thicknesses: 20 and 50 mm for aerogel, 70 and 150 mm for mineral wool. The analysis showed that for all options the surface temperature remained below 60 °C, which indicates the correct choice of insulation thickness. For the thermal insulation option made of mineral wool (150 mm) and aerogel (50 mm), the surface temperature turned out to be significantly lower than necessary, which made it possible to reduce the thickness of the insulation layer to 70 mm for mineral wool and 20 mm for aerogel, respectively. The results obtained allow us to conclude that the use of aerogel-based thermal insulation can significantly reduce the thickness of the heat-insulating layer.

Conclusions. Despite the complexity and high cost of creating thermal insulating materials based on aerogel, its use as part of a thermal accumulator will help avoid many problems associated with aging, destruction and frequent replacement of thermal insulation, reduce the load on thermal insulation structures and significantly increase the economic efficiency of thermal power systems, reducing losses during production and transfer of thermal energy.

KEYWORDS: thermal storage, talc-magnesite, aerogel, modeling, ANSYS, temperature profiles, insulation thickness

Acknowledgements. This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-03-2024-226/1 от 15.02.2024. The authors are grateful to the anonymous reviewer for the informative review and the editor who helps to prepare the paper.

FOR CITATION: Fedyukhin A.V., Karasevich V.A., Povernov M.S., Afanas'eva O.V. Heat accumulator with aerogel-based thermal insulation material. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1963-1976. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1963-1976 (rus.).

Corresponding author: Ol'ga V. Afanas'eva, eccolga@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Для Российской Федерации, в некоторых регионах которой отопительный период превышает 250 дней, снабжение домовладений теплом служит критическим фактором поддержки жизнеобеспечения. Одним из направлений для внедрения электрических генераторов тепла по принципу его аккумулирования малой мощности (максимально до 15 кВт, согласно Постановлению Правительства от 21.04.2009 РФ № 334 «О совершенствовании порядка технического присоединения потребителей к электрическим сетям») являются частные домовладения. Тепловое аккумулирование представляет собой процессы (физические или химические), благодаря которым происходит накопление тепла в аккумуляторе тепловой энергии. Большинство частных домовладений не подключены к сетевому природному газу и отапливаются альтернативным образом. Если предположить, что средняя установленная мощность дачного (огородного, деревенского, коттеджного) дома составляет 10 кВт, а электричеством отапливаются около 5 % жилищ, то речь идет о домовладениях с общей установленной мощностью до 8 ГВт. В таких домовладениях теплоснабжение — основной потребитель электроэнергии.

Коллективом авторов в настоящий момент ведется работа, направленная на создание энергоэффективного генератора тепла (теплового аккумулятора). В качестве основы для накопления тепловой энергии планируется использовать талькомагнезит из-за его высоких показателей теплоемкости и теплопроводности. Эффективности функционирования устройства предполагается достичь при помощи ин-

теллектуального накопления с последующей выдачей тепловой энергии посредством системы автоматизации на базе внутреннего контроллера собственной разработки. Данный подход позволит динамически использовать доступную электрическую мощность на объекте посредством ее измерения на входящем фидере (вводном кабеле), динамически производить нагрев теплового аккумулятора остаточной мощностью и согласно пользовательским настройкам, не допуская перегрузки и аварийного отключения защитной автоматики электрощита, как следствие. Возможно осуществлять нагрев теплового аккумулятора с применением выгодных тарифов на электроэнергию (преимущественно в ночное время) с последующей выдачей тепла в течение всего дня. Это позволит сэкономить расходы, затрачиваемые на нагрев. Также целесообразно использование возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) для приоритетной зарядки теплового аккумулятора вырабатываемой ими электроэнергией параллельно с электроэнергией сети. В качестве изоляционного материала планируется применять аэрогель из-за его показателей. Аэрогель обладает рекордно низкой плотностью и демонстрирует ряд уникальных свойств, хорошо подходящих для конструкции теплового аккумулятора: твердость, жаропрочность, низкая теплопроводность. Еще одна важная конструктивная особенность планируемого к разработке устройства — его возможность почти полной разборки на части и неполной загрузки накопителем тепловой энергии. Это обеспечит удобную транспортировку устройства (даже на легковом автомобиле за несколько заходов), также возможность приобретения

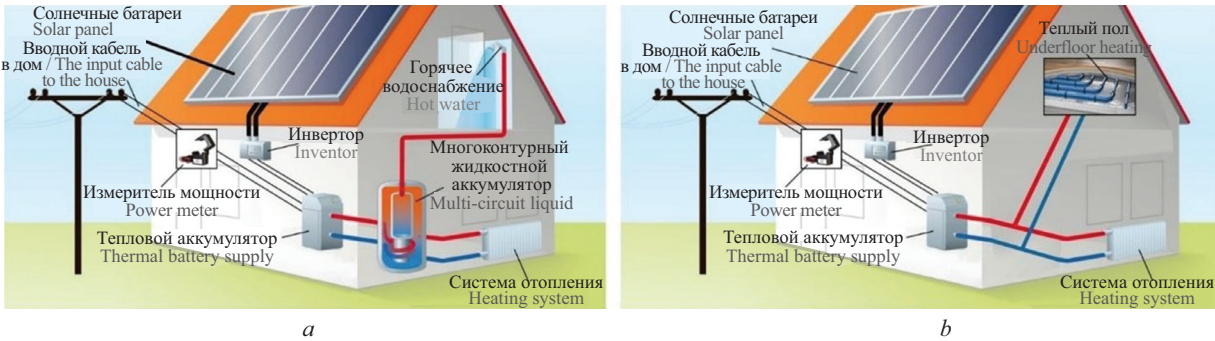


Рис. 1. Использование аккумулятора тепла в жилом доме: *a* — подключение с горячим водоснабжением и водяным баком; *b* — подключение без горячего водоснабжения

Fig. 1. Use of a heat accumulator in a residential building: *a* — connection with hot water supply and water tank; *b* — connection without hot water supply

устройства при нехватке бюджета и его дальнейшего усовершенствования (добавления накопителя тепловой энергии до желаемой теплоемкости). С помощью устройства можно круглосуточно отапливать небольшой дом (до 100 м²), используя электроэнергию от ВИЭ (там, где нет подключения к электроэнергии) или электроэнергию по ночному тарифу (в несколько раз дешевле, чем по дневному). Модульная сборная конструкция (наличие возможности добавлять или убирать талькомагнетитные блоки) позволяет регулировать необходимую установленную мощность. Применение плавного регулирования подачи электроэнергии на вход аккумулятора дает возможность использовать только «свободную» электрическую мощность домовладения и не ставить под угрозу надежность его электроснабжения, а плавное

регулирование потоков воздуха на выходе из аккумулятора — обеспечить в доме комфортный уровень температуры. Рис. 1 иллюстрирует использование аккумулятора тепла в жилом доме [1, 2].

В работе [3] представлены обширный обзор существующих и перспективных систем накопления тепловой энергии, классификация применяемых для накопления тепловой энергии материалов с анализом их основных свойств, таких как температура эксплуатации, теплопроводность, плотность. Авторы исследования [4] показывают актуальность накопления тепловой энергии для зданий и сооружений и делают акцент на использовании материалов с фазовым переходом в строительных конструкциях, доказывая, что данные материалы превосходят минеральную вату по теплофизическим и эксплуатационным ха-

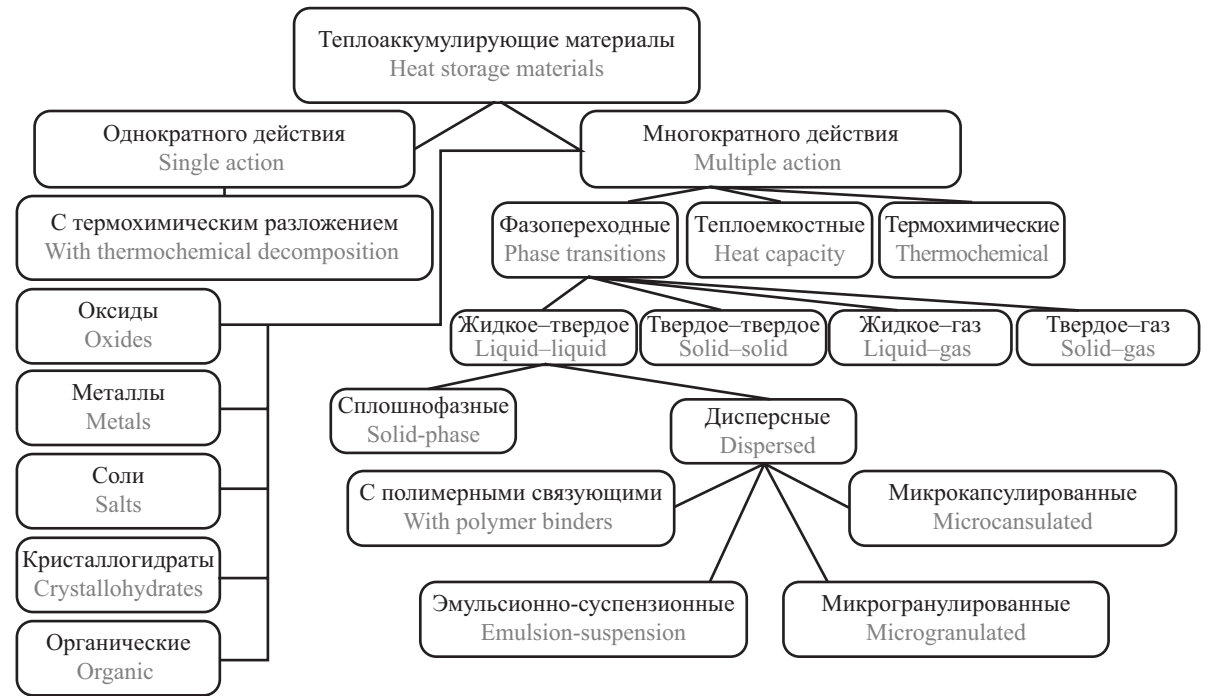


Рис. 2. Классификация теплоаккумулирующих материалов

Fig. 2. Classification of heat storage materials

рактикам. Предлагаются критерии выбора теплоаккумулирующих материалов [1], наиболее перспективными для создания гибридных систем накопления энергии являются материалы на основе гидроксидов кальция и магния, кристаллогидратов лития и натрия, эвтектические составы на основе нитратов натрия, калия и лития. Исследование [2] также носит аналитический характер и охватывает более 150 материалов, используемых в качестве накопителей тепловой энергии с оценкой их преимуществ и недостатков.

Тепловой аккумулятор представляет собой теплоизолированный герметичный резервуар, который обеспечивает обратимые процессы накопления или хранения и выделения тепловой энергии в количествах, необходимых потребителю. На основании первого закона термодинамики аккумулятирование энергии может осуществляться в результате изменения внутренней энергии материала, массы системы, давления, объема, энтальпии и различных их комбинаций. Способность выделять энергию, требуемую потребителю, — важный показатель, характеризующий возможность и целесообразность аккумулятирования тепла. Исходя из размеров теплового аккумулятора, распределения температур, желаемой длительности хранения теплоты, выполняется выбор конструкции аккумулятора и теплоаккумулирующего материала (ТАМ) (рис. 2) [5].

По типу процесса аккумулятирования энергии в тепловых аккумуляторах различают тепловые емкостные аккумуляторы, аккумуляторы теплоты фазового перехода и термохимические аккумуляторы. Перспективы применения тепловых аккумуляторов на основе нетоксичных материалов анализируются в публикации [6]. Авторы описывают модель сравнительно простого в изготовлении и эксплуатации грунтового аккумулятора, теплообмен в котором осуществляется путем взаимодействия продуваемого воздуха и капсул с теплоаккумулирующими свойствами. В труде [7] рассматриваются вопросы взаимодействия ВИЭ и аккумуляторов, представлен обзор солнечных коллекторов и систем накопления тепловой энергии. Показаны преимущества и недостатки различных типов солнечных коллекторов, в том числе неконцентрирующих и концентрирующих коллекторов. Анализу различных типов и режимов работы тепловых аккумуляторов посвящена работа [8]. Авторы особо отмечают потенциал применения химических аккумуляторов, эффективность которых достигает 70 %.

К отдельному направлению исследований стоит отнести разработку моделей теплообмена [9, 10] и прогнозирования свойств материалов при переменном режиме работы теплового аккумулятора [11, 12]. Представлена математическая модель теплообмена при фазовом переходе ТАМ, которая учитывает теплофизические свойства материала, толщину слоя фазового перехода и время ее образования, а также разность температур между температурой исход-

ного состояния и температурой фазового перехода ТАМ [9]. В исследовании [10] на основе расчета теплового баланса установлено, что парафин является приоритетным в применении материалом для различных приложений, связанных с низкотемпературной аккумуляцией теплоты. Работа [11] значима с точки зрения обработки результатов экспериментальных исследований, направленных на разработку методики по определению составов с наилучшими теплоаккумулирующими свойствами. Показано, что при 80%-ном содержании микрокапсул в накопителе материал разрушается, поэтому оптимальной долей будет 50 % от состава строительного материала. Предложен оригинальный метод параметрической идентификации эффективного коэффициента теплопроводности как функции температуры теплового аккумулятора в виде элемента обеспечения системы теплового режима [12]. Анализ результатов показал, что эффективный коэффициент теплопроводности находится в пределах 0,16–0,56 Вт/(м·К). Отмечается, что наибольшее влияние на КПД теплового аккумулятора оказывают объем, время зарядки и разрядки, а также термическое сопротивление [13].

Вопросы практического применения тепловых аккумуляторов для индивидуальных и многоквартирных жилых домов рассмотрены во многих трудах. В публикации [14] приведена оригинальная методика расчета водораспределителя постоянного поперечного сечения, равномерно перфорированного по высоте, для многослойного слоистого теплового накопителя, используемого в системах солнечного отопления и горячего водоснабжения. Представлена модель теплового накопителя, совмещенная с системой «теплого пола» [15]. В качестве ТАМ автором предлагается использование композиции из теплопроводного металла и теплоемкой эпоксидной смолы. Работа [16] содержит методику расчета тепловой нагрузки системы солнечного теплоснабжения с аккумулятором энергии. Показано, что решением уравнения теплового баланса можно получить численные значения тепловых потерь через ограждающие конструкции здания. Необходимо отметить, что в качестве решения во многих публикациях предлагается комбинация солнечных коллекторов и теплового аккумулятора на базе воды [17], грунта [18] или материалов с фазовым переходом [19]. В частности, в исследовании [19] представлена принципиальная схема применения аккумулятора в системе теплоснабжения многоэтажного жилого дома для снятия пиковых нагрузок горячего водоснабжения путем аккумулятирования тепловой энергии, поступающей от солнечного коллектора.

Основные характеристики теплоаккумулирующих материалов, которые получили широкое распространение в настоящее время, приведены в таблице.

У эвтектических составов многокомпонентных систем более высокие значения теплоты фазовых переходов, чем у индивидуальных веществ [20]. Благо-

Основные характеристики теплоаккумулирующих материалов

Main characteristics of heat-accumulating materials

Материал Material	Температурный интервал, °С Temperature range, °C	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С) Specific heat capacity, kJ/(kg·°C)	Объемная теплоемкость, кДж/(м³·°С) Volumetric heat capacity, kJ/(m³·°C)	Теплопроводность, Вт/(м·°С) Thermal conductivity, W/(m·°C)
Твердые Solid				
Хлорид натрия Sodium chloride	<800	0,92	2,0	9*. **
Чугун Cast iron	<1500	0,46	3,6	70**–34**
Камень (гранит) Stone (granite)	<1700	0,79	2,2	2,7**
Кирпич Brick	–	0,84	1,4	0,6
Земля (сухая) Earth (dry)	–	0,79	1,0	1,0
Жидкие Liquid				
Вода Water	0–100	4,2	4,2	0,6
Масло («термо») Oil («thermo»)	От –50 до 330 From –50 до 330	2,4	1,9	0,1
Натрий Sodium	От 98 до 880 From 98 до 880	1,3	1,3	85**–60***
Диэтиленгликоль Diethylene glycol	От –10 до 240 From 98 до 880	2,8	2,9	0,25

Примечание: * — в случае гранулированного материала с заполненными воздухом пустотами — меньше; ** — при 1000 °С; *** — при 700 °С.

Note: * — in case of granular material with air-filled voids — less; ** — at 1,000 °C; *** — at 700 °C.

даря тому, что существует большое количество эвтек-
тических составов двух-, трех-, четырех- и пятиком-
понентных систем, это дает возможность использо-
вать их в качестве фазопереходных материалов. К дос-
тоинствам органических кислот и парафинов отно-
сятся большие значения удельной энергии, разность
температур теплоносителя и источника теплоты
определяется желаемой интенсивностью теплопере-
дачи. Недостатки: материалы имеют низкий коэффи-
циент теплопроводности, в расплавленном состоя-
нии являются коррозионноактивными веществами,
изменяют объем при плавлении и относительно до-
роги [21].

Таким образом, можно заключить, что в научно-
технической литературе практически не встречаются
работы, где рассматриваются технические аспек-
ты применения теплового аккумулятора на основе
талькомагнезита с тепловой изоляцией из аэрогеля.
Практическая значимость данной работы заключа-
ется в разработке конструкции теплового аккумулятора
и расчете температурного профиля тепловой изоля-
ции из аэрогеля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель исследования — проведение анализа целе-
сообразности применения современных энергоэффе-
ктивных генераторов тепла (тепловых аккумуляторов)
с использованием теплоизоляционных материалов
на основе аэрогеля. В качестве объекта исследования
выбран емкостный тепловой аккумулятор с твердым
теплоаккумулирующим материалом. Основой для на-
копления тепловой энергии является талькомагнезит
(из-за его высоких показателей теплоемкости и тепло-
проводности). Конструктивная особенность заключа-
ется в возможности почти полной разборки на части
и неполной загрузки объема аккумулятора тепловой
энергии (рис. 3).

Модульная сборная конструкция (наличие воз-
можности добавлять или убирать талькомагнезитные
блоки) позволяет регулировать необходимую уста-
новленную мощность. Использование плавного регу-
лирования подачи электроэнергии на вход теплового
аккумулятора дает возможность использовать только
«свободную» электрическую мощность домовладе-
ния и не ставить под угрозу надежность его электро-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 12, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 12, 2024

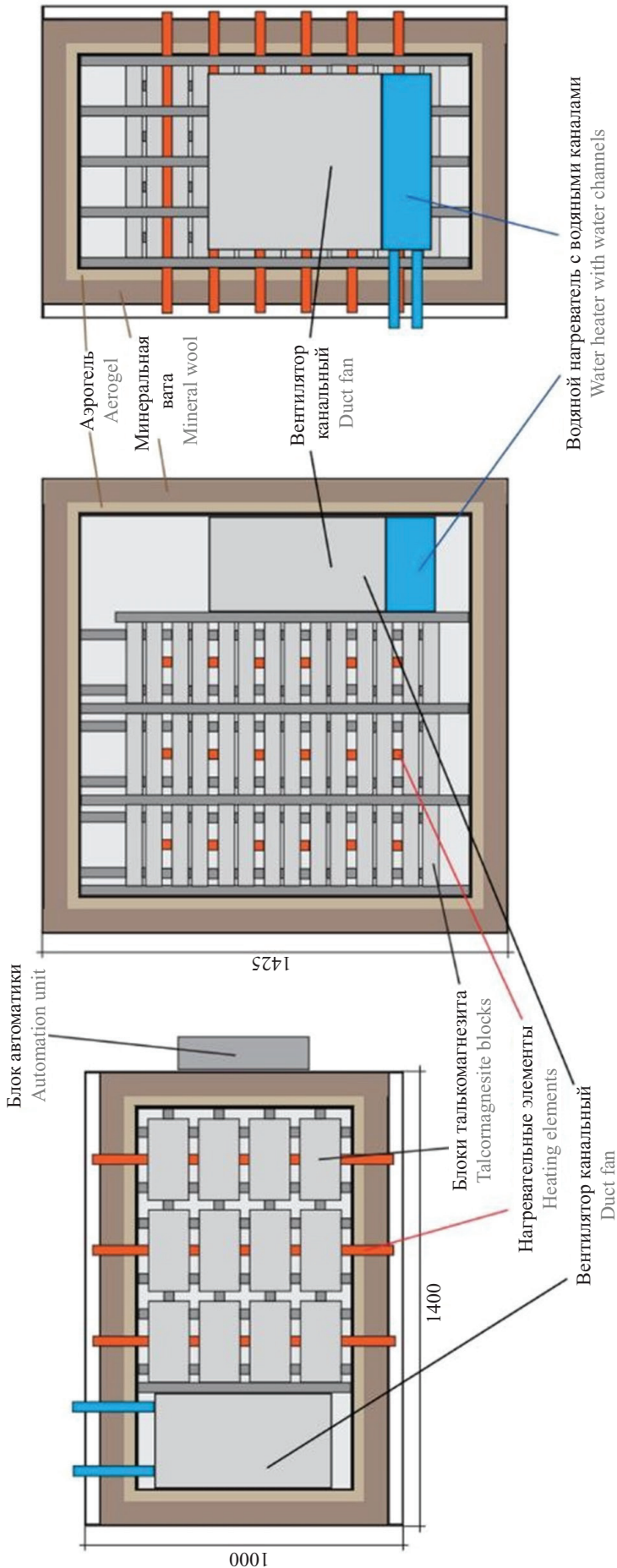


Рис. 3. Тепловой аккумулятор
Fig. 3. Thermal accumulator

снабжения, а плавное регулирование потоков воздуха на выходе из аккумулятора позволяет обеспечить в доме комфортный уровень температуры.

При сравнении устройства теплового аккумулятора с классическими электрическими нагревательными приборами и жидкостными тепловыми аккумуляторами выделяется ряд технических и экономических преимуществ:

1. Возможность накопления тепловой энергии в желаемый промежуток времени и с желаемой доступной нагрузкой, в том числе с использованием ВИЭ. В случае с обычными электрическими нагревательными элементами есть возможность их применения лишь при необходимости (падении температуры нагреваемого помещения или теплоносителя, в частности). При нехватке доступной электроэнергии на объекте (использование доступной мощности обычно в пределах 10 кВт другими бытовыми электроприборами) существует риск падения температуры (недогрева) в целом с последующим общим остыванием постройки.

2. Использование в качестве основы для накопления тепловой энергии твердого материала в отличие от жидкостного с возможностью нагрева до нескольких сотен градусов (точка плавления талькомагнезита составляет более тысячи градусов), что позволяет накапливать большее количество тепловой энергии при одинаковой площади.

3. Возможность применения совместно с ВИЭ. При использовании ВИЭ можно направить всю доступную неиспользуемую электрическую мощность на нагрев теплового аккумулятора с последующим хранением и выдачей тепловой энергии по необходимости. Учитывая особенность ВИЭ (ветряные электростанции (ВЭС), солнечные электростанции (СЭС), водород и др.), при неиспользовании свободной электроэнергии она пропадает, а в случае СЭС может привести к порче оборудования. Тогда тепловой аккумулятор может играть роль устройства, предохраняющего от всплесков электрической мощности.

4. Применение инновационного изоляционного материала аэрогеля позволит добиться хороших показателей при тепловой изоляции теплового аккумулятора. Также аэрогель весьма прочный материал и может выдерживать нагрузку в 2000 раз больше собственного веса, что удобно в использовании конструкции теплового аккумулятора, учитывая его вес. Температура плавления кварцевого аэрогеля составляет 1200 °С, что хорошо подходит при совместном использованием с твердым материалом накопления тепловой энергии.

5. Разборный корпус устройства теплового аккумулятора позволяет легко транспортировать устройство и изменять его конфигурацию (степень загрузки, в частности). Данное свойство недоступно для жидкостного теплового аккумулятора, который в силу своей конструкции (использование жидкости в качестве основы накопления тепловой энергии в первую

очередь) имеет монолитную конструкцию. Также есть возможность динамического добавления и замены активных элементов теплового аккумулятора в зависимости от мощности (таких как трубчатые электронагреватели, вентилятор, силовые твердотельные устройства), а также пассивных элементов конструкции.

6. Возможность дистанционного управления и диспетчеризации устройства теплового аккумулятора посредством встроенного контроллера и цифровых каналов связи.

В качестве объекта исследования выбран наиболее перспективный для частных домовладений емкостный тепловой аккумулятор с основой для накопления тепловой энергии в виде талькомагнезита и с тепловой изоляцией на основе аэрогеля [22–25]. Так как основой для накопления тепловой энергии является талькомагнезит с температурой 350 °С, то поверхность теплового аккумулятора необходимо изолировать. При использовании тепловой изоляции как средства, предохраняющего обслуживающий персонал от ожогов, температура поверхности не должна превышать 60 °С для изолируемых объектов, расположенных на открытом воздухе, в рабочей или обслуживаемой зоне¹.

Приняты следующие исходные данные: δ_1 — толщина первого слоя; λ_1 и λ_2 — коэффициенты теплопроводности; t_{c1} , t_{c3} — температуры поверхности стенок; $t_{окр.ср}$ — температура воздуха с коэффициентом теплоотдачи для воздуха α . Температуры между поверхностями в местах теплового контакта, который предполагается идеальным, обозначены через t_{c2} и t_{c3} .

При стационарном режиме плотность теплового потока постоянна и для всех слоев одинакова. Поэтому можно записать следующие уравнения²:

$$\begin{cases} q = q_1 = q_2 = q_3; \\ q_1 = \frac{\lambda_1}{\delta_1} \cdot (t_{c1} - t_{c2}); \\ q_2 = \frac{\lambda_2}{\delta_2} \cdot (t_{c2} - t_{c3}); \\ q_3 = \alpha \cdot (t_{c3} - t_{окр.ср}). \end{cases}$$

Из этих уравнений определена необходимая толщина изоляции δ_2 для минеральной ваты и аэрогеля. Полученные значения составили 65,8 и 19,09 мм соответственно.

Для проверки аналитических данных, приведенных выше, проведено моделирование эксперимента в программном пакете ANSYS. Основная задача — нахождение температуры на поверхности изоляции, а также визуализация температурного профиля. В ка-

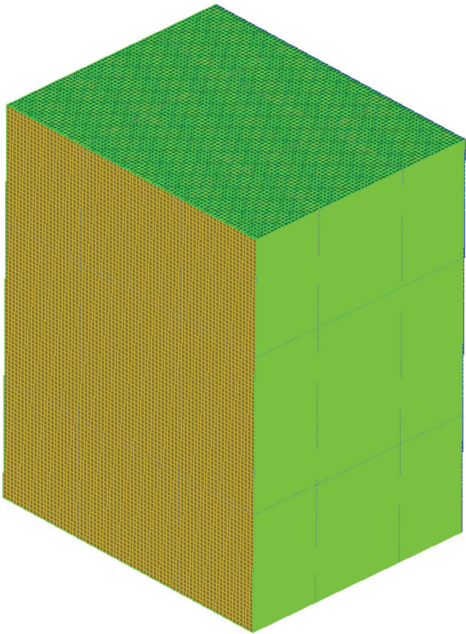
¹ СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007844>

² Пашинский В.А., Кресова Е.В. Учебно-методический комплекс по учебной дисциплине «Теплопередача». 2016.



Рис. 4. Изображение сетки

Fig. 4. Grid image



честве САПР выбран Autodesk Inventor. Построено тело для потока и слой изоляции, которые в дальнейшем соединены в одну модель.

Первоначальной задачей в ANSYS было построение сетки в модуле ICEM CFD. Прежде чем приступить к построению сетки, требуется проверить геометрию, затем разбить поверхности модели на группы поверхностей, на которые в дальнейшем в ANSYS CFX наложены граничные условия. После разбиения модели на группы поверхностей следовал этап

создания сетки. На каждой из этих частей была построена сетка с одинаковым размером ячеек. На рис. 4 приведены параметры сетки и ее изображение на примере прямоугольника со следующими параметрами: длина 600 мм, ширина 750 мм, высота 950 мм.

Максимальный размер ячейки принят 1 мм, что позволило провести дальнейшее моделирование, так как при большем размере могли появиться неточности, а меньший размер вызывал избыточную нагрузку на систему при вычислении, приводя к ошибкам.

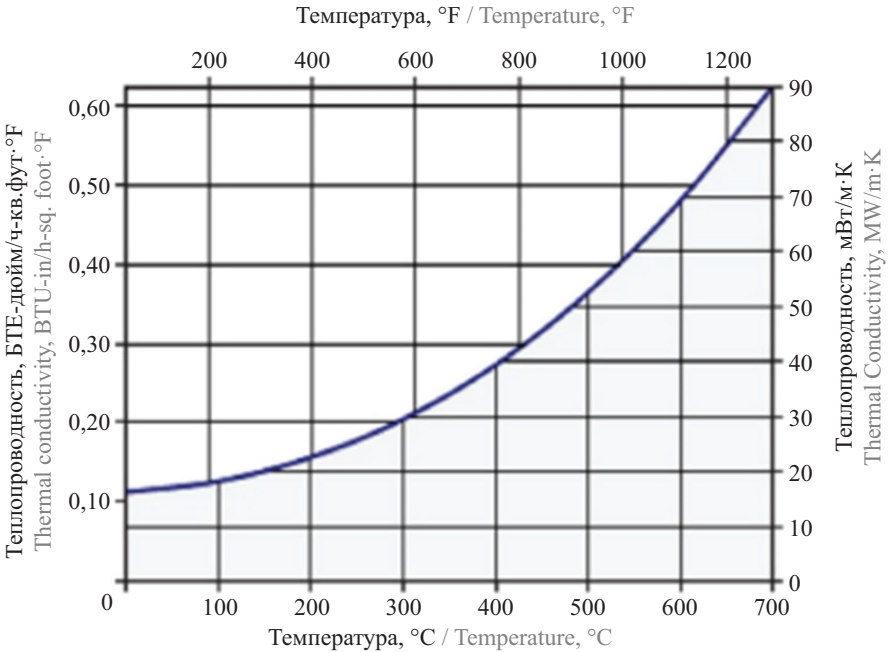


Рис. 5. Значения коэффициента теплопроводности аэрогеля при различных значениях температуры

Fig. 5. Values of aerogel thermal conductivity coefficient at different temperature values

В качестве метода построения сетки выбран Cartesian, что означает квадратная сетка. Толщина тепловой изоляции для температурного режима 350 °С принята: 20 и 50 мм для аэрогеля, 70 и 150 мм для минеральной ваты. Дальнейшая методика расчета описана на примере режима 350 °С.

После загрузки двух пластин возникла необходимость в добавлении материалов. Для настройки параметров 1 пластины (талькомагнезит) заданы следующие параметры: плотность 2800 кг/м³, теплоемкость 800 Дж/кг·К, коэффициент теплопроводности 3,5 Вт/м·К. Величины приняты согласно информации, представленной на сайте камнерезной компании, выпускающей изделия из талькомагнезита³. Для настройки параметров минеральной ваты задан аналогичный набор параметров: плотность 200 кг/м³, теплоемкость 700 Дж/кг·К, а также коэффициент теплопроводности, рассчитанный по следующей формуле: $\lambda = 0,04500 + 0,00021 \cdot t^1$.

Стоит отметить, что для уточнения значения коэффициента теплопроводности при моделировании опыта с аэрогелем величины были приняты согласно информации, представленной на сайте производителя аэрогеля Aspen Aerogels⁴. Зависимость значения коэффициента теплопроводности от температуры показана на рис. 5.

Для моделирования теплообмена с окружающей средой задан коэффициент теплоотдачи для воздуха (принято 10 Вт/м²·К), а также его температура (принято 20 °С). Для осуществления теплообмена между частями общей модели созданы два новых интерфей-

са (Interface Domain) и выбраны стенки тех частей, которые граничат друг с другом. После всех выполненных операций произведена настройка решателя в разделе Solver Control: заданы минимальное (100) и максимальное (1000) количество итераций, которые были проведены во время расчета, и величина сходимости (0,0001).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате расчета расчетная модель достаточно быстро вышла на стационарный режим. В течение примерно 10 итераций невязки стали постоянными, тем не менее расчет завершился на 100 итерациях для устранения возможности каких-либо ошибок и наиболее высокой точности. На рис. 6–9 представлены изображения температурных профилей на режимах 350 °С, полученных в результате расчета.

Отдельно необходимо остановиться на сравнении свойств твердотельных и жидких теплоносителей, например воды и талькомагнезита. Несмотря на то, что удельная теплоемкость воды (4,2 кДж/кг·°С) значительно превышает удельную теплоемкость талькомагнезита (0,8 кДж/кг·°С) за счет более высоких плотности (2800 против 1000 кг/м³ у воды) и температуры допустимого нагрева (талькомагнезит можно нагревать до 600 °С и выше против 100–110 °С, которые обычно указываются в паспортах на водяные теплоаккумулирующие емкости), талькомагнезит в конечном счете может оказаться весьма эффективным для небольших по размерам теплоаккумулирующих устройств. В частности, при нагреве 1 дм³ талькомагнезита до температуры 600 °С величина запасаемой тепловой энергии (температура 600 °С выбрана исходя из теплофизических свойств аэрогеля для применения в качестве тепловой изоляции) составит примерно 1,5–1,6 МДж, в то время как для 1 дм³ воды при температуре 100 °С величина запасаемой тепло-

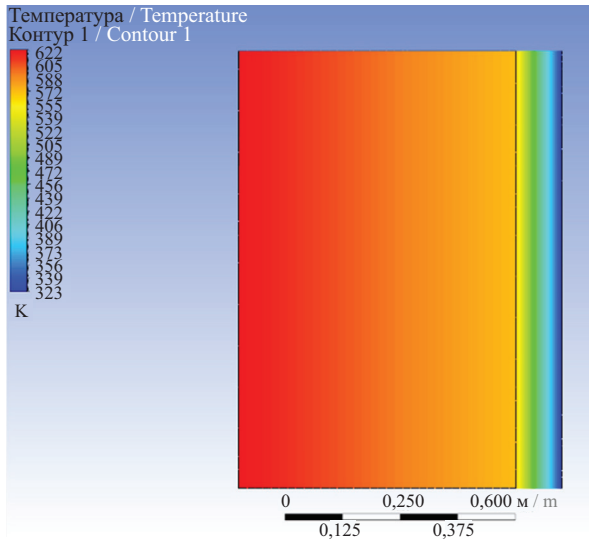
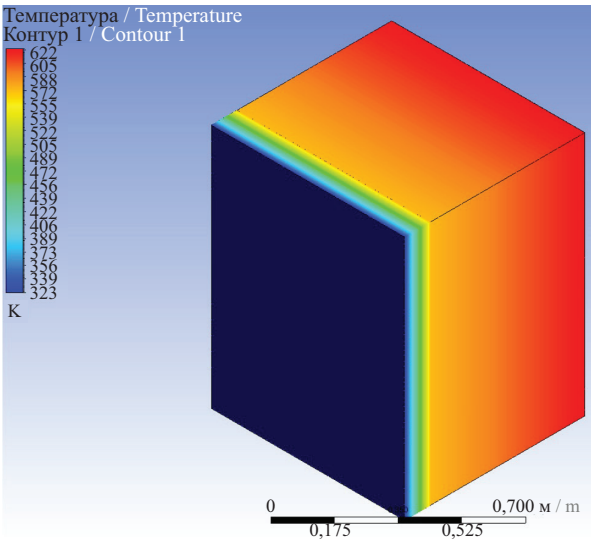


Рис. 6. Температурные профили минеральной ваты (150 мм), 350 °С

Fig. 6. Temperature profiles of mineral wool (150 mm), 350 °С

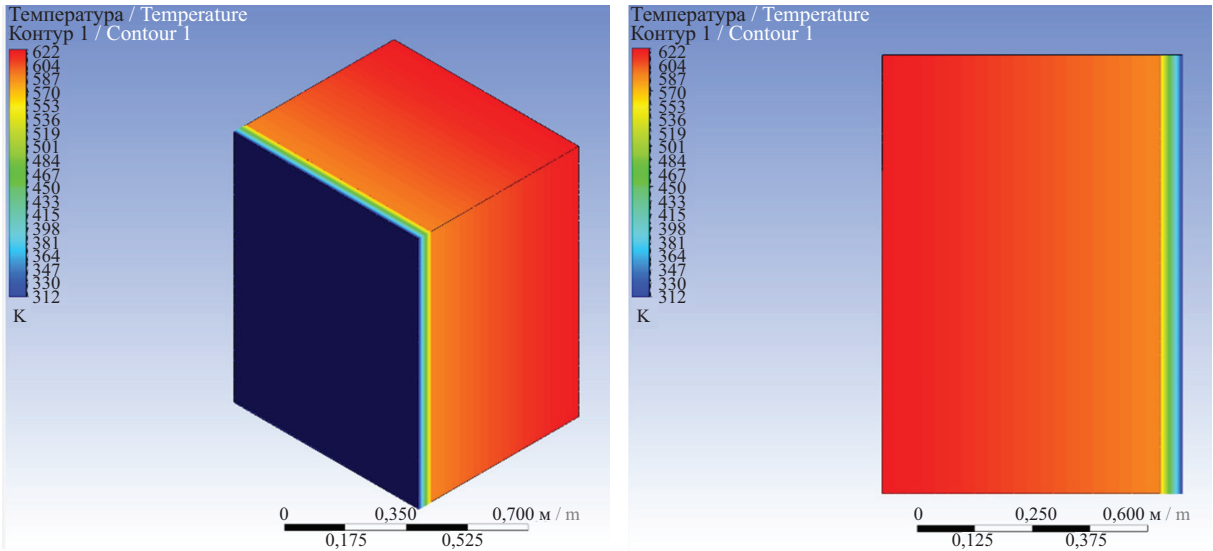


Рис. 7. Температурные профили аэрогеля (50 мм), 350 °С
Fig. 7. Temperature profiles of aerogel (50 mm), 350 °C

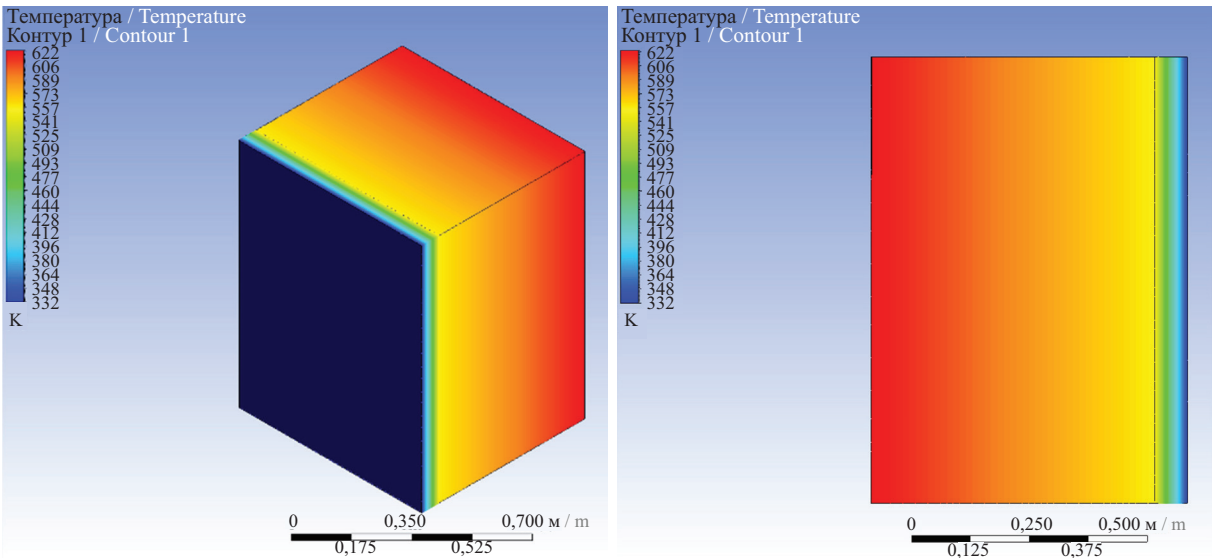


Рис. 8. Температурные профили минеральной ваты (70 мм), 350 °С
Fig. 8. Temperature profiles of aerogel (70 mm), 350 °C

вой энергии будет составлять только 0,4 МДж. Таким образом, количество тепловой энергии в объеме для твердотельных тепловых аккумуляторовкратно выше, чем для жидкостных при условии поддержания высоких температур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Тепловой аккумулятор дает возможность сбалансированно использовать имеющуюся на объекте электроэнергию с перераспределением в тепловую энергию и последующим хранением и сбалансированным применением (выдачей в теплосеть). Достичь эффективности планируется за счет балансировки электрической нагрузки и теплоотдачи, основанной на интеллектуальном измерении ключевых параме-

тров в режиме реального времени и энергоэффективной конструкции устройства. Также использование устройства теплового аккумулятора целесообразно совместно с ВИЭ, что позволяет накапливать тепловую энергию и избежать переизбытка (всплеска) генерации вырабатываемой электроэнергии, что является важным моментом при использовании генераторов возобновляемой энергии.

По полученным данным в ходе моделирования в программном пакете ANSYS можно сделать следующие выводы:

- во всех случаях для разной толщины изоляции температура поверхности всегда оставалась ниже 60 °С, что позволяет эксплуатировать тепловой аккумулятор в помещении, где могут находиться люди;

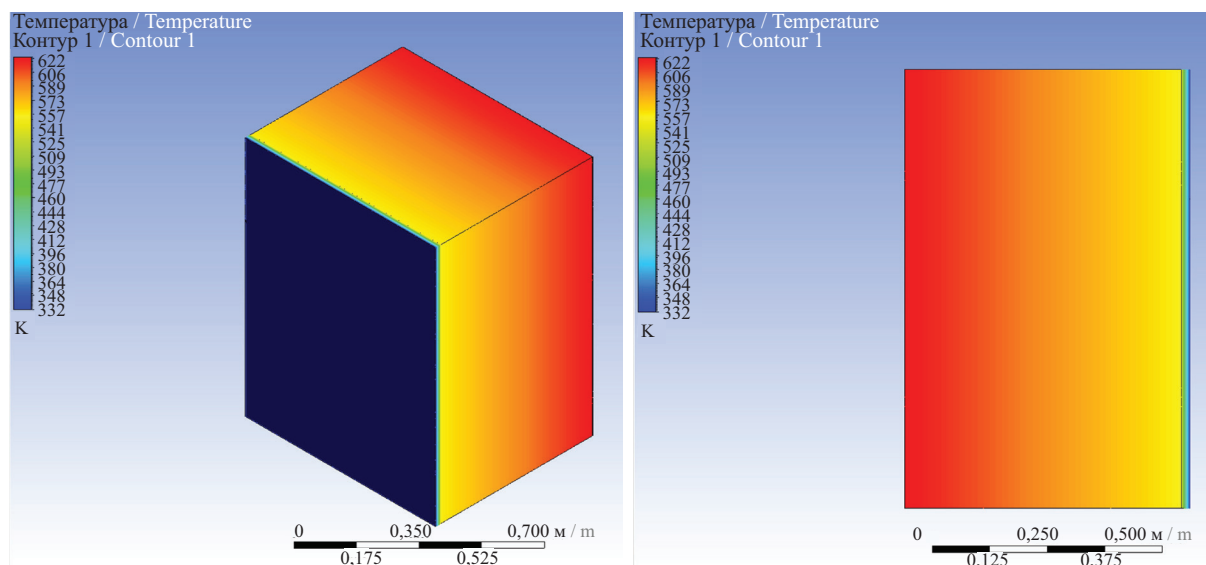


Рис. 9. Температурные профили аэрогеля (20 мм), 350 °С

Fig. 9. Temperature profiles of aerogel (20 mm), 350 °C

• в случае моделирования для минеральной ваты с толщиной изоляции 150 мм и аэрогеля 50 мм температура поверхности оказалась значительно ниже 60 °С, что позволило впоследствии уменьшить толщину слоя изоляции до 70 мм для минеральной ваты и 20 мм для аэрогеля.

Учитывая допущения, сделанные при моделировании эксперимента в программном продукте ANSYS, результаты исследований показывают, что использование тепловой изоляции на основе аэрогеля дает

возможность в несколько раз снизить толщину теплоизолирующего слоя. Несмотря на сложность и дороговизну создания теплоизоляционных материалов на основе аэрогеля, его применение позволит избежать множества проблем, связанных со старением, разрушением и частой заменой тепловой изоляции, снизить нагрузку на теплоизоляционные конструкции и значительно повысить экономическую эффективность теплоэнергетических систем, сократив потери при производстве и передаче тепловой энергии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Моржухин А.М., Моржухина С.В., Назмитдинов Р.Г., Мойя-Полл А. Теплоаккумулирующие материалы (обзор) // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Серия: Естественные и инженерные науки. 2016. № 4 (36). С. 24–33. EDN VROIKD.
2. Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications // Applied Thermal Engineering. 2003. Vol. 23. Issue 3. Pp. 251–283. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8
3. Zhang H., Baeyens J., Cáceres G., Degrevé J., Lv Y. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects // Progress in Energy and Combustion Science. 2016. Vol. 53. Pp. 1–40. DOI: 10.1016/j.pecs.2015.10.003
4. Левина Ю.С., Усачев С.М., Усачев А.М. Получение энергосберегающих строительных материалов на основе традиционного сырья и теплоаккумулирующих добавок // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 4–2 (46). С. 124–126. DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.218. EDN VVTKUD.
5. Бабаев Б.Д. Принципы теплового аккумулярования и используемые теплоаккумулирующие материалы // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 5. С. 760. DOI: 10.7868/S0040364414050019. EDN SKIBBL.
6. Маркин Е.М., Шарнар Н.М. Использование теплового аккумулятора для снижения техногенных тепловых выбросов в окружающую среду // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2021) : сб. мат. Всерос. науч. конф. молодых исследователей с междунар. участием. 2021. С. 148–152. EDN USENGR.
7. Tian Y., Zhao C.Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications // Applied Energy. 2013. Vol. 104. Pp. 538–553. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.11.051
8. Несов А.Е., Репкин Э.С., Сотникова О.А. Анализ тепловых режимов аккумулярования теплоты // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2012. № 2 (7). С. 84–89. EDN NPALAE.
9. Кудабаяев Р.Б., Джумабаев А.А., Сулейменов У.С., Камбаров М.А., Риставлетов Р.А., Калиша

бекова Э.Н. Математическая модель теплообмена при фазовом переходе теплоаккумулирующего материала // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. 2022. № 2 (139). С. 102–110. DOI: 10.32523/2616-7263-2022-139-2-102-110. EDN HMBBLS.

10. Альбинская Ю.С., Усачев С.М., Ресснер Ф., Рудаков О.Б. Направления создания микрокапсулированных теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2013. № 7. С. 21–27. EDN RYFUET.

11. Яковлева Ю.С., Бирюков А.Н. Моделирование физических характеристик теплоаккумулирующих строительных материалов // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 97–104. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-97-104. EDN XKABVK.

12. Борщев Н.О. Определение эффективной тепловой проводимости тепловых аккумуляторов методами параметрической идентификации // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 1 (766). С. 101–109. DOI: 10.18698/0536-1044-2024-1-101-109. EDN MXDXAA.

13. Цымбалюк Ю.В., Гераськин М.В. Основы расчета фазопереходных тепловых аккумуляторов для автономной системы теплоснабжения многоквартирных и блокированных жилых домов // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2014. № 4–2 (17). С. 71–75. EDN STCGLN.

14. Boboev S.M., Eshmatov M.M., Aitmuratov B. Calculation and experimental study of water distributor of stratification heat accumulator of solar heating system // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. № 3 (88). С. 129–137. EDN MYELVA.

15. Умеренкова Э.В., Умеренков Е.В., Бобрышева Д.В. Использование тепловых аккумуляторов для системы теплоснабжения индивидуального жилого дома // Будущее науки – 2018 : сб. науч. ст. 6-й Междунар. мол. науч. конф. 2018. С. 374–377. EDN UOXVNC.

16. Бабаев Б.Д., Мамаев Н.И. Определение тепловой нагрузки системы солнечного теплоснабже-

ния с аккумулятором для жилого дома // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2003. № 2. С. 49–50. EDN HQVBIB.

17. Султангузин И.А., Христенко Б.А., Чайкин В.Ю., Яцук Т.В., Кругликов Д.А., Яворский Ю.В. и др. Разработка и исследование сезонного аккумулятора теплоты и холода для системы энергоснабжения здания // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2021. № 3 (231). С. 39–44. EDN PJQWXI.

18. Сенцов И.В., Постникова П.И., Цыгвинцев И.В., Козлова К.С., Шкорко М.Ю., Журович Е.А. и др. Аккумулирование тепла в тепловом аккумуляторе для дежурного отопления индивидуального дома // Синергия наук. 2017. № 9. С. 353–365. EDN YHHYHF.

19. Пральников Д.Ф., Ткаченко В.С., Ващенко Е.С. Вариант включения в систему теплопотребления многоэтажного жилого дома теплового аккумулятора // Наука молодых — будущее России : сб. науч. ст. 8-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. 2023. С. 138–141. EDN XEZWSE.

20. Бабаев Б.Д. Разработка и исследование энергосистем на основе возобновляемых источников с фазопереходным аккумулированием тепла : дис. М., 2016. 345 с. EDN UMBMEB.

21. Сотникова О.А., Турбин В.С., Григорьев В.А. Аккумуляторы теплоты теплогенерирующих установок систем теплоснабжения // АВОК. 2003. № 5.

22. Melita L., Croitoru C. Aerogel, a high performance material for thermal insulation — a brief overview of the building applications // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 111. P. 06069. DOI: 10.1051/e3s-conf/201911106069

23. Wei T.Y., Lu S.Y. Aerogels for energy saving and storage // Energy Efficiency and Renewable Energy Through Nanotechnology. 2011. Pp. 873–911. DOI: 10.1007/978-0-85729-638-2_25

24. Kong X., Nie R., Yuan J. A review of shape stabilized aerogel-based phase change materials for preparation, classification and applications // Energy and Built Environment. 2023. DOI 10.1016/j.enbenv.2023.11.001

25. Wu L., Zhao B., Gao D., Jiao D., Hu M., Pei G. Solar transparent and thermally insulated silica aerogel for efficiency improvement of photovoltaic/thermal collectors // Carbon Neutrality. 2023. Vol. 2. Issue 1. DOI: 10.1007/s43979-023-00046-8

Поступила в редакцию 18 июня 2024 г.

Принята в доработанном виде 8 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 8 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Валерьевич Федюхин — кандидат технических наук, доцент; Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»); 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1; РИНЦ ID: 729038, Scopus: 55940977500, ResearcherID: T-8964-2019, ORCID: 0000-0002-1819-0450; fedyukhinav@yandex.ru;

Владислав Александрович Карасевич — кандидат технических наук, доцент; Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губ-

кина (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина); 119991, г. Москва, пр-т Ленинский, д. 65, корп. 1; РИНЦ ID: 337965, Scopus: 36237431700, ResearcherID: U-1498-2017; crucian-74@mail.ru;

Михаил Сергеевич Повернов — ведущий инженер; **Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ)**; 117303, г. Москва, ул. Керченская, д. 1 А, корп. 1; Scopus: 58644005600; 8@1024.su;

Ольга Валерьевна Афанасьева — кандидат технических наук, заместитель руководителя Центра трансфера технологий; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера Б; РИНЦ ID: 617556, Scopus: 57212263097, ResearcherID: P-9204-2017, ORCID: 0000-0002-6614-2728; eccolga@mail.ru.

Вклад авторов:

Федюхин А.В. — идея, написание исходного текста.

Карасевич В.А. — написание исходного текста.

Повернов М.С. — проведение расчетов, сбор и обработка результатов, написание статьи.

Афанасьева О.В. — редакторская правка, оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Morzhukhin A.M., Morzhukhina S.V., Nazmitdinov R.G., Moia-Pol A. Heat storage materials. Bulletin of Dubna International University for Nature, Society, and Man. *Series: Natural and Engineering Sciences*. 2016; 4(36):24-33. EDN VROIKD. (rus.).
2. Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003; 23(3):251-283. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8
3. Zhang H., Baeyens J., Cáceres G., Degrevé J., Lv Y. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016; 53:1-40. DOI: 10.1016/j.pecs.2015.10.003
4. Levina J.S., Usachev S.M., Usachev A.M. Getting energy-saving building materials based on traditional raw materials and heat-retaining additives. *International Research Journal*. 2016; 4-2(46):124-126. DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.218. EDN VVTUKD. (rus.).
5. Babaev B.D. Principles of heat accumulation and heat-accumulating materials in use. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2014; 52(5):760. DOI: 10.7868/S0040364414050019. EDN SKIBBL. (rus.).
6. Markin E.M., Sharpar N.M. Use of thermal accumulator to reduce man-made thermal emissions into the environment. *Innovative development of equipment and technologies in industry (INTEX-2021) : collection of materials of the All-Russian scientific conference of young researchers with international participation*. 2021; 148-152. EDN USENGR. (rus.).
7. Tian Y., Zhao C.Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*. 2013; 104:538-553. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.11.051
8. Nesov A.E., Repkin E.S., Sotnikova O.A. Analysis of thermal regimes of heat accumulation. Scientific Journal. *Engineering Systems and Structures*. 2012; 2(7):84-89. EDN NPALAE. (rus.).
9. Kudabaev R.B., Jumabayev A.A., Suleimenov U.S., Kambarov M.A., Ristavletov R.A., Kalshabekova E.N. Mathematical model of heat transfers during phase transition of heat storage material. *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University Technical Science and Technology Series*. 2022; 2(139):102-110. DOI: 10.32523/2616-7263-2022-139-2-102-110. EDN HMBBLS. (rus.).
10. Albinskaya Y.S., Usachev S.M., Roessner F., Rudakov O.B. The directions of creation of the micro-capsulated heat-retaining materials with phase transition. Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. *Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science*. 2013; 7:21-27. EDN RYFUET. (rus.).
11. Yakovleva Yu.S., Biryukov A.N. Modeling of physical characteristics of heat-accumulating building materials. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023; 2(186):97-104. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-97-104. EDN XKABVK. (rus.).
12. Borschev N.O. Determination of the thermal battery effective thermal conductivity by the parametric identification methods. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2024; 1(766):101-109. DOI: 10.18698/0536-1044-2024-1-101-109. EDN MXDXAA. (rus.).
13. Cymbalyuk Yu.V., Geraskin M.V. Basics of calculation of phase-change thermal accumulators for autonomous heat supply system of single-family and block residential buildings. Scientific Journal. *Engineering Systems and Structures*. 2014; 4-2(17):71-75. EDN STCGLN. (rus.).
14. Boboev S.M., Eshmatov M.M., Ajtmuratov B. Calculation-experimental study of water distributor of stratification heat accumulator of solar heating system. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. *Construction and Architecture*. 2022; 3(88):129-137. EDN MYELVA. (rus.).

15. Umerenkova E.V., Umerenkov E.V., Bobrysheva D.V. Use of thermal accumulators for the heat supply system of an individual residential building. *Future of Science – 2018 : collection of scientific articles of the 6th International Youth Scientific Conference*. 2018; 3:374-377. EDN UOXVNC. (rus.).

16. Babaev B.D., Mamaev N.I. Determination of the heat load of a solar thermal system with accumulator for a residential building. University News. North-Caucasian Region. *Technical Sciences Series*. 2003; 2:49-50. EDN HQVBIB. (rus.).

17. Sultanguzin I.A., Khristenko B.A., Chaykin V.Yu., Yatsyuk T.V., Kruglikov D.A., Yavorovsky Yu.V. et al. Development and research of seasonal heat and cold storage for building energy supply system. *Plumbing, Heating and Air Conditioning*. 2021; 3(231):39-44. EDN PJQWXI. (rus.).

18. Sentsov I.V., Postnikova P.I., Tsygvintsev I.V., Kozlova K.S., Shkorko M.Yu., Zhurovich E.A. et al. Heat storage in a thermal accumulator for duty heating of an individual house. *Synergy of Sciences*. 2017; 9:353-365. EDN YHHYHF. (rus.).

19. Pralnikov D.F., Tkachenko V.S., Vashenko E.S. Variant of including a heat accumulator in the heat consumption system of a multi-storey residential building. *Science of the young — the future of Russia : collection of scientific articles of the 8th International Scientific*

Conference of Advanced Developments of Young Scientists. 2023; 138-141. EDN XEZWSE. (rus.).

20. Babaev B.D. *Development and research of energy systems based on renewable sources with phase-transient heat storage : dissertation*. Moscow, 2016; 345. EDN UMBMEB. (rus.).

21. Sotnikova O.A., Turbin B.C., Grigorev V.A. Heat accumulators of heat generating units of heat supply systems. *ABOK*. 2003; 5. (rus.).

22. Melita L., Croitoru C. Aerogel, a high performance material for thermal insulation — a brief overview of the building applications. *E3S Web of Conferences*. 2019; 111:06069. DOI: 10.1051/e3sconf/201911-106069

23. Wei T.Y., Lu S.Y. Aerogels for Energy Saving and Storage. *Energy Efficiency and Renewable Energy Through Nanotechnology*. 2011; 873-911. DOI: 10.1007/978-0-85729-638-2_25

24. Kong X., Nie R., Yuan J. A review of shape stabilized aerogel-based phase change materials for preparation, classification and applications. *Energy and Built Environment*. 2023. DOI: 10.1016/j.enbenv.2023.11.001

25. Wu L., Zhao B., Gao D., Jiao D., Hu M., Pei G. Solar transparent and thermally insulated silica aerogel for efficiency improvement of photovoltaic/thermal collectors. *Carbon Neutrality*. 2023; 2(1). DOI: 10.1007/s43979-023-00046-8

Received June 18, 2024.

Adopted in revised form on November 8, 2024.

Approved for publication on November 8, 2024.

B I O N O T E S : **Alexander V. Fedyukhin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; build. 1, 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; ID RSCI: 729038, Scopus: 55940977500, ResearcherID: T-8964-2019, ORCID: 0000-0002-1819-0450; fedyukhinav@yandex.ru;

Vladislav A. Karasevich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Gubkin University)**; build. 1, 65 Leninsky prospekt, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RSCI: 337965, Scopus: 36237431700, ResearcherID: U-1498-2017; crucian-74@mail.ru;

Mihail S. Povernov — leading engineer; **Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)**; build. 1, 1 A Kerchenskaya st., Moscow, 117303, Russian Federation; Scopus: 58644005600; 8@1024.su;

Ol'ga V. Afanas'eva — Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Technology Transfer Center; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 B Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 617556, Scopus: 57212263097, ResearcherID: P-9204-2017, ORCID: 0000-0002-6614-2728; eccolga@mail.ru.

Contribution of the authors:

Alexander V. Fedyukhin — idea, writing the original text.

Vladislav A. Karasevich — writing the original text.

Mihail S. Povernov — carrying out calculations, collecting and processing results, writing the article.

Ol'ga V. Afanas'eva — editing, design of the article.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 696.1
DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1977-1989

Особенности развития питтинговой коррозии
стальных труб систем водоснабжения

Валентин Александрович Чухин, Николай Алексеевич Макиша
Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИИВ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследована питтинговая коррозия, предшествующая появлению свищей в стальных и чугунных трубопроводах систем водоснабжения. Процесс образования свищей включает следующие фазы: формирование бугорков, концентрирование электролита внутри бугорков, зарождение и развитие стабильных питтингов на поверхности корродирующего металла под бугорками с дальнейшим образованием отверстий в стенках труб.

Материалы и методы. Предметом изучения служили образцы осадка из корродированных труб, находящиеся в сухом виде. Исследование направлено на изучении роли, которую играет один из четырех структурных элементов бугорков — плотный слой. Выявлено двойственное влияние плотного слоя на коррозию. С одной стороны, наличие плотного слоя защищает металл от дальнейшей коррозии, с другой — способствует созданию условий, при которых коррозия из равномерной превращается в питтинговую (точечную).

Результаты. Экспериментально установлено, что в процессе коррозии внутри бугорков постепенно растет концентрация раствора, содержащего как компоненты корродирующего металла (катионы), так и находящейся в трубах воды (анионы). Для объяснения коррозии, протекающей в бугорке, проведено сравнение плотного слоя бугорков с анионообменной мембраной, обладающей селективными свойствами, в результате чего в структуре бугорков повышается концентрация агрессивных хлорид-ионов. При этом за счет гидролиза образовавшегося хлорида железа и снижения pH скорость коррозии значительно возрастает. Также рассмотрены вопросы формирования кристаллических форм продуктов коррозии, которые образуются после извлечения труб из системы водоснабжения.

Выводы. Выявлена определяющая роль, которую играет один из четырех структурных элементов коррозионных бугорков — плотный слой. Предложенная методика изучения коррозионного осадка может быть использована для оценки действия различных ингибиторов коррозии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система водоснабжения, коррозия, осадок, питтинг, структура осадка, свищи, стальные и чугунные трубопроводы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чухин В.А., Макиша Н.А. Особенности развития питтинговой коррозии стальных труб систем водоснабжения // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1977–1989. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1977-1989

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Макиша, makishana@mgsu.ru.

Development of pitting corrosion of steel pipes of water supply
systems

Valentin A. Chukhin, Nikolay A. Makisha
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A research was conducted to study pitting corrosion, which precedes the appearance of fistulas in steel and cast-iron pipelines of water supply systems. The process of fistula formation includes the following phases: the formation of tubercles, the concentration of electrolyte inside the tubercles, the origin and development of stable pitting on the surface of corroding metal under the tubercles with further formation of holes in the walls of pipes.

Materials and methods. The study was aimed at studying the role played by the dense layer that is one of the four structural elements of the tubercles. The dual effect of the dense layer on corrosion revealed. On the one hand, the presence of a dense layer protects the metal from further corrosion, on the other hand, it helps to create conditions under which corrosion turns from uniform to pitting.

Results. It was experimentally established that during the corrosion process inside the tubercles, the concentration of the solution containing both components of the corroding metal (cations) and water in the pipes (anions) gradually increases. To explain the corrosion process occurring in the tubercle, a comparison of a dense layer of tubercles with an anion exchange membrane with selective properties was carried out, as a result of which the concentration of aggressive chloride ions increases in the structure of the tubercles. At the same time, due to the hydrolysis of the formed iron chloride and a decrease in pH, the corrosion rate increases significantly. The paper also discusses the formation of crystalline forms of corrosion products that are formed after removing pipes from the water supply system.

Conclusions. The determining role played by one of the four structural elements of corrosion tubercles — a dense layer — was revealed. The proposed method for studying the corrosive sludge can be used to evaluate the effect of various corrosion inhibitors.

KEYWORDS: water supply system, corrosion, scale, pitting, scale structure, fistulas, steel and cast-iron pipelines

FOR CITATION: Chukhin V.A., Makisha N.A. Development of pitting corrosion of steel pipes of water supply systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12): 1977-1989. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1977-1989 (rus.).

Corresponding author: Nikolay A. Makisha, makishana@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Коррозия стальных и чугунных трубопроводов в системах коммунального водоснабжения приводит к значительному экономическому ущербу. В Российской Федерации ежегодно заменяют сотни километров трубопроводов, которые выводят из эксплуатации из-за интенсивного развития коррозионных процессов. По данным Минстроя РФ, половина аварий и инцидентов в сфере жилищно-коммунального хозяйства приходится на водоснабжение, в частности на порывы водопроводных сетей¹. Аварии случаются либо из-за превышения нормативного срока эксплуатации трубопроводов, либо вследствие аномально быстрой коррозии, которая развивается в большинстве случаев бессистемно и имеет множество причин² [1–3]. По статистическим данным АО «Мосводоканал», особенно часто встречающимися повреждениями стальных трубопроводов в земле являются свищи — 68 %¹.

Проявления коррозии в стальных и чугунных трубах в системах холодного и горячего водоснабжения хорошо изучены^{3, 4, 5, 6, 7, 8} [4, 5]. Обычно в про-

цессе эксплуатации на внутренней поверхности трубопроводов появляются бугорки, которые имеют специфическую структуру и состав. К структурным особенностям бугорков относят наличие (со стороны потока воды) четырех элементов: рыхлый поверхностный слой; тонкий плотный внутренний слой, создающий жесткий каркас бугорка; рыхлое ядро, включающее продукты коррозии; корродирующее основание^{3, 4, 5, 6, 7, 8} [4, 5]. На рис. 1 представлены фрагменты труб с коррозионными бугорками, причем труба на рис. 1, *a* имеет бугорки с рыхлым ядром, а на рис. 1, *b* — полые бугорки. В некоторых работах отмечается, что внутренняя полость бугорка заполнена раствором, имеющим кислую реакцию³.

Наиболее изученными элементами коррозионных бугорков, с точки зрения их формирования, являются внешний и плотный слой^{3, 4, 6, 7, 8} [4–6]. Структура и состав ядра также известны, но при этом отсутствует информация, какие процессы протекают внутри бугорков в течение их роста. Под бугорками в большинстве случаев присутствуют язвы, однако в некоторых случаях появляются свищи. Ответа на вопрос, почему не все бугорки превращаются в свищи, до сих пор нет.

Можно выделить три направления исследования механизма коррозии. Первое направление связано с воздействием внешнего электрического тока на образцы различных металлов. Сюда также относится исследование питтинговой коррозии с использованием электрохимической импедансной спектроскопии [7, 8]. Второе направление включает натурные исследования коррозии стальных и чугунных труб в реальных условиях [8–11]. Третье направление рассматривает результаты воздействия коррозии на трубопроводы после прекращения эксплуатации объекта или его отдельных элементов. В рамках третьего направления большинство исследователей работают с образцами осадка, находящимися вне естественной среды, т.е. с момента, когда они были извлечены и доставлены в лабораторию для обследования, проходит большой промежуток времени^{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8} [12].

В работе J. Swietlik и соавт. впервые приведены данные по изучению структурного и кристаллографического состава коррозионных бугорков в условиях, максимально приближенных к естественной внутренней среде. Выявлено преимущественное наличие зеленой ржавчины: соединений железа и различных анионов, отражающих минеральный состав природных вод. Отмечается, что почти во всех образ-

¹ Больше половины аварий и инцидентов в ЖКХ в России приходится на водоснабжение // ТАСС. URL: <https://tass.ru/neknevzhimost/10179099?ysclid=lsuoiy5540934720312>

² Sander A., Berghult B., Broo A.E., Johansson E., Hedberg T. Iron corrosion in drinking water distribution systems — The effect of pH, calcium and hydrogen carbonate // *Corrosion Science*. 1996. Vol. 38. No. 3. Pp. 443–455.

³ Clarke B.H., Aguilera A.M. Microbiologically influenced corrosion in fire sprinkler systems automatic sprinkler systems : handbook. 2007.

⁴ Sarin P., Snoeyink V., Lytle D., Kriven W. Iron corrosion scales: model for scale growth, iron release, and colored water formation // *Journal of Environmental Engineering*. 2004. Vol. 130 (4). Pp. 364–373.

⁵ Gerke T.L., Maynard J.B., Schock M.R., Lytle D.L. Physicochemical characterization of five iron tubercles from a single drinking water distribution system: Possible new insights on their formation and growth // *Corrosion Science*. 2008. Vol. 50 (7). Pp. 2030–2039.

⁶ Ray R.I., Lee J.S., Little B.J., Gerke T. The anatomy of tubercles: A corrosion study in a fresh water estuary // *Materials and Corrosion*. 2010. Vol. 61 (12). Pp. 993–999.

⁷ Herro H.M. MIC myths — Does pitting cause MIC? // *Corrosion98* : in conference proc. Paper No. 278. Houston, TX : NACE, 1998.

⁸ Sarin P., Snoeyink V.L., Bebee J., Kriven W.M., Clement J.A. Physico-chemical characteristics of corrosion scales in old iron pipes // *Water Research*. 2001. Vol. 35 (912). Pp. 2961–2969.

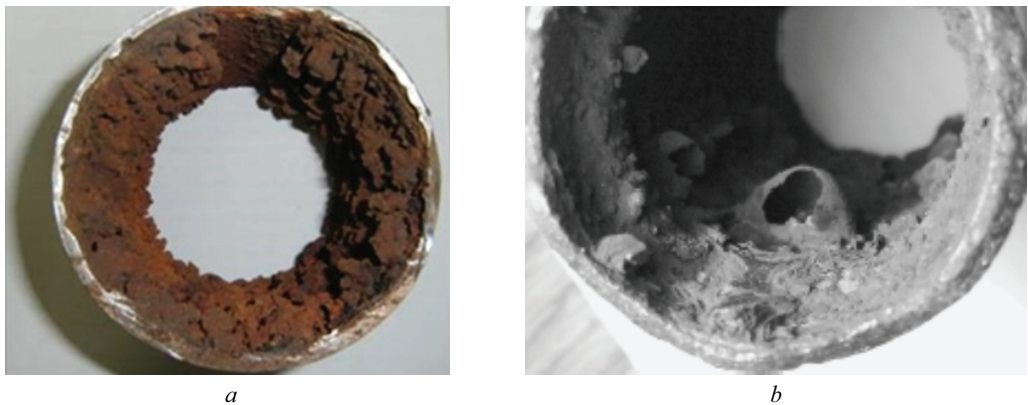


Рис. 1. Фрагменты труб с коррозионными бугорками: *a* — стальная оцинкованная труба, Ду 100; *b* — стальная труба из системы противопожарного водопровода³

Fig. 1. Pipe fragments with corrosion tubercles: *a* — galvanized steel pipe (DN 100 mm); *b* — steel pipe of firefighting water supply³

цах коррозионного осадка обнаружены значительные количества наименее стабильной зеленой ржавчины в хлоридной форме. В ходе проведения эксперимента авторы исследовали связанную воду, т.е. воду, окружающую и частично заполняющую бугорки в трубах. Показано, что высушивание образцов перед анализом существенно изменяет кристаллографические фазы, изначально присутствующие в продуктах коррозии [13].

В табл. 1 представлен химический состав связанной воды. Были исследованы образцы осадка из чугунных водопроводных труб, изъятых из системы наружного водопровода, диаметром 80–120 мм. Содержание хлоридов в водопроводной воде, для приведенного в табл. 1 примера, составляет 130,8 мг/л, величина pH в связанной воде — 5,84 [13].

Из табл. 1 следует, что суммарное солесодержание составляет 3257,66 мг/л, а концентрация хлоридов в связанной воде в 13,8 раз превышает концентрацию хлоридов в исходной водопроводной воде. Сумма катионов равна 45,077 мг-экв/л, сумма анионов — 56,718 мг-экв/л. Неравенство сумм анионов и катионов свидетельствует, что в составе связанной воды содержатся и другие неучтенные катионы. Необходимо также обратить внимание на низкое содержание в связанной воде сульфатов. Наличие в бугорках раствора солей, имеющих высокую концентрацию, требует изучения.

Очевидно, что концентрация солей в растворе, который находится в бугорках, зависит от концентрации солей во внешней воде, протекающей по трубам. Зависимость скорости коррозии от солесодержания воды наблюдают многие исследователи [14–16]. При этом отмечается, что качественный состав воды также играет большую роль, особенно содержание хлоридов [14, 17–20]. Однако тот диапазон солесодержания в воде, который характерен для питьевой воды, поступающей в водопроводную сеть, не может быть причиной развития аномально быстрой локальной коррозии стальных и чугунных водопроводных труб с образованием свищей.

За последние годы в зарубежной литературе появилось много работ, направленных на изучение питтинговой коррозии нержавеющей стали. В обзоре, посвященном теории питтинговой коррозии, наблюдаемой в металлических материалах, автор делает вывод, что развитие устойчивого питтинга определяется его внутренним химическим составом и высокой концентрацией солей [21]. Писториус и Бурштейн⁹, проводя исследования питтинговой коррозии на образцах нержавеющей стали, устано-

⁹ Pistorius P.C., Burstein G.T. Metastable pitting corrosion of stainless steel and the transition to stability // Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A Physical and Engineering Sciences. 1992. Vol. 341. Pp. 531–559. DOI: 10.1098/rsta.1992.0114

Табл. 1. Химический состав связанной воды [13]

Table 1. Chemical composition of the bound water [13]

Катионы, мг/л/мг-экв/л Cations, mg/l/mg-eq/l	Fe ²⁺	Mn ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
	960/ 34,38	3,5/ 0,064	3,8/ 0,097	23/ 1,0	12,6/ 1,036	170/ 8,5
Анионы, мг/л/мг-экв/л Anions, mg/l/mg-eq/l	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	—
	1808,2/ 51,007	267,99/ 5,583	0,47/ 0,025	8,1/ 0,101	0,11/ 0,002	—

вили область значений концентрации раствора, находящегося в объеме питтинга, которая предшествует началу роста стабильного питтинга. В другой работе¹⁰ авторы установили, что для нержавеющей стали типа 304 концентрация катионов металлов в растворе должна быть выше 75–80 % насыщения хлоридной соли для предотвращения репассивации. Если концентрация катионов металлов менее 75 % насыщения (т.е. ниже 3 М), анолит недостаточно агрессивен, чтобы поддерживать быстрое растворение сплава, и репассивация неизбежна. Агрессивный анолит, образовавшийся в растущем питтинге, является результатом низкого pH и высокой концентрации хлоридов.

На основании проведенных исследований Писториус и Бурштейн⁹ предложили формулу, по которой может быть определена концентрация солей корродирующего металла в питтинге:

$$\Delta C = \left(\frac{2\pi}{3 \cdot z \cdot F \cdot D} \right) \cdot i \cdot a, \quad (1)$$

где ΔC — разность концентраций между внутренней поверхностью питтинга и объемом раствора вдали от питтинга; z — валентность металла; F — число Фарадея; D — коэффициент диффузии катионов металлов в растворе; i — плотность тока; a — радиус питтинга.

Уравнение (1) показывает, что для поддержания роста питтингов требуется минимальное произведение плотности тока (i) и глубины или радиуса питтинга (a). При подстановке $\Delta C = 3$ М, $z = 2,19$, $F = 96\,485$ Кл моль⁻¹ и $D = 10^{-9}$ м²с⁻¹ критическое значение $i \cdot a$ составляет 0,3 А·м⁻¹. Диффузионный анализ определяет узкий диапазон произведения $i \cdot a$, в котором питтинги стабильны. Нижний предел устанавливается, как указано выше, с требованием, чтобы ΔC превышало 3 М; верхний предел определяется растворимостью соли металла. При концентрации насыщения соли хлорида железа, равной 4,2 М, условие стабильного роста питтинга выражается как:

$$0,3 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1} \leq i \cdot a \leq 0,6 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}. \quad (2)$$

В более поздней работе Писториус и Бурштейн¹¹ уточнили роль перфорированного покрытия над питтингом, которое «служит дополнительным барьером для диффузии и поддерживает достаточно агрессивную концентрацию анолита. Небольшие разрывы этого покрытия по мере роста метастабильного питтинга увеличивают скорость диффузии без разбавления анолита питтинга и поддерживают рост питтинга. Такие разрывы могут возникать из-за эффекта разли-

цы осмотического давления, развивающегося через покрытие». Роль твердой солевой пленки в формировании питтинговой коррозии отмечают многие авторы. Солевая пленка может образовываться на поверхности металла из-за условий пересыщения, когда концентрация ионов в растворе питтинга растет из-за увеличения плотности тока [22]. Шайнер и Хеллмич попытались смоделировать перфорированное покрытие и его влияние на диффузионные процессы¹². Важность перфорированного покрытия подчеркивалась и в других исследованиях [23, 24], однако его роль до конца не выяснена.

Несмотря на то что приведенные примеры дают необходимую информацию о механизме питтинговой коррозии, следует отметить, что в проведенных исследованиях авторы изначально работали с растворами солей с высокой концентрацией, при этом не обсуждая вопроса, каким образом создается требуемая концентрация солей на границе металл–раствор, что особенно важно при наличии внешней воды с меньшим солесодержанием. Поэтому основная цель настоящей статьи связана с выяснением механизма, который обеспечивает реализацию подходящих условий для возникновения и развития стабильной питтинговой коррозии под бугорками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предметом изучения в настоящей работе служили образцы осадка из корродированных труб, находящиеся в сухом виде. Проведение эксперимента заключалось в извлечении бугорков из дефектных труб и выполнении анализа растворимых компонентов осадка, находящихся в бугорках. Внешний вид внутренней поверхности фрагмента стальной трубы без покрытия Ду 300, извлеченной из системы наружного водопровода г. Москвы после 36 лет эксплуатации, представлен на рис. 2. Стальная поверхность под слоем коррозионных отложений имеет следы язвенной коррозии, а также точечные повреждения на фоне плоских следов, глубина точечных повреждений — от 1,0 до 3,0 мм, диаметр — от 2 до 5 мм. Кроме того, имеются следы обширной коррозии: толщину «съеденного» металла можно оценить по оставшимся участкам: 0,5–1,0 мм. Коррозионные отложения на поверхности трубы — сплошные, плотные, прочные, с овальными бугорками размером 5 × 5–10 × 10 мм. Высота бугорков 5–8 мм. Бугорки были отделены от стенки трубы и разделены на три группы по следующему признаку: к 1-й группе отнесены бугорки, имеющие полный набор структурных элементов: наружный и плотный слой, ядро и подошву. Ко 2-й группе — без подошвы, к 3-й — бугорки, наиболее деформированные при удалении из трубы.

¹⁰ Gaudet G.T., Mo W.T., Hatton T.A., Tester J.W., Tilly J., Isaacs H.S. et al. Mass transfer and electrochemical kinetic interactions in localized pitting corrosion // Engineering, Chemistry, Materials Science J. 1986. Pp. 949–958.

¹¹ Pistorius P.C., Burstein G.T. Growth of corrosion pits on stainless steel in chloride solution containing dilute sulphate // Corrosion Science. 1992. Vol. 33. Pp. 1885–1897. DOI: 10.1016/0010-938x(92)90191-5

¹² Scheiner S., Hellmich C. Stable pitting corrosion of stainless steel as diffusion-controlled dissolution process with a sharp moving electrode boundary // Corrosion Science. 2007. Vol. 49. Pp. 319–346. DOI: 10.1016/j.corsci.2006.03.019

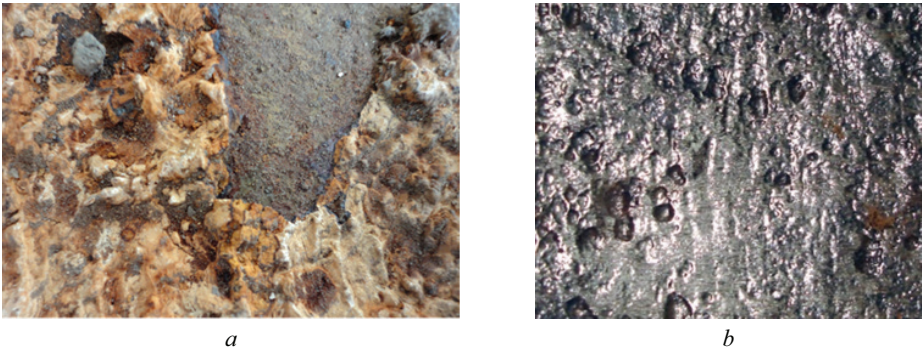


Рис. 2. Фотографии внутренней поверхности трубы (Ду 300 мм): *a* — углеродистая сталь с осадком; *b* — фотография внутренней поверхности после удаления слоя коррозионных отложений (увеличение 2х)
Fig. 2. Photos of the inner surface of the pipe (DN 300 mm): *a* — carbon steel with sludge; *b* — photo of the inner surface after removing the layer of corrosion scale (magnification 2x)

Номера осадка в табл. 2, 3 — 1, 2 и 3 соответственно. На рис. 2 приведены фотографии внутренней поверхности трубы.

Для изучения состава растворов использовали стандартные методики и современное аналитическое оборудование. Содержание хлоридов, кальция и магния определяли титрованием стандартными растворами; железо, сульфаты и нитраты измеряли на спектрофотометре Lange 5000, pH — на pH-метре Hanna HI 2215. Микрофотографии осадка получены на электронном микроскопе Quanta FEI 250 в режиме вторичных электронов без напыления при ускоряющем напряжении 10–25 кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведение экспериментов выполняли в следующей последовательности. Навеску извлеченных из труб бугорков с удаленными пылевидными фракциями помещали в мерный цилиндр с определенным объемом дистиллированной воды V_1 и сразу измеряли объем воды в цилиндре вместе с осадком V_2 . Затем через 48 ч снова фиксировали объем воды в цилиндре V_3 , который уменьшился за счет поглощения бугорками. По этим данным рассчитывали плотность материала бугорков, а также объем воды, который находился в осадке V_4 в момент извлечения из цилиндра: $V_4 = V_2 - V_3$. Кратность концентрирова-

ния K определяли как частное от деления V_1 на V_4 . В табл. 2 приведены значения плотности осадка и объем сорбированной воды V_4 .

При проведении исследования было сделано предположение, что объем V_4 равен объему раствора, который находился в бугорках до момента извлечения трубы из грунта. При этом дистиллированная вода, проникая в поры, растворяет хорошо растворимые соли, находящиеся в структуре бугорков, образуя смешанный раствор десорбированных солей. Таким образом, за период 48 ч происходит выравнивание концентрации солей в цилиндре и в бугорках. Относительно низкая плотность осадка (2,65–2,87 г/см³) по сравнению с плотностью оксидов и гидроксидов железа свидетельствует о наличии пор и пустот в структуре бугорков.

В табл. 3 приведены расчетные значения концентраций ионов в растворе, находившемся внутри бугорков, определенные путем умножения концентрации солей в пробе воды после растворения и десорбции солей из бугорков на коэффициент концентрирования K . Десорбция солей из бугорков проводилась однократно.

По значению кислотности каждой пробы с учетом коэффициента концентрирования расчетным путем были установлены значения pH растворов, находящихся непосредственно в порах бугорков в момент

Табл. 2. Результаты измерений поглощения дистиллированной воды осадком

Table 2. Results of measurements of distilled water absorption by sludge

Номер Пробы Specimen number	Вес осадка, г Sediment weight, g	Объем дистиллята в мерном цилиндре, мл Volume of distillate in the measuring cylinder, ml				Коэффициент концентрирования K Concentration coefficient K	Плотность осадка, г/см ³ Sludge density, g/cm ³
		без осадка V_1 free of sludge V_1	с осадком V_2 with sludge V_2	через 48 ч V_3 after 48 h V_3	поглощенного осадком V_4 absorbed by sludge V_4		
1	50,4095	150	173	170	3	50,0	2,52
2	50,2405	150	171	167,5	3,5	42,8	2,87
3	50,2026	150	172	168,5	3,5	42,8	2,71

Табл. 3. Расчетный состав раствора, находившегося внутри бугорков

Table 3. Calculated composition of the solution inside the tubercles

Номер пробы Specimen number	pH */** pH */**	Концентрация, мг-экв/л** / Concentration, mg-eq/l**						
		H ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Fe ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
1	3,32/1,63	23,93	756	1,0	0,24	5,05	150	550
2	3,73/2,10	7,97	647	0	0,83	3,59	171	471
3	3,28/1,65	22,46	749	0	0,97	5,91	170	514

Примечание: * — определение в пробе воды с десорбированными солями; ** — расчетные значения.
Note: * — determination in water specimen with desorbed salts; ** — calculated values.

прекращения эксплуатации трубопровода. Данные табл. 3 подтверждают, что в структуре бугорков находился многокомпонентный раствор солей, суммарная концентрация которых значительно превосходит содержание солей в исходной воде, протекающей по трубопроводу.

В дополнение к определению количественного состава воды оценивался качественный состав десорбированных солей. Для этого 3 мл воды (*V*₃) выпаривали на подложке из алюминиевой фольги в сушильном шкафу при температуре 80 °С. Сухой осадок изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta FEI 250 и энергодисперсионного спектрального анализатора EDAX (рис. 3).

Сведения, полученные с помощью электронного микроскопа, показывают, что основными компонентами раствора являются хлориды, нитраты и кальций. Вклад каждого из остальных элементов оценивается в 0,3–1,5 %.

Анализ полученных данных, структурных особенностей бугорков и теоретических представлений о протекающих внутри процессах позволяет сделать вывод о последовательности развития питтинговой коррозии внутри водопроводных труб. При контакте

с водой поверхность металла поляризуется и на ней появляются анодные и катодные участки. На анодных участках растет рыхлый слой гидроксидов железа с иммобилизованной водой. Процесс коррозии контролируется кислородной деполяризацией. Первая фаза — формирование бугорков, включает закрепление основания бугорка на внутренней поверхности трубы, образование плотного слоя, прочно прилегающего к металлу. В работе [25] было сделано наблюдение, что контур бугорка на поверхности металла формируется под действием протекающей по трубам воды и закрепляется через 60–70 суток. По мере снижения концентрации кислорода на поверхности металла в слое осадка происходит изменение окислительно-восстановительной среды, что влечет за собой формирование плотного слоя, подробно описанного в статье P. Sarin и соавт.⁴, и собственно бугорка. Плотный слой на этой стадии — относительно проницаемый для ионов и воды. Преобразование гидроксидов железа в магнетит, формирующий плотный слой, протекает с дегидратацией гидроксидов и приводит к появлению свободной воды внутри бугорка. При отсутствии кислорода деполяризатором служат ионы водорода, которые на катодных

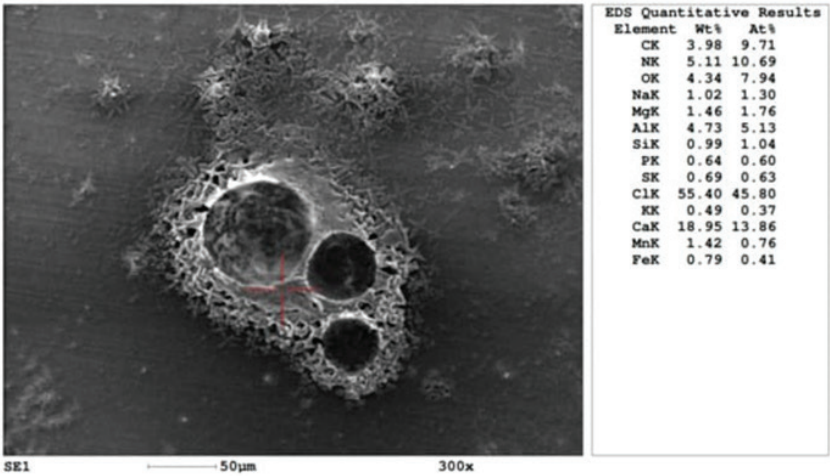


Рис. 3. Микрофотография и элементный состав (в области, отмеченной красным крестом) десорбированной воды с десорбированными солями

Fig. 3. Microphotograph and elemental composition (in the area marked with a red cross) of desorbed water with desorbed salts

участках металла внутри бугорка восстанавливаются до молекулярного водорода, формирующего «дымоходы» в структуре бугорка⁵.

Ко второй фазе следует отнести процесс роста концентрации солей внутри бугорка. Как следует из литературного обзора, приведенного во введении, питтинг является стабильным при очень высокой концентрации раствора, превышающей 3 моль/л. Таким образом, необходимо объяснить, как плотный слой обеспечивает не только перенос ионов и воды, но и появление раствора с высокой концентрацией.

Хорошо изученным методом получения высококонцентрированных растворов под действием постоянного электрического тока является электродиализ (не имеющий непосредственного отношения к коррозии, но отражающий смысл происходящего явления) с использованием аппаратов с «замкнутыми» рассольными камерами, в которые не предусмотрена подача воды извне, а концентрирование происходит за счет осмотического и электроосмотического переноса гидратированных ионов через селективно проницаемые анионитовые и катионитовые мембраны^{13, 14, 15, 16}.

Так как анодом при коррозии служит металл, то для нейтрализации заряда катионов железа в растворе требуются анионы. Следовательно, в этом случае плотный слой должен выполнять роль анионитовой мембраны. На основании проведенных исследований по определению качественного состава десорбированных солей можно утверждать, что плотный слой обладает селективными свойствами, предпочтительно пропуская одновалентные хлорид-ионы (табл. 3). Таким образом, повышение концентрации катионов железа внутри бугорка за счет коррозии обеспечивается переносом эквивалентного количества гидратированных хлорид-ионов, а также сульфатов и нитратов в незначительных количествах, вызывая рост общей концентрации электролита в бугорке и усиление его агрессивных свойств.

Экспериментально установлено, что концентрация раствора солей, которая может быть достигнута в ходе мембранного концентрирования, растет с увеличением плотности тока и селективности мембран. Это положение совпадает с наблюдениями Писториуса и Бурштейна о зависимости концентрации электролита внутри питтинга от плотности тока^{9, 11}. Можно

предположить, что высокая концентрация раствора в бугорке связана с концентрацией фиксированных зарядов в плотном слое. Фиксированные ионы внедрены в пустоты кристаллической решетки плотного слоя, что происходит в процессе его формирования. Из теории электродиализа известно, что концентрация фиксированных ионов в структуре мембран ограничивает максимальную концентрацию рассолов на электродиализных аппаратах, а также предотвращает обратную диффузию солей из камер концентрирования в камеры обессоливания. По аналогии с электродиализом высокая концентрация фиксированных катионов в плотном слое бугорков препятствует диффузии ионов железа в протекающую вне бугорка воду, а концентрация электролита в структуре бугорка может достигать высоких значений.

Очевидно, можно утверждать, что проницаемость плотного слоя формируется на стадии его образования в процессе переноса гидратированных анионов, движущихся к растворимому аноду. При этом внутри бугорка растет давление, вызванное электроосмотическим переносом воды, которое оказывает расклинивающее давление на стенки плотного слоя, способствуя его росту, а в некоторых случаях, и его разрушению.

Селективность плотного слоя по отношению к анионам можно подтвердить, исходя из анализа качества воды с десорбированными солями и воды в системе водоснабжения в период эксплуатации трубопровода. Так, например, для Москвы показатели качества воды имеют следующие значения¹⁷: сухой остаток 234–300 мг/л, жесткость 2,7–4,7 мг-экв/л, pH 7,1–8,6, хлориды 11–22 мг/л, сульфаты 9–33 мг/л, щелочность 1,5–4,4 мг-экв/л, железо 0,05–0,2, нитраты 0,5–3 мг/л. Содержание хлоридов в водопроводной воде составляет не более 10 % от анионного состава, в то время как в составе десорбированных анионов содержание хлоридов превышает 99 %. Возможным доказательством наличия у плотного слоя селективных свойств является ингибирующее действие отдельных анионов на потенциал питтингообразования, отмечаемое в работе М. Ergun и соавт.¹⁸, а также снижение скорости коррозии при использовании различных ингибиторов [26].

К третьей фазе относятся процессы, протекающие на стадии, предшествующей образованию свища. Эту стадию можно представить как совокупность воздействия на поверхность металла множества питтингов, формирующихся на ограниченной поверхности металла непосредственно под плотным слоем бугорка. Коррозия внутри бугорка становится более интенсивной, так как с металлом контактирует не исходная водопроводная вода, а концентрированный рас-

¹³ Tsunoda Y. Electrodialysis for producing brine concentrates seawater // First International Symposium on Water Desalination. Washington, SWD/31, 1965.

¹⁴ Garza G., Kedem O. Electroosmotic pumping in unit cells // 5th international symposium on fresh water from the sea. 1976. Vol. 3. Pp. 79–87.

¹⁵ Smagin V.N., Chukhin V.A., Kharchuck V.A. Technological account of electrodialysis apparatus for concentration // Desalination. 1983. Vol. 46. No. 1–3. Pp. 283–290.

¹⁶ Чухин В.А. Разработка и исследование метода предельного концентрирования растворов солей на электродиализных аппаратах : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1979.

¹⁷ Мосводоканал. URL: <https://www.mosvodokanal.ru/>

¹⁸ Ergun M., Turan A.Y. Pitting potential and protection potential of carbon steel for chloride ion and the effectiveness of different inhibiting anions // Corrosion Science. 1991. Vol. 32. No. 10. Pp. 1137–1142. DOI: 10.1016/0010-938X(91)90098-A

твор хлорида железа FeCl_2 . Коррозия поддерживается в основном за счет воды, которая находится в объеме бугорка. При этом следует отметить роль гидролиза хлорида железа с образованием из воды ионов H^+ , приводящих к понижению pH, и OH^- , которые снижают рост концентрации железа, образуя кристаллические формы $\text{Fe}(\text{OH})_n$. Условием появления свища является достаточное количество воды в структуре ядра бугорка, необходимой на окисление ионов железа с учетом толщины оставшегося металла. При недостатке воды отдельные питтинги и в целом бугорки становятся пассивными. Поэтому трубы, имеющие толстую стенку, более устойчивы к коррозии.

В начале статьи были показаны фотографии труб с различными по структуре бугорками. Так как процесс коррозии при сформированном бугорке протекает на площади, ограниченной контуром бугорка, то внутри бугорка с различным анионным составом происходит накопление солей железа. При этом наступают благоприятные условия для выпадения в осадок оксидов железа, имеющих низкую растворимость.

На рис. 4 представлены фотографии, которые могут служить пояснением к последней стадии развития питтинговой коррозии. Металл под бугорком разрушается с образованием кристаллических структур в виде конусов, копируя форму питтинга.

Из рис. 4 видно, что конические элементы образуются в большом количестве. Хаотичное расположение отдельных кристаллических структур свидетельствует об их взаимном перемещении внутри ядра бугорка при продолжающейся коррозии. В случае, если объем воды в структуре бугорка является достаточным, то питтинг может превратиться в свищ. В противном случае процесс коррозии может прекратиться полностью или остановиться на некоторый промежуток времени в соответствии с внешними условиями. Следует отметить, что размеры конических элементов, приведенных на рис. 4, могут быть использованы для расчетов концентрации электролита по формулам (1) и (2). Кристаллические структуры заполняют внутренний объем бугорка в течение всего срока эксплуатации трубопровода, поэтому нали-

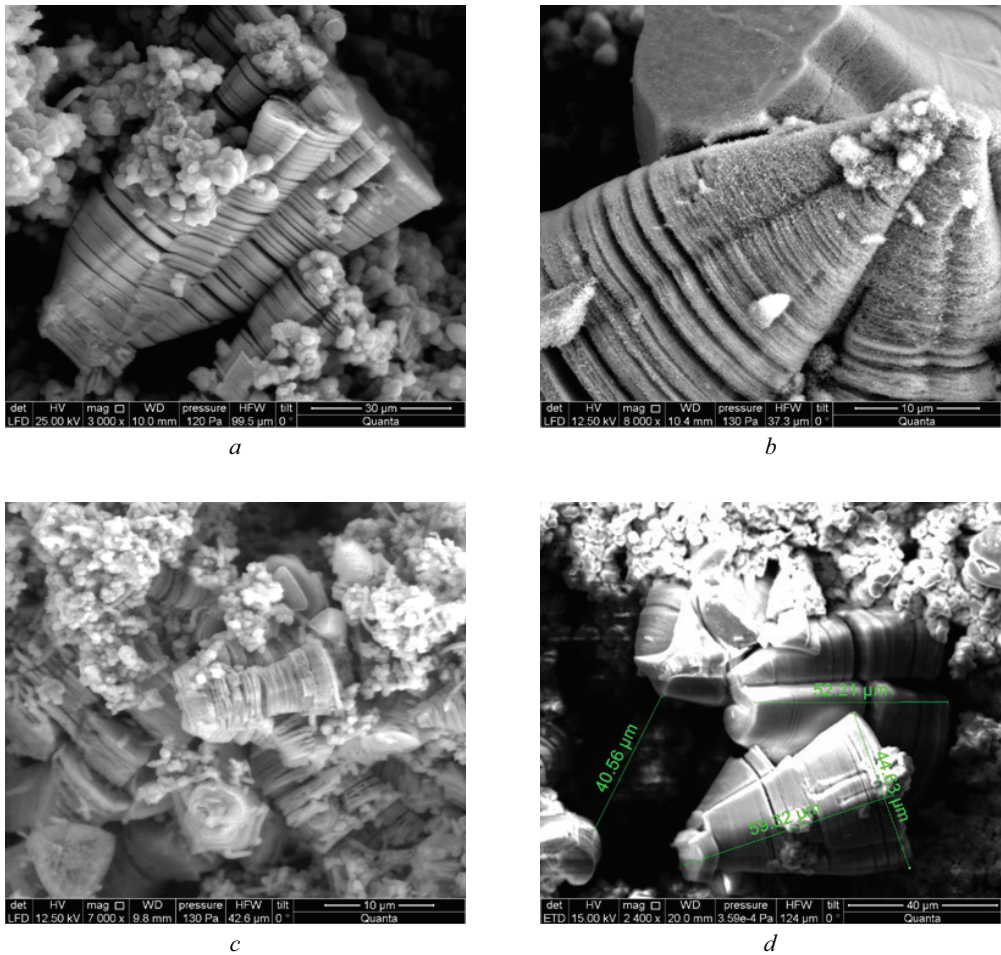


Рис. 4. Структура осадка, формирующаяся в стальных трубах при образовании свищей, размер линейки под фотографией: *a* — 30 мкм; *b*, *c* — 10 мкм; *d* — 40 мкм

Fig. 4. Structure of sludge formed in steel pipes during fistula formation, ruler size under the photo: *a* — 30 µm; *b*, *c* — 10 µm; *d* — 40 µm

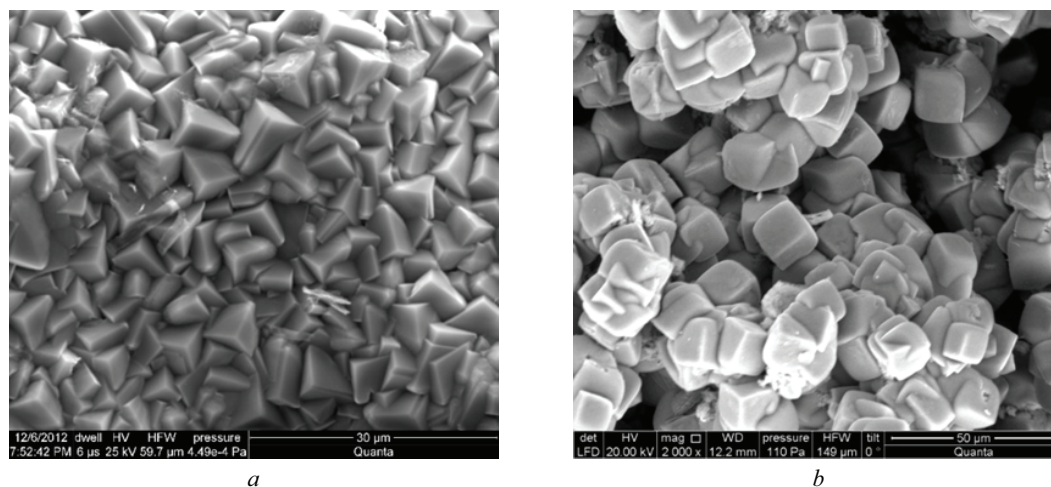


Рис. 5. Микрофотографии осадка в трубах холодного (а) и горячего (б) водоснабжения

Fig. 5. Microphotographs of sludge inside the pipe of cold water (a) and hot water (b) supply systems

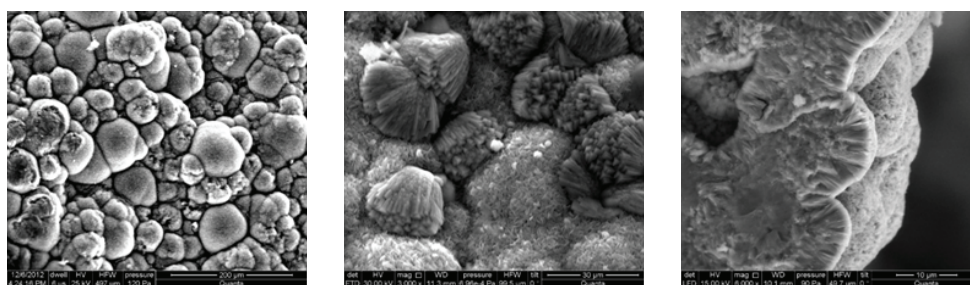


Рис. 6. Микрофотографии осадка, формирующегося при высыхании слоя (подошва) на границе с металлической основой трубы

Fig. 6. Microphotographs of sludge formed during drying of the layer (sole) at the boundary with the metal base of the pipe

чие плотных бугорков характерно для труб, бывших в эксплуатации длительное время.

Дополнительную информацию о процессе формирования осадка в трубах может дать анализ фотографий, полученных после извлечения бугорков из труб, бывших в эксплуатации. На рис. 5 представлены микрофотографии осадка, изъятых из стальной трубы без покрытия системы холодного водоснабжения Ду 900 мм (г. Москва) (рис. 5, а) и стальной оцинкованной трубы Ду 100 из системы горячего водоснабжения (рис. 5, б).

Основной химический состав представлен карбонатом железа (сидерит FeCO_3). Учитывая, что внутри бугорка среда сильно кислая, невозможно представить образование кристаллов сидерита. Но при медленном высыхании раствора и насыщении его атмосферным углекислым газом сидерит имеет возможность образоваться в насыщенном растворе хлорида железа.

На рис. 6 показаны фотографии, которые относятся к самому нижнему слою осадка, или по нашей классификации — подошвы [27]. Подошва бугорка образуется при кристаллизации солей железа после извлечения трубы и удаления из нее воды.

Полусферические кристаллы осадка, копирующие поверхность металла, образуются при значительном перенасыщении раствора и при отсутствии пространственных ограничений, что подтверждает наличие высокой концентрации солей железа во внутреннем объеме бугорков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Развитие коррозии в стальных трубах систем водоснабжения с образованием свищей, как правило, протекает в несколько стадий. На первой стадии развивается язвенная коррозия, сопровождаемая ростом бугорков, перекрытых плотным слоем продуктов коррозии (магнетитом), на последующих стадиях коррозия развивается по питтинговому механизму внутри бугорков. Появлению свищей предшествует рост концентрации электролита внутри бугорков, что связано с особенностями структуры плотного слоя, который в процессе своего образования приобретает свойства селективной мембраны.

Повышение концентрации электролита на поверхности металла под бугорком интенсифицирует процесс питтинговой коррозии, переводя метастабильные питтинги в стабильные. На последнем этапе рост бугорка прекращается, процесс становится авто-

каталитическим. Условием появления свища является наличие достаточного количества воды в структуре ядра бугорка, необходимого на окисление ионов железа с учетом толщины оставшегося металла. При недостатке воды отдельные питтинги и в целом бугорки становятся пассивными. Поэтому трубы, имеющие более толстую стенку, более устойчивы к коррозии. На взгляд авторов, плотный слой в бугорках стальных труб и перфорированное покрытие в структуре питтингов на нержавеющей сталях обла-

дают идентичными свойствами, обеспечивая создание критических условий для интенсивной коррозии.

Результаты исследования предлагают новое направление для оценки влияния плотного слоя на коррозию стальных и чугунных труб и появление свищей и могут быть использованы для лучшего понимания механизма коррозии. При этом необходимо изучать не только структуру, но и свойства плотного слоя, что позволит определить направления воздействия на протекающие процессы коррозии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Delaunois F., Tosar F., Vitry V. Corrosion behaviour and biocorrosion of galvanized steel water distribution systems // *Bioelectrochemistry*. 2014. Vol. 97. Pp. 110–119. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2014.01.003
2. Zhong H., Tang Y., Yan H., Zhang Y., Dong L., Wang B. Corrosion of pipelines in urban water systems: Current research status and future trends based on bibliometric analysis // *Journal of Water Process Engineering*. 2023. Vol. 56. P. 104288 DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104288
3. Abdalsamed I., Amar I.A., Sharif A., Ghanem M.A., Farouj A.A., Kawan J.A. Scale corrosion of metallic materials in water systems : a review // *Journal of Chemical Reviews*. 2022. Vol. 4. Issue 1. Pp. 67–80. DOI: 10.22034/JCR.2022.326770.1141
4. Chukhin V.A., Andrianov A.P. Formation mechanism of iron tubercles during corrosion of water supply pipes // *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2022. Vol. 11. Issue 2. DOI: 10.17675/2305-6894-2022-11-2-24
5. Saadawy M. Kinetics of Pitting Dissolution of Austenitic Stainless Steel 304 in Sodium Chloride Solution // *ISRN Corrosion*. 2012. Vol. 2012. Pp. 1–5. DOI: 10.5402/2012/916367
6. Guo H., Chen H., Zhang H., Liu X., Chen Y., Tian Y. *et al.* Study on Growth of Corrosion Scale on Various Iron Based Materials (Grey cast iron/Carbon steel/Ductile Iron) in Water Distribution Systems // *International Journal of Electrochemical Science*. 2020. Vol. 15. Issue 9. Pp. 8479–8497. DOI: 10.20964/2020.09.80
7. Biryukov A.I., Kozaderov O.A., Galin R.G., Zakharyevich D.A., Zhivulin V.E. Details of the mechanism of dissolution of iron–zinc coatings based on the δ -phase in acidic media // *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2020. DOI: 10.17675/2305-6894-2020-9-4-18
8. Martins C.M. B., Moreira J.L., Martins J.I. Corrosion in water supply pipe stainless steel 304 and a supply line of helium in stainless steel 316 // *Engineering Failure Analysis*. 2014. Vol. 39. Pp. 65–71. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.01.017
9. Li K., Sun L., Cao W., Chen S., Chen Z., Wang Y. *et al.* Pitting corrosion of 304 stainless steel in secondary water supply system // *Corrosion Communications*. 2022. Vol. 7. Pp. 43–50. DOI: 10.1016/j.corcom.2021.11.010
10. Zhao L., Liu D., Zhang H., Wang J., Zhang X., Liu S. *et al.* Study on electrochemical reduction mechanisms of iron oxides in pipe scale in drinking water distribution system // *Water Research*. 2023. Vol. 231. P. 119597. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119597
11. Durrani F., Wesley R., Srikantharajah V., Eftekhari M., Munn S. Predicting Corrosion rate in Chilled HVAC Pipe Network: Coupon vs Linear Polarisation Resistance method // *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 109. P. 104261. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104261
12. Zhao L., Liu D., Zhang H., Wang J., Zhang X., Liu S. *et al.* Study on electrochemical reduction mechanisms of iron oxides in pipe scale in drinking water distribution system // *Water Research*. 2023. Vol. 231. P. 119597. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119597
13. Swietlik J., Raczek-Stanislawiak U., Piszora P., Nawrocki J. Corrosion in drinking water pipes: The importance of green rusts // *Water Research*. 2012. Vol. 46. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.watres.2011.10.006
14. Smith F., Brownlie F., Hodgkiss T., Toupis A., Pearson A., Galloway A.M. Effect of salinity on the corrosive wear behaviour of engineering steels in aqueous solutions // *Wear*. 2020. Vol. 462–463. P. 203515. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203515
15. Hasan B. Effect of salt content on the corrosion rate of steel pipe in turbulently flowing solutions // *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*. 2010. Vol. 13. Issue 1. Pp. 66–73.
16. Hu J., Dong H., Xu Q., Ling W., Qu J., Qiang Z. Impacts of water quality on the corrosion of cast iron pipes for water distribution and proposed source water switch strategy // *Water Research*. 2018. Vol. 129. Pp. 428–435. DOI: 10.1016/j.watres.2017.10.065
17. Soltis J., Krouse D., Laycock N. Localised dissolution of iron in buffered and non-buffered chloride containing solutions // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. Issue 6. Pp. 2152–2160. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.02.037
18. Lytle D.A., Tang M., Francis A.T., O'Donnell A.J., Newton J.L. The effect of chloride, sulfate and dissolved inorganic carbon on iron release from cast iron // *Water Re-*

search. 2020. Vol. 183. P. 116037. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116037

19. Chen X., Liu H., Sun X., Zan B., Liang M. Chloride corrosion behavior on heating pipeline made by AISI 304 and 316 in reclaimed water // RSC Advances. 2021. Vol. 11. Issue 61. Pp. 38765–38773. DOI: 10.1039/D1RA-06695A

20. Biryukov A.I., Zakharyevich D.A., Galin R.G., Batmanova T.V., Zhivulin V.E., Ulyanov M.N. et al. Corrosion of diffusion zinc coatings in neutral chloride solutions // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2024. Vol. 13. Issue 1. DOI: 10.17675/2305-6894-2024-13-1-17

21. Soltis J. Passivity breakdown, pit initiation and propagation of pits in metallic materials : review // Corrosion Science. 2015. Vol. 90. Pp. 5–22. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.10.006

22. Li K., Sun L., Cao W., Chen S., Chen Z., Wang Y. et al. Pitting corrosion of 304 stainless steel in secondary water supply system // Corrosion Communications. 2022. Vol. 7. Pp. 43–50 DOI: 10.1016/j.corcom.2021.11.010

23. Heurtault S., Robin R., Rouillard F., Vivier V. On the propagation of open and covered pit in 316L stainless

steel // Electrochimica Acta. 2016. Vol. 203. Pp. 316–325. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.01.084

24. Lin H., Hu Y. Impact of different source-water switching patterns on the stability of drinking water in an estuarine urban water distribution system // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. Issue 32. Pp. 49059–49069. DOI: 10.1007/s11356-022-19117-x

25. Чухин В.А., Андрианов А.П. Волновая природа бугорковой коррозии в стальных и чугунных трубах систем водоснабжения // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 3 (114). С. 385–399. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3.385-399

26. Azamian I., Allahkaram S.R., Rezaee S. Autonomous-healing and smart anti-corrosion mechanism of polyurethane embedded with a novel synthesized microcapsule containing sodium dodecyl sulfate as a corrosion inhibitor // RSC Advances. 2022. Vol. 12. Issue 22. Pp. 14299–14314. DOI: 10.1039/d2ra01131j

27. Андрианов А.П., Чухин В.А. Анализ морфологии, состава и условий формирования коррозионных отложений в водопроводных трубах // Вода и экология: проблемы и решения. 2016. № 3 (67). С. 18–34. EDN WMFKNH.

Поступила в редакцию 21 октября 2024 г.

Принята в доработанном виде 21 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 30 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Валентин Александрович Чухин — кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник научно-образовательного центра «Водоснабжение и водоотведение»; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 717961, Scopus: 57194340218, ORCID: 0000-0003-4616-2489; sigma85@yandex.ru;

Николай Алексеевич Макиша — кандидат технических наук, доцент, директор научно-образовательного центра «Водоснабжение и водоотведение»; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 644678, Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Delaunois F., Tosar F., Vitry V. Corrosion behaviour and biocorrosion of galvanized steel water distribution systems. *Bioelectrochemistry*. 2014; 97:110-119. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2014.01.003

2. Zhong H., Tang Y., Yan H., Zhang Y., Dong L., Wang B. Corrosion of pipelines in urban water systems: Current research status and future trends based on bibliometric analysis. *Journal of Water Process Engineering*. 2023; 56:104288 DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104288

3. Abdalsamed I., Amar I.A., Sharif A., Ghanem M.A., Farouj A.A., Kawan J.A. Scale Corrosion of Metallic Materials in Water Systems : a review. *Journal of Chemical Reviews*. 2022; 4(1):67-80. DOI: 10.22034/JCR.2022.326770.1141

4. Chukhin V.A., Andrianov A.P. Formation mechanism of iron tubercles during corrosion of water supply pipes. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2022; 11(2). DOI: 10.17675/2305-6894-2022-11-2-24

5. Saadawy M. Kinetics of Pitting Dissolution of Austenitic Stainless Steel 304 in Sodium Chloride Solution. *ISRN Corrosion*. 2012; 2012:1-5. DOI: 10.5402/2012/916367

6. Guo H., Chen H., Zhang H., Liu X., Chen Y., Tian Y. et al. Study on growth of corrosion scale on various iron based materials (grey cast iron/carbon steel/ductile iron) in water distribution systems. *International Journal of Electrochemical Science*. 2020; 15(9):8479-8497. DOI: 10.20964/2020.09.80

7. Biryukov A.I., Kozaderov O.A., Galin R.G., Zakharyevich D.A., Zhivulin V.E. Details of the mechanism of dissolution of iron–zinc coatings based on the δ -phase in acidic media. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2020. DOI: 10.17675/2305-6894-2020-9-4-18

8. Martins C.M. B., Moreira J.L., Martins J.I. Corrosion in water supply pipe stainless steel 304 and a supply line of helium in stainless steel 316. *Engineering Failure Analysis*. 2014; 39:65-71. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.01.017

9. Li K., Sun L., Cao W., Chen S., Chen Z., Wang Y. et al. Pitting corrosion of 304 stainless steel in secondary water supply system. *Corrosion Communications*. 2022; 7:43-50. DOI: 10.1016/j.corcom.2021.11.010

10. Zhao L., Liu D., Zhang H., Wang J., Zhang X., Liu S. et al. Study on electrochemical reduction mechanisms of iron oxides in pipe scale in drinking water distribution system. *Water Research*. 2023; 231:119597. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119597

11. Durrani F., Wesley R., Srikandarajah V., Eftekhari M., Munn S. Predicting corrosion rate in chilled HVAC pipe network: coupon vs linear polarisation resistance method. *Engineering Failure Analysis*. 2020; 109:104261. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104261

12. Zhao L., Liu D., Zhang H., Wang J., Zhang X., Liu S. et al. Study on electrochemical reduction mechanisms of iron oxides in pipe scale in drinking water distribution system. *Water Research*. 2023; 231:119597. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119597

13. Swietlik J., Raczky-Stanislawiak U., Piszora P., Nawrocki J. Corrosion in drinking water pipes: The importance of green rusts. *Water Research*. 2012; 46:1-10. DOI: 10.1016/j.watres.2011.10.006

14. Smith F., Brownlie F., Hodgkiess T., Tounpiss A., Pearson A., Galloway A.M. Effect of salinity on the corrosive wear behaviour of engineering steels in aqueous solutions. *Wear*. 2020; 462-463:203515. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203515

15. Hasan B. Effect of salt content on the corrosion rate of steel pipe in turbulently flowing solutions. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*. 2010; 13(1):66-73

16. Hu J., Dong H., Xu Q., Ling W., Qu J., Qiang Z. Impacts of water quality on the corrosion of cast iron pipes for water distribution and proposed source water switch strategy. *Water Research*. 2018; 129:428-435. DOI: 10.1016/j.watres.2017.10.065

17. Soltis J., Krouse D., Laycock N. Localised dissolution of iron in buffered and non-buffered chlo-

ride containing solutions. *Corrosion Science*. 2011; 53(6):2152-2160. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.02.037

18. Lytle D.A., Tang M., Francis A.T., O'Donnell A.J., Newton J.L. The effect of chloride, sulfate and dissolved inorganic carbon on iron release from cast iron. *Water Research*. 2020; 183:116037. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116037

19. Chen X., Liu H., Sun X., Zan B., Liang M. Chloride corrosion behavior on heating pipeline made by AISI 304 and 316 in reclaimed water. *RSC Advances*. 2021; 11(61):38765-38773. DOI: 10.1039/D1RA06695A

20. Biryukov A.I., Zakharyevich D.A., Galin R.G., Batmanova T.V., Zhivulin V.E., Ulyanov M.N. et al. Corrosion of diffusion zinc coatings in neutral chloride solutions. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2024; 13(1). DOI: 10.17675/2305-6894-2024-13-1-17

21. Soltis J. Passivity breakdown, pit initiation and propagation of pits in metallic materials : review. *Corrosion Science*. 2015; 90:5-22. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.10.006

22. Li K., Sun L., Cao W., Chen S., Chen Z., Wang Y. et al. Pitting corrosion of 304 stainless steel in secondary water supply system. *Corrosion Communications*. 2022; 7:43-50 DOI: 10.1016/j.corcom.2021.11.010

23. Heurtault S., Robin R., Rouillard F., Vivier V. On the propagation of open and covered pit in 316l stainless steel. *Electrochimica Acta*. 2016; 203:316-325. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.01.084

24. Lin H., Hu Y. Impact of different source-water switching patterns on the stability of drinking water in an estuarine urban water distribution system. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022; 29(32):49059-49069. DOI: 10.1007/s11356-022-19117-x

25. Chukhin V.A., Andrianov A.P. The wave nature of tubercle corrosion in steel and cast iron pipes of water supply systems. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(3):(114):385-399. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3.385-399 (rus.).

26. Azamian I., Allahkaram S.R., Rezaee S. Autonomous-healing and smart anti-corrosion mechanism of polyurethane embedded with a novel synthesized microcapsule containing sodium dodecyl sulfate as a corrosion inhibitor. *RSC Advances*. 2022; 12(22):14299-14314. DOI: 10.1039/d2ra01131j

27. Andrianov A.P., Chukhin V.A. Analysis of the morphology, composition and conditions for the formation of corrosion deposits in water pipes. *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2016; 3(67):18-34. EDN WMFKNH. (rus.).

Received October 21, 2024.

Adopted in revised form on October 21, 2024.

Approved for publication on October 30, 2024.

B I O N O T E S : **Valentin A. Chukhin** — Candidate of Technical Science, Associate Professor, research fellow of Research and Education Centre “Water supply and sewage”; **Moscow State University of Civil Engineering**

(National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 717961, Scopus: 57194340218, ORCID: 0000-0003-4616-2489; sigma85@yandex.ru;

Nikolay A. Makisha — Candidate of Technical Science, Associate Professor, director of Research and Education Centre “Water supply and sewage”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 644678, Scopus: 55841479500, ResearcherID: I-1562-2015, ORCID: 0000-0003-2567-4450; makishana@mgsu.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the publication.

Author declare no conflict of interest.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.49

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1990-2000

Исследование структурных изменений территориального развития республики Татарстан

Сергей Геннадьевич Стерник^{1,2,3}, Ильнур Фаилович Гареев⁴,
Арслан Марселевич Насрутдинов⁴

¹ Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук (ИНП РАН);
г. Москва, Россия;

² Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; г. Москва, Россия;

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

⁴ Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Концентрация населения и экономической активности в агломерациях обусловлена, прежде всего, комфортными условиями проживания и развитой инфраструктурой. Следует отметить, что в последние годы вопросы жилищного строительства вышли за рамки обсуждения проблем строительной отрасли и стали объектом исследования пространственного развития территорий. Жилищный фонд и объекты инфраструктуры на периферии не соответствуют демографическим и миграционным процессам. Таким образом, возникает необходимость в разработке аналитических инструментов, способных планировать сбалансированную инфраструктуру региона.

Материалы и методы. Для исследования поставленных задач использовано два метода исследования: 1) изучение динамики ключевых индикаторов развития региона; 2) расчет значения индексов, отражающих концентрацию исследуемого показателя (индекс Херфиндала – Хиршмана для объемов жилищного строительства, концентрации населения и количества рабочих мест; коэффициент концентрации показателей экономической активности).

Результаты исследования. Анализ основных факторов показал, что многолетний рост доли населения старше трудоспособного возраста происходит параллельно с ростом численности населения моложе трудоспособного возраста. Данный дисбаланс, безусловно, является достижением первоочередных задач государства в области улучшения качества жизни населения посредством внедрения мер социальной поддержки граждан пожилого возраста и молодых семей. В связи с тем, что рабочие места в агломерациях отличаются технологичностью, а производительность труда в них выше, проживание здесь рассматривается не только как возможность трудовой деятельности, но и как комфортное место для проживания.

Обсуждение и заключение. Исследование районов Республики Татарстан позволило показать сложную ситуацию с пространственным развитием региона: концентрация в агломерациях и деструкции на периферии. В связи с этим исследование агломерационных процессов должно стать одним из элементов национальной региональной политики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: жилищное строительство, рабочие места, концентрация населения, агломерация, пространственное развитие, жилищная проблема, обеспеченность жильем, сельские территории

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Стерник С.Г., Гареев И.Ф., Насрутдинов А.М. Исследование структурных изменений территориального развития республики Татарстан // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1990–2000. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1990-2000

Автор, ответственный за переписку: Сергей Геннадьевич Стерник, sergey-stermik@yandex.ru.

Study of structural changes in the territorial development of the republic of Tatarstan

Sergey G. Sternik^{1,2,3}, Ilnur F. Gareev⁴, Arslan M. Nasrutdinov⁴

¹ Institute of Economic Forecasting of Russian Academy of Sciences (IEF RAS); Moscow, Russian Federation;

² Financial University under the Government of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation;

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

⁴ Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The concentration of population and economic activity in agglomerations is primarily due to comfortable living conditions and developed infrastructure. At the same time, the issues of housing development in recent years have gone beyond the discussion of the problems of development of the construction industry and have become the subject of spatial development research. Housing stock and infrastructure facilities in the periphery do not correspond to demographic and migration processes. Thus, there is a need to develop analytical tools capable of planning a balanced infrastructure of the region.

Materials and methods. Two research methods were used to investigate the set tasks: 1) studying the dynamics of key indicators of the region's development; 2) calculation of the value of indices reflecting the concentration of the studied indicator (Herfindahl – Hirschman index — for the volume of housing construction, population concentration and the number of jobs; concentration coefficient of economic activity indicators).

Results. The analysis of the main factors has shown that the long-term growth of the share of the population older than working age occurs in parallel with the growth of the population younger than working age. This imbalance is certainly the achievement of the state's priorities in the field of improving the quality of life of the population through the introduction of social support measures for elderly citizens and young families. In agglomerations, jobs are technological and productivity is higher. Residence in the metropolitan area is considered not only as a place of work but also as a comfortable place to live.

Discussion and Conclusion. The study of the regions of the Republic of Tatarstan allowed to show a complex situation with spatial development of the region — concentration in agglomerations and destruction on the periphery. In this regard, the study of agglomeration processes should become one of the elements of the national regional policy.

KEYWORDS: housing construction, jobs, spatial development, housing problem, housing supply, agglomeration, population concentration, rural areas

FOR CITATION: Sternik S.G., Gareev I.F., Nasrutdinov A.M. Study of structural changes in the territorial development of the republic of Tatarstan. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1990-2000. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1990-2000 (rus.).

Corresponding author: Sergey G. Sternik, sergey-sternik@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие территорий в Республике Татарстан (РТ) осуществляется в соответствии с разработанной региональным правительством Стратегией развития Республики до 2030 года, в которой обозначены направления и цели развития взаимодействия муниципальных образований и кластерных связей¹.

Современные города-миллионники оказывают огромное влияние на расположенные вокруг них территории [1]. Объединяясь в одну систему взаимодействия, по-другому — агломерацию, они являются сложными объектами управления, которое само по себе состоит из множества уровней и требует раздельного подхода как к центральным городам, так и к прилегающим территориям [2].

На примере Казанской агломерации можно наблюдать активный рост жилищного строительства, что повысило миграционный прирост в ближайших муниципальных областях вокруг Казани [3]. Данный фактор имеет ряд вытекающих проблем, требующих решения. Построенное жилье отражает уровень инфраструктуры и комфорта проживания населения, но за последние несколько лет показатели не соответствуют демографическому поведению жителей региона [4]. Это приводит к сокращению площадей жилья и увеличению плотности застройки [5]. На этом фоне возникают проблемы перегруженности транспортных уличных сетей, сокращения показателей миграции населения из малых муниципальных образований (сельских поселений, малых городов) в центральное ядро агломерации, снижения очередей

в общественных организациях, спального заселения периферийных территорий [6]. Данная проблема актуальна как для отдельных регионов России [7], так и для некоторых государств [8].

В связи с уплотнением застройки прилегающих к Казани территорий возникает необходимость в разработке и совершенствовании аналитических инструментов, способных учитывать инфраструктуру района и предпочтения граждан [9, 10]. Уплотнение обусловлено быстрым ростом населения и программами льготного ипотечного кредитования, которое зависит от уровня заработной платы населения, а соответственно — от способности района обеспечивать трудовую занятость [11, 12].

Обобщив информацию по промышленным кластерам Республики Татарстан, можно сделать вывод, что в экономическом развитии Казанской агломерации упор сделан на строительную сферу производства, Альметьевская агломерация сосредоточена на нефтедобыче и сельском хозяйстве, Камская агломерация — на машиностроительном производстве. Это достаточно конкурентоспособные направления экономических отраслей на мировом уровне [13].

Так как потенциал для обеспечения рабочих мест довольно высок, то в соответствии с профильными направлениями промышленности провинциальных агломераций следует повышать градообразующие факторы для близлежащих районов, учредить места подготовки квалифицированных кадров в городе-ядре агломерации с целью снижения миграции трудоспособного населения, повышения и сохранения человеческого капитала в целом [14, 15].

Чтобы сделать выводы, почему при достаточно равной по значимости профильной промышленно-

¹ URL: [https://sptl.tatarstan.ru/file/File/Strategy_RT-2\(1\).pdf](https://sptl.tatarstan.ru/file/File/Strategy_RT-2(1).pdf)

сти в агломерациях возникает такой разрыв по населению между агломерациями, следует сосредоточить внимание на Казанской агломерации, где можно наблюдать тот факт, что сельские поселения все больше поглощаются производственными площадками и трансформируются в периферийные рабочие поселения. Способствует этому и активное развитие дорожной сети [16, 17]. В мировой практике развитие транспортной инфраструктуры зачастую является первостепенной мерой по развитию периферийных территорий [18], а не инструментом повышения транспортной доступности уплотненной застройки.

В зависимости от направления исторически сложившихся специфик производства на территориях они дополняются и расширяются путем присоединения транспортных связей, формированием распределительных центров, повышением технологического уровня производства [19].

Вокруг данных поселений ввиду расширения производства возникает потребность в инфраструктуре и повышении количества жилья [20]. В последние годы наблюдается динамичное развитие строительства жилья благодаря развитию ипотечного кредитования. Застройщики активно обустраивают жильем близлежащие территории к Казани, иногда не учитывая факторы пропускаемого трафика на дорогах, что имеет свои последствия [21].

В связи с вышеизложенным возникает необходимость в разработке аналитических инструментов, способных планировать сбалансированную инфраструктуру региона.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Авторами в качестве объекта исследования была определена Республика Татарстан.

Для анализа сбалансированного развития территорий и его взаимосвязи с рынком жилищного строительства были применены два метода исследования.

1. Анализ динамики основных показателей развития жилищного строительства и благосостояния населения Республики Татарстан посредством группировки и сопоставления данных о динамике жилищного строительства, численности населения, его структуре и количестве рабочих мест.

2. Расчет значения индексов, отражающих концентрацию исследуемого показателя:

- индекс Херфиндаля – Хиршмана (ННІ) — для объемов жилищного строительства, концентрации населения и количества рабочих мест по районам (городам) Республики Татарстан.

Максимальное значение индекса Херфиндаля – Хиршмана составляет 10 000 и свидетельствует о монопольной концентрации в исследуемой области. На высокий уровень концентрации исследуемого показателя в регионе может указывать значение индекса выше 1800, на низкий — менее 1000.

Согласно экспертным оценкам, значение ННІ ниже 1000 свидетельствует о высоком уровне конку-

ренции, значение в диапазоне от 1000 до 1800 указывает на умеренный уровень концентрации, а значение выше 1800 говорит о значительной концентрации.

Индекс Херфиндаля – Хиршмана для оценки концентрации жилищного строительства ($ННІ_{\text{construction}}$) по районам (городам) Республики Татарстан рассчитывается как сумма квадратов процентных долей объемов жилищного строительства в конкретном районе (городе) Республики Татарстан по отношению к общему объему жилищного строительства в Республике Татарстан:

$$ННІ_{\text{construction}} = \sum_{i=1}^n C_i^2;$$

$$ННІ_{\text{construction}} = C_1^2 + C_2^2 + \dots + C_n^2,$$

где C_i — доля каждого города (района) в общем объеме жилищного строительства по Республике Татарстан.

Индекс Херфиндаля – Хиршмана для оценки концентрации населения ($ННІ_{\text{population}}$) по районам (городам) Республики Татарстан рассчитывается как сумма квадратов процентных долей населения в конкретном районе (городе) Республики Татарстан по отношению к общему количеству населения в Республике Татарстан:

$$ННІ_{\text{population}} = \sum_{i=1}^n P_i^2;$$

$$ННІ_{\text{population}} = P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_n^2,$$

где P_i — доля населения города (района) в общем количестве населения Республики Татарстан.

Индекс Херфиндаля – Хиршмана для оценки концентрации рабочих мест ($ННІ_{\text{employment}}$) по районам (городам) Республики Татарстан рассчитывается как сумма квадратов процентных долей рабочих мест в конкретном районе (городе) Республики Татарстан по отношению к общему количеству рабочих мест в Республике Татарстан:

$$ННІ_{\text{employment}} = \sum_{i=1}^n E_i^2;$$

$$ННІ_{\text{employment}} = E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2,$$

где E_i — доля рабочих мест города (района) в общем количестве рабочих мест по Республике Татарстан;

- коэффициент концентрации (concentration ratio) экономической активности в Казанской агломерации (CR_{6i}).

Этот коэффициент рассчитывается как сумма долей исследуемых экономических показателей для шести крупных субъектов экономической деятельности Казанской агломерации:

$$CR_{6i} = \sum_{j=1}^6 S_{ij},$$

где S_{ij} — доля i -го экономического показателя в j -м регионе Казанской агломерации.

В региональной экономике данный коэффициент характеризует вклад агломерации в общее развитие региона. Однако в данном исследовании целью является определение концентрации экономических показателей в пределах Казанской агломерации.

Анализируемые экономические показатели включают объем введенного жилья, численность населения и количество рабочих мест.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения динамики показателей населения и обеспеченности его жильем рассмотрены данные из Федеральной службы государственной статистики за последние годы и проанализированы с помощью индексов (табл.).

Для наглядности динамики показателей вышеуказанные значения отражены на графиках (рис. 1, 2).

Как видно из динамики индекса Херфиндаля – Хиршмана (рис. 1), при стабильном росте населения

Основные показатели муниципальных образований Республики Татарстан
Main indicators of municipal entities of the Republic of Tatarstan

Показатель Indicator	Год / Year										
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ННІ _{construction}	2056	1454	1443	1320	1283	1413	1421	1726	1383	1996	1221
ННІ _{population}	1279	1294	1309	1321	1336	1351	1363	1362	1368	1372	1378
ННІ _{employment}	–	1548	1567	1573	1592	–	–	–	–	–	–
CR-6i _{construction}	54,56	45,92	48,31	48,86	51,25	54,12	53,09	58,40	57,83	62,17	60,17
CR-6i _{population}	38,32	38,62	38,96	39,23	39,57	39,90	39,83	40,24	40,16	40,88	40,88
CR-6i _{employment}	–	41,09	41,35	41,61	41,95	–	–	–	–	–	–

Примечание. Составлено авторами на основе данных².
Note. Compiled by the authors based on data².

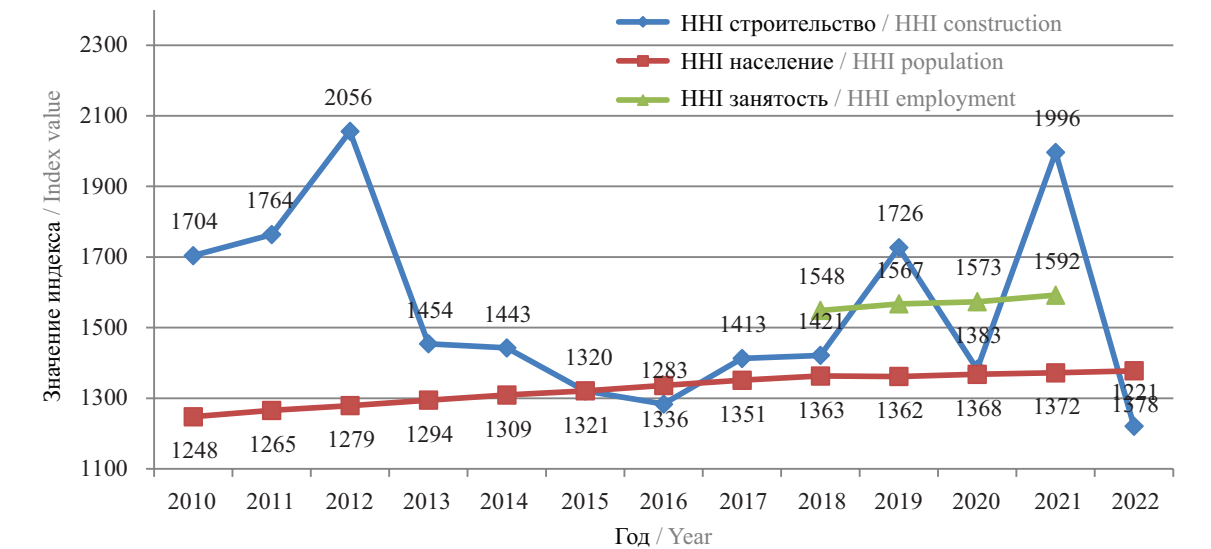


Рис. 1. Динамика индекса Херфиндаля – Хиршмана для исследуемых показателей. Источник: составлено авторами на основе данных²
Fig. 1. Dynamics of the Herfindahl-Hirschman index for the studied indicators. Source: compiled by the authors on the basis of data²

² URL: <https://rosstat.gov.ru/dbscripts/munst/munst92/DBInet.cgi#1>

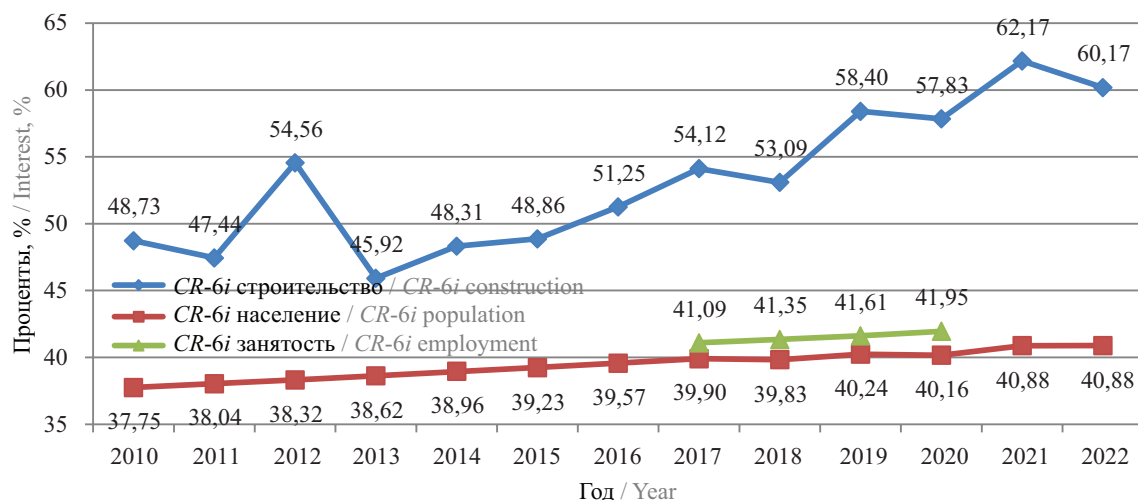


Рис. 2. Динамика индекса концентрации исследуемых показателей в Казанской агломерации. Источник: составлено авторами на основе данных²

Fig. 2. Dynamics of the concentration index of the studied indicators in Kazan agglomeration. Source: compiled by the authors on the basis of data²

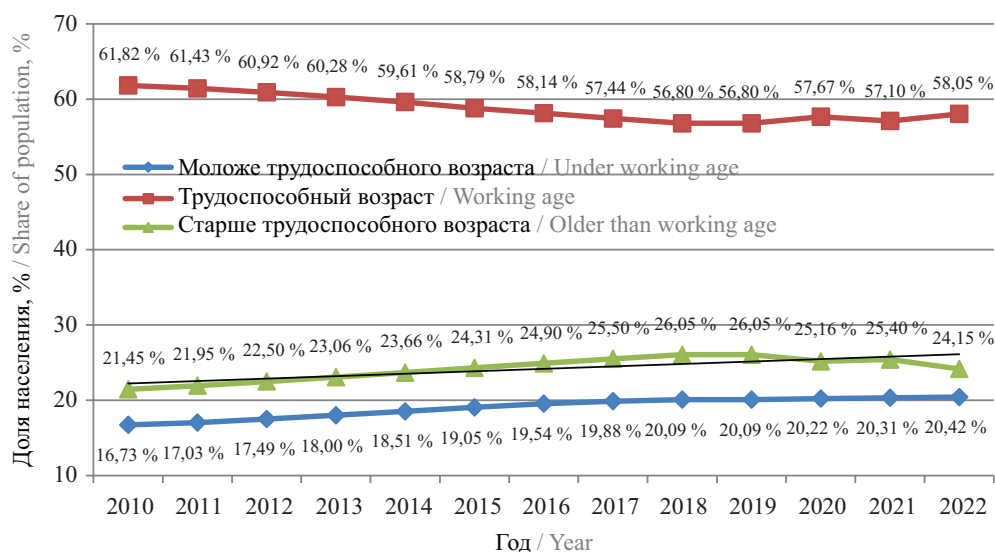


Рис. 3. Изменение возрастной структуры населения. Источник: составлено авторами на основе данных²

Fig. 3. Change in the age structure of the population. Source: compiled by the authors on the basis of data²

в Республике жилищный фонд имеет скачкообразные изменения объемов в последние 3 года. Обосновать это можно тем, что в 2020 г. имела место пандемия COVID-19, строительство было приостановлено по всему региону. Резкое падение объемов в 2022 г. имеет под собой политическое обоснование на международном уровне, в связи с чем цены на жилье резко выросли, спрос упал, но впоследствии он был урегулирован ипотечными предложениями. Понимание дальнейшей динамики развития требует анализа статистики за 2023 г., но в целом ожидается рост.

Обобщенно, индекс Херфиндаля – Хиршмана показывает примерно схожие по соотношению показатели, что говорит о сбалансированном развитии территорий по населению и обеспеченности жильем

в общем, но стоит рассмотреть отдельно коэффициент концентрации показателей по Казанской агломерации (рис. 2).

Для оценки возможности развития других агломераций было проанализировано население по трудоспособному возрасту на основе данных из Федеральной службы государственной статистики (рис. 3). Можно наблюдать, что тенденция роста трудоспособного населения положительная, так как за последние годы увеличивается не только количество трудоспособного населения, но и количество населения моложе трудоспособного возраста, которое в перспективе будет увеличивать показатели труда [22].

Районы Казанской агломерации по-прежнему являются точками роста прежде всего для объектов жи-



Рис. 4. Ввод жилья в расчете на душу населения в районах Казанской агломерации РТ, м². Источник: составлено авторами, на основе данных²

Fig. 4. Housing commissioning per capita in the districts of Kazan agglomeration of RT, sq. m. Source: compiled by the authors, based on the data²

лищного строительства. Показатели ввода жилья в расчете на душу населения в районах-спутниках значительно превышают общерегиональные уровни (рис. 4).
Можно также заметить, что более резкий рост трудоспособного населения происходит в окрестных районах: Лаишевский, Верхнеуслонский,

Пестречинский (рис. 5). Это обусловлено градостроительным развитием данных районов в силу того, что в Казани инфраструктура уже сформирована и цены на жилье в ней на очень высоком уровне. Кроме того, в указанных районах отмечается ввод в эксплуатацию инфраструктурных проектов —

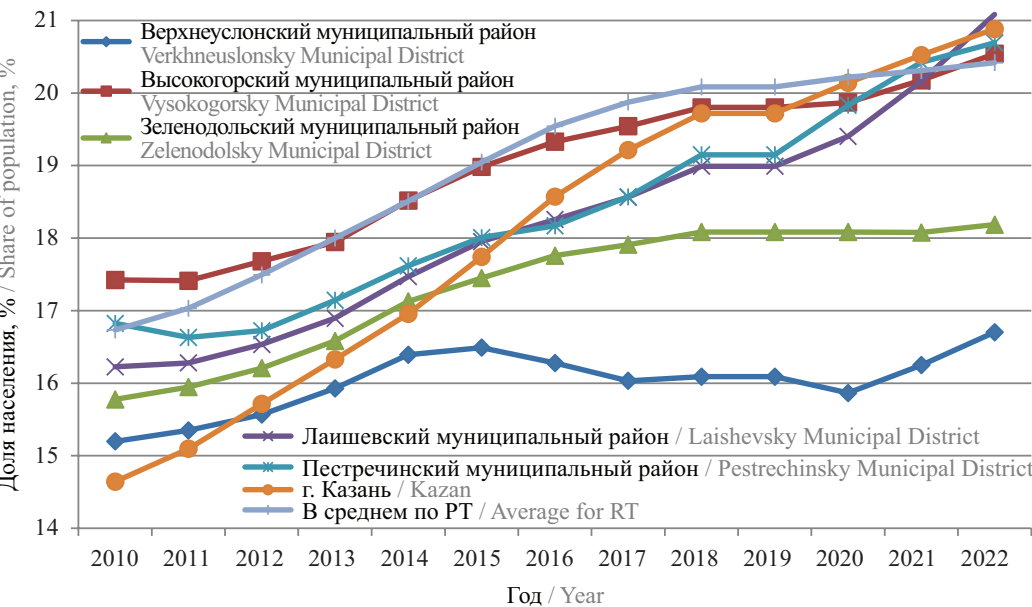


Рис. 5. Доля граждан моложе трудоспособного возраста в районах Казанской агломерации РТ. Источник: составлено авторами на основе данных²

Fig. 5. Share of citizens below working age in the districts of Kazan agglomeration of RT. Source: compiled by the authors on the basis of data. Source: compiled by the authors on the basis of data²

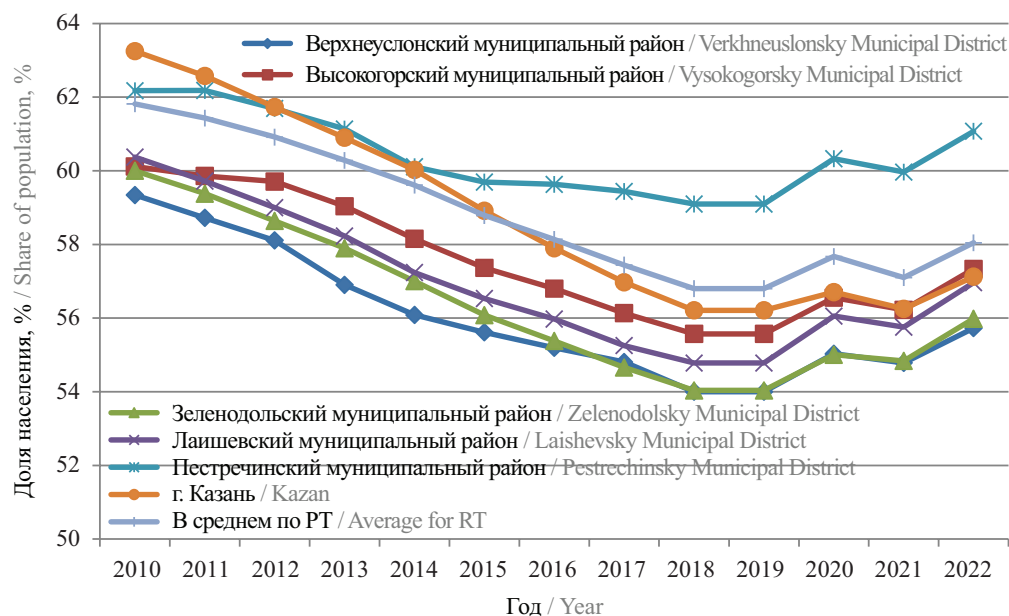


Рис. 6. Доля граждан трудоспособного возраста в районах Казанской агломерации РТ. Источник: составлено авторами на основе данных²

Fig. 6. Share of citizens of working age in the districts of Kazan agglomeration of RT. Source: compiled by the authors on the basis of data²

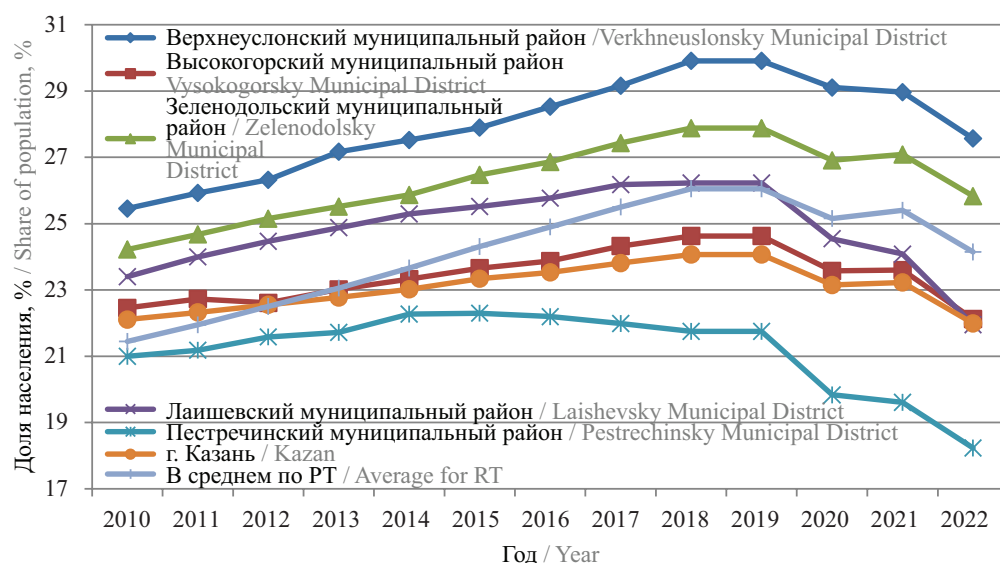


Рис. 7. Доля граждан старше трудоспособного возраста в районах Казанской агломерации РТ. Источник: составлено авторами на основе данных²

Fig. 7. Share of citizens above working age in the districts of Kazan agglomeration of RT. Source: compiled by the authors on the basis of data²

промпарков, объектов социальной инфраструктуры, что создает рабочие места и привлекает население (рис. 6).

Как показано на рис. 7, в последние 2–3 года наметилась тенденция к некоторому снижению доли населения старше трудоспособного возраста. Основными причинами этого являются рост рождаемости и миграция населения в агломерации [23], однако

последствия пандемии COVID-19 вполне ожидаемо показали негативное влияние на данный показатель.

В близлежащих же районах от Казани цены на жилье варьируются в пределах средних цен по Республике Татарстан. Данная ситуация также говорит о несбалансированности развития региона, так как молодое население мигрирует из провинциальных районов в поисках более широкой и современной инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для агрегирования и практического применения исследованных данных актуальна разработка геоинформационной системы пространственных данных территориального развития Республики Татарстан с перспективой применения для других субъектов Российской Федерации. В мировой практике послойное отражение пространственных данных является одним из инструментов для оперативного управления и корректировки региональной экономики [24, 25].

Чтобы геоинформационная система смогла комплексно проанализировать данные в режиме реального времени, дополнить и смоделировать различные сценарии, предлагаем четыре метода, на основе которых возможно оценить состояние конкретных районов, предложить варианты развития и смоделировать последствия принятых решений:

1. Пространственный анализ — для выявления проблем с территориями: ограниченный доступ к инфраструктуре, замкнутые дорожные связи, отсутствие системы водоснабжения, области с высоким уровнем загрязнения окружающей среды. Применим для выявления областей с конкретными экономическими или социальными характеристиками, такими как высокий уровень бедности или безработицы.

2. Сценарный анализ служит для моделирования и разработки различных гипотетических сценариев с целью проведения комплексов мер по развитию территорий поселений. Для изучения потенциального воздействия различных мер политики на развитие областей, регионов и населенных пунктов.

3. Визуализация данных — создание интерактивных визуальных данных в системе на временном промежутке, которые позволяют заинтересованным сторонам изучать данные наглядно. Включает использование диаграмм, карт и других графических инструментов.

4. Прогнозное моделирование заключается в разработке прогнозных моделей, которые помогут заинтересованным сторонам выявить будущие тенденции в развитии поселений и определить социально-экономические области, в которые может потребоваться вмешательство, оценить будущий рост населения и спрос на различные типы товаров и услуг инфраструктуры, в том числе особые экономические зоны [26]. Предполагает использование машинного обучения, использование статистических данных и других аналитических инструментов.

Разработка геоинформационной системы с применением четырех изложенных методов обеспечит возможность собирать актуальные данные и применять их при разработке мероприятий по достижению ключевых показателей Стратегии развития Республики Татарстан до 2030 года¹ в большинстве экономических и социальных отраслей, а также отследить потребность в транспортных сообщениях и повышении уровня инфраструктуры с целью привлечения и сохранения человеческого капитала в конкретном муниципальном образовании. Немаловажно: нормативно-правовое поле должно развиваться, обеспечивая создание опережающих условий для развития территорий региона [27].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Атаева А.Г., Уляева А.Г. Межтерриториальное взаимодействие в документах стратегического планирования (на материалах регионов Приволжского федерального округа) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. 2023. № 1. С. 176–191. DOI: 10.15593/2224-9354/2023.1.13 EDN JOMAFY.

2. Вульфович Р.М. Проблемы кооперации и координации в многоуровневых системах управления крупных городов в условиях цифровизации // Россия: тенденции и перспективы развития : ежегодник. Материалы XIX Нац. науч. конф. с междунар. участием, г. Москва, 18–19 декабря 2019 года / отв. ред. В.И. Герасимов. М. : ИНИОН РАН, 2020. Т. 15. Часть 1. С. 650–655. EDN LMODME.

3. Карачурина Л.Б., Мкртчян Н.В., Петросян А.Н. Пространственные особенности миграционного прироста пригородов региональных столиц России // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2021. № 6. С. 123–134. EDN JWDSAN.

4. Мельникова Л.В. Эффективность больших городов: теория и эмпирика // Вопросы экономики.

2023. № 3. С. 83–101. DOI: 10.32609/0042-8736-2023-3-83-101. EDN GMUYJI.

5. Еременко М.М., Гареев И.Ф. Исследование взаимосвязей жилищного строительства и устойчивого развития территорий // Жилищные стратегии. 2019. Т. 6. № 3. С. 333–376. DOI: 10.18334/zhs.6.3.41188

6. Закирова Ю.А., Сагдиев А.Р. Особенности градостроительного развития поселений городского типа в структуре Казанской агломерации // Известия КГАСУ. 2022. № 3 (61). С. 130–146. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_130. EDN FDMELF.

7. Коломак Е.А., Шерубнёва А.И. Оценка значимости агломерационных эффектов на юге Сибири // Пространственная экономика. 2023. Т. 19. № 1. С. 52–69. DOI: 10.14530/se.2023.1.052-069. EDN LKIHNU.

8. Махрова А.Г., Сафронов С.Г., Абилов А.Ж. Городские агломерации Казахстана: тенденции социально-экономического развития // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 1. С. 16–28. DOI: 10.31857/S2587556623010119. EDN LKERDP.

9. Batunova E., Gunko M. Urban shrinkage: an unspoken challenge of spatial planning in Russian small and

medium-sized cities // *European Planning Studies*. 2018. Vol. 26. No. 8. Pp. 1580–1597. DOI: 10.1080/09654313.2018.1484891

10. Gao J., O'Neill B.C. Data-driven spatial modeling of global long-term urban land development: The SELECT model // *Environmental Modelling & Software*. 2019. Vol. 119. Pp. 458–471. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.06.015

11. Матвеева Е.С. Рынок жилой недвижимости г. Казани: целевые ориентиры застройщиков и потребительские предпочтения // *Жилищные стратегии*. 2022. Т. 9. № 4. С. 353–376. DOI: 10.18334/zhs.9.4.116426

12. Рындина А.О., Свищева В.А. Финансовые аспекты развития Саратовской агломерации // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Экономика. Управление. Право*. 2023. Т. 23. № 1. С. 42–47. DOI: 10.18500/1994-2540-2023-23-1-42-47. EDN DBSYCU.

13. Новокрещёнов А.В., Морозова Т.Ю. Городская агломерация в единой системе публичной власти (по результатам опроса глав сельских поселений Новосибирской области) // *Развитие территорий*. 2023. № 1 (31). С. 35–42. DOI: 10.32324/2412-8945-2023-1-35-42. EDN NCSVQN.

14. Бусыгина И.М., Сагитова Л.В. Агломерации, кластерная политика и экономический рост в России (случай Республики Татарстан) // *Вестник Пермского университета. Политология*. 2020. Т. 14. № 2. С. 5–14. DOI: 10.17072/2218-1067-2020-2-5-14. EDN BETKNM.

15. Суворова А.В. Ориентиры пространственного развития региона: кейс Свердловской и Челябинской областей // *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2023. Т. 29. № 1. С. 74–83. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-1-74-83. EDN QLUGJF.

16. Кульков А.А., Ваиуркин Е.Д. Исследование влияния транспортной инфраструктуры на градостроительную ценность территории // *Жилищные стратегии*. 2023. Т. 10. № 3. С. 191–210. DOI: 10.18334/zhs.10.3.118991

17. Ступникова Е.А. О путях повышения эффективности использования инвестиций в дорожном строительстве // *Недвижимость: экономика, управление*. 2010. № 3–4. С. 91–93. EDN MWKGVX.

18. Srisawat P., Kronprasert N., Arunotayanun K. Development of decision support system for evaluating spatial efficiency of regional transport logistics // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 25. Pp. 4832–4851. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.493

19. Зима А.Г. Модель подцентра Санкт-Петербургской агломерации (на примере деревни Новосаратовка). Концепция развития общегородского центра // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2023. № 3. С. 67–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-67-83. EDN HFCODB.

20. Зотов В.Б. Развитие и угасание российских городов: причины и возможные решения // *Вестник университета*. 2023. № 2. С. 41–47. DOI: 10.26425/1816-4277-2023-2-41-47. EDN SFHMZN.

21. Маркварт Э., Соснин Д.П., Нечаева С.В. Оценка эффективности управления городскими агломерациями: теоретические и практические аспекты // *Регион: Экономика и Социология*. 2023. № 1 (117). С. 44–81. DOI: 10.15372/REG20230102. EDN DZIVLX.

22. Боровской А.Е., Смирнова А.Ю., Перькова М.В., Смирнов К.Л., Бердников М.Н. Маятниковые миграционные потоки Белгородской агломерированной территории // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2023. № 2. С. 53–66. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-53-66. EDN OCNNPU.

23. Sánchez-Romero M., Ediev D., Feichtinger G., Prskawetz A. How many old people have ever lived? // *Demographic Research*. 2017. Vol. 36. No. 1. Pp. 1667–1702. DOI: 10.4054/DemRes.2017.36.54

24. Oliveira E., Hersperger A.M. Governance arrangements, funding mechanisms and power configurations in current practices of strategic spatial plan implementation // *Land Use Policy*. 2018. Vol. 76. Pp. 623–633. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.02.042

25. Glinskiy V., Serga L., Khvan M. Assessment of environmental parameters impact on the level of sustainable development of territories // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 40. Pp. 625–630. DOI: 10.1016/j.procir.2016.01.145

26. Верстина Н.Г., Искандаров Д.З. Реализация государственной политики на основе проектов строительства объектов промышленности в особых экономических зонах // *Вестник МГСУ*. 2023. № 18 (10). С. 1627–1646. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1627-1646

27. Савельева Н.К., Созинова А.А., Макарова Т.В., Шпенглер А.В., Бармина Е.А. Нормативно-правовые проблемы регулирования создания и деятельности агломераций на региональном уровне // *Экономика, предпринимательство и право*. 2023. Т. 13. № 3. С. 733–746. DOI: 10.18334/epp.13.3.117394

Поступила в редакцию 25 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 9 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 9 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Геннадьевич Стерник — доктор экономических наук, профессор, ведущий научный сотрудник; Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук (ИНП РАН);

117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47; профессор; Финансовый университет при Правительстве РФ; 125167, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 49/2; профессор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0003-1411-1011; sergey-sternik@yandex.ru;

Ильнур Фанлович Гареев — кандидат экономических наук, доцент; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0000-0002-7993-9111; igareev@mail.ru;

Арслан Марселевич Насрутдинов — аспирант; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0009-0000-7143-2052; arslan-nasrutdinov@mail.ru.

Вклад авторов:

Стерник С.Г. — разработка концепции исследования, формулировка актуальности и цели исследования.

Гареев И.Ф. — выбор и разработка методики исследования, интерпретация данных, полученных в ходе расчетов.

Насрутдинов А.М. — сбор статистических данных, проведение расчетов, подготовка рисунков.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

- Atayeva A.G., Ulyayeva A.G. Interterritorial interaction in strategic planning documents (by the materials of the Volga Federal District regions). *PNRPU Sociology and Economics Bulletin*. 2023; 1:176-191. DOI: 10.15593/2224-9354/2023.1.13. EDN JOMAFY. (rus.)
- Wulfovich R.M. Problems of cooperation and coordination in multi-level management systems of large cities in the context of digitalization. *Russia: Trends and Prospects : yearbook. Materials of the XIX National Scientific Conference with international participation, Moscow, 18-19 December 2019* / ored. ed. V.I. Gerasimov. Moscow, INION RAS, 2020; 15(1):650-655. EDN LMODME. (rus.).
- Karachurina L.B., Mkrtchyan N.V., Petrosian A.N. Spatial Patterns of Net Migration in the Suburbs of Russian Regional Centers. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*. 2021; 6:123-134. (rus.).
- Melnikova L.V. Efficiency of large cities: Theory and empirics. *Economic issues*. 2023; 3:83-101. DOI: 10.32609/0042-8736-2023-3-83-101 (rus.).
- Eremenko M.M., Gareev I.F. Research on the relationship between housing construction and sustainable development of territories. *Russian Journal of Housing Research*. 2019; 6(3):333-376. DOI: 10.18334/zhs.6.3.41188 (rus.).
- Zakirova Y.A., Sagdiev A.R. Features of urban development of urban-type settlements in the structure of the Kazan agglomeration. *News KSUAE*. 2022; 3(61):130-146. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_130. EDN FDMELF. (rus.).
- Kolomak E.A., Sherubneva A.I. Assessment of the Significance of Agglomeration Effects in the South of Siberia. *Spatial Economics*. 2023; 19(1):52–69. DOI: 10.14530/se.2023.1.052-069. EDN LKIHU. (rus.).
- Makhrova A.G., Safronov S.G., Abilov A.Z. Urban agglomerations of Kazakhstan: tendencies of socioeconomic development. *Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*. 2023; 87(1):16-28. DOI: 10.31857/S2587556623010119. EDN LKERDP. (rus.).
- Batunova E., Gunko M. Urban shrinkage: an unspoken challenge of spatial planning in Russian small and medium-sized cities. *European Planning Studies*. 2018; 26(8):1580-1597. DOI: 10.1080/09654313.2018.1484891
- Gao J., O'Neill B.C. Data-driven spatial modeling of global long-term urban land development: The SELECT model. *Environmental Modelling & Software*. 2019; 119:458-471. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.06.015
- Matveeva E.S. Kazan residential real estate market: developers' targets and consumer preferences. *Russian Journal of Housing Research*. 2022; 9(4):353-376. DOI: 10.18334/zhs.9.4.116426 (rus.).
- Ryndina A.O., Svishcheva V.A. Financial aspects of the Saratov agglomeration development. *Izvestiya of Saratov University. Economics. Management. Law*. 2023; 23(1):42-47. DOI: 10.18500/1994-2540-2023-23-1-42-47. EDN DBSYCU. (rus.).
- Novokreschenov A.V., Morozova T.Yu. Urban agglomeration in the unified system of the public authority (Based on the results of the survey of the heads of the rural settlements of the Novosibirsk region). *Territory Development*. 2023; 1(31):35-42. DOI: 10.32324/2412-8945-2023-1-35-42. EDN NCSVQN. (rus.).
- Busygina I.M., Sagitova L.V. Agglomerations, cluster policy and economic growth in Russia (case of the Republic of Tatarstan). *Bulletin of Perm University. Political Science*. 2020; 14(2):5-14. DOI: 10.17072/2218-1067-2020-2-5-14. EDN BETKNM. (rus.).
- Suvorova A.V. Guidelines for Spatial Development of the Region: the Case of the Sverdlovsk and Chelyabinsk Regions. *Transbaikal State University Journal*. 2023; 29(1):74-83. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-1-74-83. EDN QLUGJF. (rus.).

16. Kulkov A.A., Vashurkin E.D. Impact of transportation infrastructure on the area's urban value. *Russian Journal of Housing Research*. 2023; 10(3):191-210. DOI: 10.18334/zhs.10.3.118991 (rus.).

17. Stupnikova E.A. How to improve the use of investment in road construction. *Real estate: economy, management*. 2010; 3-4:91-93. EDN MWKGVX. (rus.).

18. Srisawat P., Kronprasert N., Arunotayanun K. Development of Decision Support System for Evaluating Spatial Efficiency of Regional Transport Logistics. *Transportation Research Procedia*. 2017; 25:4832-4851. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.493

19. Zima A.G. Model of the sub-center of the St. Petersburg agglomeration (by the example of the village of Novosaratovka). Development concept of the city center. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023; 3:67-83. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-67-83. EDN HFCODB. (rus.).

20. Zotov V.B. Development and decline of Russian cities: reasons and possible solutions. *University Bulletin*. 2023; (2):41-47. DOI: 10.26425/1816-4277-2023-2-41-47. EDN SFHMZN. (rus.).

21. Markwart E., Sosnin D.P., Nechaeva S.V. Evaluating the effectiveness of metropolitan area management: theoretical and practical aspects. *Region: Economics and Sociology*. 2023; 1(117):44-81. DOI: 10.15372/REG20230102. EDN DZIVLX. (rus.).

22. Borovskoy A.E., Smirnova A.Y., Perkova M.V., Smirnov K.L., Berdnikov M.N. Pendulum migration

flows of the Belgorod agglomerated territory. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023; 2:53-66. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-53-66. EDN OCNNU. (rus.).

23. Sánchez-Romero M., Ediev D., Feichtinger G., Prskawetz A. How many old people have ever lived? *Demographic Research*. 2017; 36(1):1667-1702. DOI: 10.4054/DemRes.2017.36.54

24. Oliveira E., Hersperger A.M. Governance arrangements, funding mechanisms and power configurations in current practices of strategic spatial plan implementation. *Land Use Policy*. 2018; 76:623-633. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.02.042

25. Glinskiy V., Serga L., Khvan M. Assessment of Environmental Parameters Impact on the Level of Sustainable Development of Territories. *Procedia CIRP*. 2016; 40:625-630. DOI: 10.1016/j.procir.2016.01.145

26. Verstina N.G., Iskandarov D.Z. Realization of state policy on the basis of projects for construction of industrial facilities in special economic zones. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2023; 18(10):1627-1646. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1627-1646 (rus.).

27. Saveleva N.K., Sozinova A.A., Makarova T.V., Shpengler A.V., Barmina E.A. Normative and legal problems of regulating the agglomeration creation and activity at the regional level. *Journal of Economics, entrepreneurship and law*. 2023;13(3):733-746. DOI: 10.18334/epp.13.3.117394

Received December 25, 2023.

Adopted in revised form on October 9, 2024.

Approved for publication on October 9, 2024.

B I O N O T E S: **Sergey G. Sternik** — Doctor of Economic Sciences, Professor, Leading Researcher; **Institute of Economic Forecasting of Russian Academy of Sciences (IEF RAS)**; 47 Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117418, Russian Federation; Professor; **Financial University under the Government of the Russian Federation**; 49/2 Leninskogradsky Ave., Moscow, 125167, Russian Federation; Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1411-1011; sergey-sternik@yandex.ru;

Ilnur F. Gareev — candidate of economic sciences, associate professor; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7993-9111; igareev@mail.ru;

Arslan M. Nasrutdinov — postgraduate student; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-7143-2052; arslan-nasrutdinov@mail.ru.

Contribution of the authors:

Sergey G. Sternik — development of the research concept, formulation of the relevance and purpose of the study.

Ilnur F. Gareev — selection and development of research methods, interpretation of data obtained during calculations.

Arslan M. Nasrutdinov — collection of statistics, calculations, production of figures.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 658.7:004.942

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.2001-2013

Планирование системы снабжения строительства в стесненных условиях методом динамического программирования

Ярослава Дмитриевна Агеева¹, Юрий Александрович Чиркунов¹,
Азарий Абрамович Лапидус²

¹ Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин);
г. Новосибирск, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение метода динамического программирования широко используется для решения оптимизационных задач в строительстве. В зависимости от сложности проекта и условий при возведении зданий и сооружений принятие оптимальных решений может потребовать анализа большого количества данных и вариантов. Динамическое программирование позволяет рассмотреть задачу оптимизации как последовательность подзадач, которые могут быть решены по отдельности и затем объединены в общее решение. Это позволяет упростить процесс планирования и управления проектом, что является актуальным для принятия организационно-технологических решений при материально-техническом снабжении строительства в условиях плотной городской застройки, а также для повышения эффективности и конкурентоспособности строительной отрасли в целом.

Материалы и методы. В исследовании применяется метод математической формализации условий, эффективного снабжения ресурсами, метод динамического программирования и метод графовой интерпретации результатов.

Результаты. Произведена оптимизация системы снабжения строительного производства при многопоточной организации работ, на основе результатов оптимизации было определено оптимальное распределение ресурсов и построен сетевой график движения грузопотоков на протяжении рассматриваемого этапа возведения здания. Разработан алгоритм планирования графика поставок при поточном способе доставки ресурсов на строительную площадку.

Выводы. При организации ресурсообеспечения строительно-монтажных работ в стесненных условиях важно учитывать ряд ограничений, вызванных данными условиями. Сокращение складских запасов является критическим условием для поддержания системы снабжения в бездефицитном положении. Кроме того, при поточном методе строительства есть риск повышения складских запасов ввиду динамики спроса на материалы и оборудование в то время, когда работы ведутся параллельно. Применение метода динамического программирования позволяет на этапе планирования избежать возникновения дефицита и превышения максимального запаса материальных ресурсов и выбрать их оптимальное распределение на рассматриваемом этапе строительно-монтажных работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: динамическое программирование в строительстве, строительство в стесненных условиях, математическая формализация производственных ограничений, минимизация издержек снабжения, принцип оптимальности Беллмана, управление снабжением

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Агеева Я.Д., Чиркунов Ю.А., Лапидус А.А. Планирование системы снабжения строительства в стесненных условиях методом динамического программирования // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 2001–2013. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.2001-2013

Автор, ответственный за переписку: Ярослава Дмитриевна Агеева, ya.ageyeva@sibstrin.ru.

Planning of construction supply system in constrained conditions using the dynamic programming method

Yaroslava D. Ageeva¹, Yuri A. Chirkunov¹, Azariy A. Lapidus²

¹ Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin);
Novosibirsk, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. The application of the dynamic programming method is widely used to solve optimization problems in construction. Depending on the complexity of the project and the conditions during the construction of buildings and structures,

making optimal decisions may require the analysis of a large amount of data and options. Dynamic programming allows you to consider an optimization problem as a sequence of subproblems that can be solved separately and then combined into an overall solution. This makes it possible to simplify the process of planning and project management, which is relevant for making organizational and technological decisions in the material and technical supply of construction in dense urban areas, as well as for increasing the efficiency and competitiveness of the construction industry as a whole.

Materials and methods. The study uses the method of mathematical formalization of conditions, efficient supply of resources, the method of dynamic programming and the method of graph interpretation of results.

Results. The supply system for construction production was optimized for multi-threaded organization of work; based on the optimization results, the optimal distribution of resources was determined and a network diagram of the movement of cargo flows was constructed during the considered stage of building construction. An algorithm was developed for planning the supply schedule for the continuous method of delivering resources to the construction site.

Conclusions. The organization of resource support for construction and installation work in cramped conditions must take into account a number of restrictions caused by these conditions. Reducing inventory is critical to maintaining a stock-free supply chain. In addition, with the continuous construction method, there is a risk of increasing inventory due to the dynamics of demand for materials and equipment while work is carried out in parallel. The use of the dynamic programming method made it possible at the planning stage to avoid the occurrence of shortages and exceeding the maximum stock of material resources and to select their optimal distribution at the considered stage of construction and installation work.

KEYWORDS: dynamic programming in construction, construction in constrained conditions, mathematical formalization of production constraints, minimization of supply costs, Bellman's optimality principle, supply management

FOR CITATION: Ageeva Ya.D., Chirkunov Yu.A., Lapidus A.A. Planning of construction supply system in constrained conditions using the dynamic programming method. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):2001-2013. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.2001-2013 (rus.).

Corresponding author: Yaroslava D. Ageeva, ya.ageyeva@sibstrin.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших компонентов бесперебойного ведения строительно-монтажных работ (СМР) является эффективное планирование поставок материально-технических ресурсов, однако, ввиду влияния множества факторов, обусловленных спецификой строительного производства, необходимо учитывать сроки выполнения работ и доставки материалов, их качество, стоимость, а также возможные изменения в проекте, которые могут повлиять на потребность в ресурсах. Кроме того, необходимо учитывать локальные условия и доступность ресурсов в конкретном регионе, а также потенциальные риски, связанные с транспортировкой и хранением материалов.

Задача планирования поставок усложняется из-за влияния на строительное производство условий стесненности, связанных с нехваткой места для размещения строительных материалов и оборудования, и особенностей выполнения погрузочно-разгрузочных операций. В связи с этим возникает необходимость оптимизации планирования поставок материально-технических ресурсов с учетом всех ограничений, вызванных ведением работ в условиях плотной городской застройки, чтобы минимизировать риски, связанные с задержкой и некомплектной поставкой.

Экономико-математические методы могут быть применены в планировании движения грузопотоков в строительстве для оптимизации процесса и снижения затрат [1]. При создании математико-кибернетической модели необходимо своевременно оценивать ее адаптивность к поставленным задачам и влияющим факторам.

Будучи одним из крупнейших субъектов конечного потребления материальных ресурсов, строительный комплекс в наибольшей степени должен быть

заинтересован в эффективных формах их приобретения и рациональном использовании [2]. Обеспечение наиболее продуктивного управления грузопотоками является основной целью логистических процессов в строительстве, однако, ввиду отраслевых особенностей, которые вызваны локализованным характером производства, возникает потребность в большей мобильности материально-технических ресурсов в ходе возведения зданий и сооружений [3, 4].

Проблемой осуществления строительно-монтажных работ в условиях плотной городской застройки является отсутствие единых правил и норм, применимых ко всем видам строительства, это вынуждает учитывать все особенности выполнения работ на каждом отдельном строительном объекте, что, в свою очередь, ведет к увеличению издержек производства [5].

В работе [6] представлено сравнение подходов линейного и обратного динамического программирования для решения задач оптимизации эксплуатации системы в течение длительного периода с учетом ряда ограничений. Было выявлено, что динамическое программирование имеет ряд преимуществ: сокращение времени вычисления, применимость для долгосрочного планирования, возможность решения более широкого круга задач.

Решение задач оптимизации методом динамического программирования было впервые предложено Р. Беллманом. Оптимальное поведение системы характеризуется тем, что, независимо от начального состояния и принятого решения в начальный момент, последующие решения должны быть оптимальными относительно состояния, возникающего после первого решения [7]. Ввиду отсутствия строгой математической формулировки в основе методологии динамического программирования данный подход

позволяет разработать оптимизационную модель, подходящую для решения конкретной пользовательской задачи [8]. При грамотном определении системообразующих показателей, переменных значений и ограничений с установкой общего параметра оптимальности (данным параметром является минимизация издержек производства) допустимо разработать оптимальную модель ресурсоснабжения строительства в условиях стесненности.

Эффективное планирование на основе модели динамического программирования во многом заключается в том, насколько точно будет предсказано поведение рассматриваемой системы в определенный момент времени на этапе планирования [9]. Это наиболее актуально для управления ресурсообеспечением строительного производства, при котором важно учитывать множество факторов и возможных сценариев развития событий.

Основная идея алгоритма динамического программирования включает в себя три аспекта [10]:

1. Оптимальная подструктура. Этот аспект означает, что оптимальное решение задачи может быть разбито на оптимальные решения ее подзадач. Другими словами, если у нас есть задача, которую мы можем разбить на более мелкие подзадачи, и оптимальное решение для всей задачи зависит от оптимальных решений этих подзадач, то говорят, что у задачи есть оптимальная подструктура.

2. Рекуррентное соотношение. Это отношение между решениями более крупных и более мелких подзадач. Рекуррентное соотношение позволяет нам выразить оптимальное решение задачи через оптимальные решения ее подзадач. Это помогает нам строить алгоритмы динамического программирования, используя рекурсивные вызовы или итеративные методы.

3. Перекрывающиеся подпроблемы. Этот аспект означает, что в процессе решения задачи возникают одни и те же подзадачи несколько раз. При использовании динамического программирования мы можем сохранять результаты уже решенных подзадач и использовать их для решения новых подзадач, чтобы избежать повторных вычислений.

Современные исследования в области динамического программирования направлены на разработку математических моделей с целью поиска наиболее оптимальной стратегии управления сложными системами, которые можно разбить на отдельные этапы. Примеры применения данного подхода в строительной отрасли отражены в исследованиях, направленных на оптимизацию планировки строительной площадки и компоновки временных сооружений [11], повышение эффективности транспортно-логистического управления при распределении ресурсов [12], контроля и управления профессиональными рисками [13], определение минимального времени выполнения работ при планировании сетевого графика

технологического процесса на основе графовой интерпретации [14, 15].

Целью исследования является разработка алгоритма планирования снабжения строительства с ограничением хранения материальных ресурсов на строительной площадке — основе применения метода динамического программирования для определения оптимальных значений параметров системы снабжения в заданных граничных условиях.

Для достижения поставленной цели требуется выполнить следующие задачи:

1. Определить факторы стесненности, которые могут выступать в роли ограничений в ходе моделирования системы управления снабжением.

2. Определить целевую функцию, отвечающую за оптимальность системы ресурсообеспечения строительного-монтажных работ.

3. Разработать алгоритм планирования снабжения на основе решения задачи минимизации затрат и определения оптимальных значений параметров системы в заданных граничных условиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Задача оптимального планирования поставок сводится к определению некоторых значений объемов поставки строительных материалов за фиксированные промежутки времени, при которых запас материалов в течение всего периода становится оптимальным относительно выбранного критерия оптимальности.

Основным критерием оптимальности является поставка материалов через заданные временные интервалы в объеме, при котором состояние запасов при их потреблении не переходит в дефицит и вместе с тем не происходит накопление ресурсов на строительной площадке, что будет снижать эффективность работ ввиду стесненных условий СМР.

В задачах оптимизации с ограничениями целевая функция может быть выражена как сумма функций затрат [16]. В математической постановке задачи формулируется следующим образом: требуется найти неотрицательные значения объемов поставки и складских запасов, которые будут минимизировать функцию:

$$F(q_k^s, q_k) = \sum_{k=1}^n C_k^s \cdot q_k^s + C_k \cdot q_k \rightarrow \min, k = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где q_k^s — уровень запасов на шаге k , т; q_k — суммарный объем поставки на шаге k ; C_k^s , C_k — затраты на поставку и хранение на шаге k , определяемые согласно тарифам оплаты труда и транспортным расходам за единицу груза, руб.

В данном исследовании рассматриваются наиболее контролируемые факторы стесненности, связанные с ограничением объемов хранения и единовременного нахождения грузовых транспортных средств на строительной площадке. Минимальный объем

хранения был принят исходя из суточного потребления ресурсов для выполнения работ. Превышение данного объема означает пополнение резервных запасов на складах вне границ строительной площадки, что позволит определить требуемые размеры площадей складов временного хранения.

На основе рассчитанных объемов поставки определяется время простоя транспортного средства под разгрузкой на строительной площадке и на каждом шаге принимается минимальное из возможных вариантов, соответствующих заданным критериям оптимальности. Простой транспортного средства, связанные с проведением погрузочно-разгрузочных операций, являются важным фактором влияния на качество снабжения [17]. Так как простои могут возникать ввиду условий внешней среды, не зависящих от деятельности грузополучателя в лице строительной компании, важно обеспечить наибольший контроль управляемыми факторами.

Таким образом были выделены следующие условия оптимальности:

$$q_{\text{сут}} \leq q_k^s \leq q_{\text{max}}^s; \quad (2)$$

$$q_k^s > q_{\text{сут}} \rightarrow q_k^g = q_k^s - (q_{\text{сут}} \cdot i_{k+1}); \quad (3)$$

$$q_k^s \leq 0 \rightarrow q_{k+1}^s = q_k^s + \Delta(q_k^s - q_{\text{сут}}) - q_{\text{сут}} T_k + q_k \cdot n_k; \quad (4)$$

$$T_k^p = H_{\text{вр}}^{\text{н-р}} \cdot q_k \cdot n_k, \quad (5)$$

где $q_{\text{сут}}$ — суточный объем потребления ресурсов, т; q_{max}^s — максимально допустимый объем хранения, т; q_k^s — гарантийный запас, зафиксированный на шаге k , т; i_{k+1} — интервал между поставками на следующем шаге, относительно шага k , дн; T_k — продолжительность работ на шаге k , дн; n_k — число рейсов грузового транспорта, согласно заданному интервалу на шаге k , шт; $H_{\text{вр}}^{\text{н-р}}$ — норма времени погрузочно-разгрузочных работ для заданного типа (класса) груза, чел.-час.

Результаты представляются с помощью метода динамического планирования на каждом шаге k с последующим построением сетевого графика на основе метода графовой интерпретации математических моделей.

Потребность в строительных материалах определяется при планировании строительно-монтажных работ, на каждый из планируемых периодов, количество потребных материалов не остается неизменным от периода к периоду, поэтому спрос является детерминированным. В этом заключается нестационарность спроса. В связи с нестационарностью спроса метод дифференцирования для решения данной задачи неприменим. Для нахождения минимума функции (1) необходимо использовать методику динамического программирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для начала планирования календарный график СМР разделяется на вехи, каждая из которых будет иметь одно из следующих значений: момент увеличения количества рабочих потоков или момент перехода к следующему технологическому этапу возведения здания. Оба данных способа могут предполагать планирование графика снабжения при многономенклатурном поступлении ресурсов, однако в таком случае рекомендуется выполнять укрупненный расчет исходя из возможности совместной доставки грузов в заданном количестве через определенные временные промежутки. Разделенные этапы должны быть упорядочены или поддаваться сортировке, в противном случае задача не может быть решена, так как различные объективные ситуации, в которых развивается проблема на каждом этапе, выражаются в разных состояниях [18].

В данном исследовании рассматривается прямой метод решения задачи оптимизации с делением рассматриваемого этапа СМР согласно изменению количества потоков работ. Прямой метод решения задачи применяется в том случае, если известно состояние системы в конечный момент n , в данном случае запасы должны быть израсходованы в полном объеме [19]. Если известно состояние запасов в начальный и в конечный момент рассматриваемого этапа возведения здания, то можно использовать как прямой метод решения, так и обратный. При обратном методе определяется характер движения грузопотоков исходя из знания объема подготовительного запаса ресурсов, который нужно иметь на время начала работ.

На первом шаге функция представляет собой сумму затрат на погрузочно-разгрузочные операции, транспортировку груза и хранение на момент наступления первой вехи графика снабжения.

$$F_1^*(q_1^s) = \min\{C_1(q_0^s, q_1^s)\}, \quad (6)$$

где q_1^s — уровень запасов в момент $k = 1$, т; C_1 — затраты на хранение и поставку в момент $k = 1$, определяемые согласно тарифам оплаты труда и транспортным расходам за единицу груза, руб; q_0^s — уровень запасов в момент начала работ, т; q_1 — объем поставки в момент $k = 1$, т.

На последнем шаге условная целевая функция будет представлена как сумма значений функций затрат на шаге k и на предыдущем шаге $k-1$. На шаге k известен требуемый уровень запасов для удовлетворения условия полного расхода основных и резервных запасов к концу строительного процесса:

$$F_k^*(q_k^s) = \min\{f_k(q_{k-1}^s, q_k^s) + F_{k-1}^*(q_{k-1}^s)\}. \quad (7)$$

Переменные, обозначающие оптимальный размер поставки, связаны с уровнем запасов уравнением состояния, соответственно на шаге $k-1$, где условие расхода также привязывается к уравнению состояния, накладывая на величину уровня запасов в мо-

мент $k-1$ условие неотрицательности (8), что, в свою очередь, ведет к ограничениям оптимального объема поставки (9). Кроме того, функция затрат (10) будет также зависеть от данного неравенства:

$$q_{k-1}^s = q_k^s - q_k + q_k^c \geq 0; \quad (8)$$

$$q_k \leq q_k^s + q_k^c; \quad (9)$$

$$C_k(q_{k-1}^s, q_k) = C_k(q_k^s - q_k + q_k^c, q_k), \quad (10)$$

где q_k^c — объем потребления ресурсов, зафиксированный в момент времени от $k-1$ до k .

Если рассмотреть подробно каждый этап (рис. 1), становится ясно, что при переходе системы к многопоточному ведению строительства плановая интенсивность потребления увеличивается на величину, равную количеству параллельных потоков. Для того чтобы система не переходила в дефицитное состояние, было принято решение сокращать интервал между поставками таким образом, чтобы каждая очередная поставка с требуемым объемом материальных ресурсов не превышала допустимый максимальный объем хранения. Сокращение интервала между поставками, в свою очередь, приводит к повышению стоимости грузовых операций. Таким образом, дополнительной задачей оптимизации является определение такого объема q_k на границе перехода к многопоточному ведению строительства, который бы позволил обеспечить минимально возможную стоимость транспортных расходов и расходов, связанных с погрузочно-разгрузочными работами.

Применение системы снабжения с фиксированным интервалом между заказами в данном случае является затруднительным, так как если доставка ресурсов не была выполнена на границе перехода к многопоточному строительству, увеличение интенсивности потребления ведет к раннему наступлению момента расхода резервных запасов, а соответственно, к переходу системы в дефицитное состояние. При таком характере движения грузопотоков требуется включать внеплановое пополнение резервных запасов для поддержания бесперебойного ведения строительства.

Гарантийный (страховой) объем хранения обычно не изменяется в течение этапа строительства при осуществлении поставок в срок и представляет собой количество требуемых строительных материалов и конструкций, хранимых в соответствии с особенностями складирования на строительной площадке. Однако в данном случае для каждого отдельного шага минимальный гарантийный запас умножается на количество параллельно идущих потоков. При ведении строительства в стесненных условиях данный показатель играет большую роль, так как при ограничении площадей для хранения материалов важно не превышать заданный объем резервного хранения во избежание перегрузки строительной площадки, а также в случае определения площадей складирования, получаемых путем эксплуатации дополнительных складских помещений вне границ строительного объекта. Наличие заранее определенных объемов страховых запасов позволит предупредить возникновение неритмичности поступления ресурсов на строительную площадку [20].

В качестве примера рассматривается поставка кирпича полнотелого для выполнения кирпичной кладки наружных стен, согласно обоснованию ГЭСН 08-02-001¹. В табл. 1 представлена калькуляция параметров системы снабжения с фиксированным объемом заказа (ФОЗ), нормативные единицы измерения соответствующих материальных ресурсов были переведены в тонны для дальнейшего определения параметров, связанных с погрузочно-разгрузочными работами и транспортировкой груза.

Для каждого шага k составляются расчетно-параметрические таблицы. Для упрощения расчета объемы хранения и поставки материальных ресурсов были сокращены на величину наибольшего общего делителя, который равен минимальному суточному потреблению.

При применении данной методики расчета допускается приведение единиц к общей системе исчисления, рассматривая движение грузопотоков по массе, количеству одновременно поступающих

¹ ГЭСН 08-02-001. Кладка стен из кирпича. URL: <https://cs.smetnoedelo.ru/gesn2/tabl-08-02-001/>

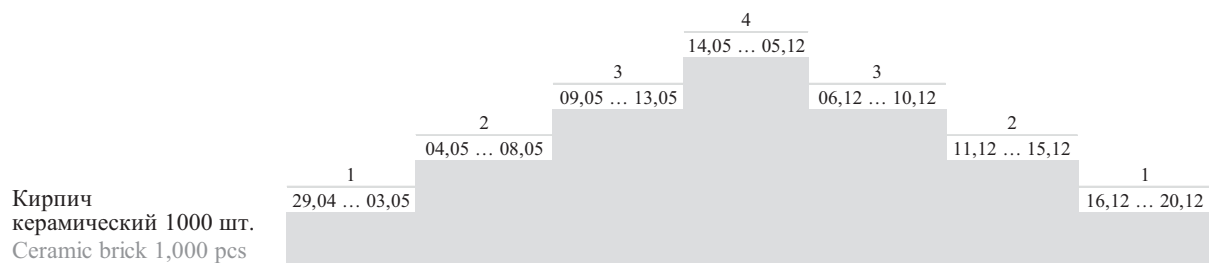


Рис. 1. График изменения объема потребления ресурсов (сроки выполнения работ по кирпичной кладке стен с 29 апреля по 20 декабря)

Fig. 1. The schedule of changes in the volume of resource consumption (deadlines for the brickworks on the walls from April 29th to December 20th)

Табл. 1. Калькуляция параметров системы снабжения ФОЗ при бездефицитном потреблении материальных ресурсов
Table 1. Calculation of the parameters of a supply system with a fixed order volume with a deficit-free consumption of material resources

Объем работ Scope of work	Обоснование Justification	08-02-001
	Ед. изм. Unit	м³ m³
	Количество Quantity	2219,734
Класс груза Class of cargo		1
Наименование ресурса Resource		Кирпич керамический Ceramic brick
Ед. изм. Unit		1000 шт. 1,000 pcs
Расстояние доставки Delivery supply	км km	20,00
Нормативная продолжительность хранения Regulatory duration of storage	дней days	5,00
Максимальный объем хранения Maximum storage volume	Ед. изм. Unit	26,90
	т t	121,05
Продолжительность потребления Duration of consumption	дней days	236,00
Минимальное суточное потребление Minimum daily consumption	Ед. изм. Unit	5,38
	т t	24,21
Максимальное суточное потребление Maximum daily consumption	Ед. изм. Unit	21,52
	т t	96,84
Интервал между поставками Interval between supply	дней days	0–5
Плановый объем поставки Planned scope of supply	т t	24,21
Погрузочно-разгрузочные работы Loading-unloading operations	руб/т rub/t	944,48
Тариф на доставку ед. груза Unit delivery cargo price	руб/т rub/t	448,05

на площадку или на склад временного хранения за-
груженных кузовов транспортного средства и т.д.
В табл. 2 представлены результаты расчета
требуемого количества рекуррентных соотношений
на каждом шаге $k = 1, 2, \dots, n$, где $n = 7$. Для каждого
значения q_k^s и q_k рассчитываются затраты на транс-
портировку, хранение и погрузочно-разгрузочные
операции. Затраты на хранение материалов опреде-
ляются на основе средневзвешенного значения объ-
ема хранения q_k^s , так как это позволяет учесть все
изменения в объеме запасов материалов за период
времени от шага $k-1$ до шага k . Средневзвешенное
значение учитывает как начальные, так и конеч-
ные запасы материалов, что позволяет более точно
определить средний объем материалов, хранимых
на складе за определенный период. В данной таблице
производится условная оптимизация, после которой

на основании выбранных минимальных значений,
соответствующих граничным условиям, осуществляет-
ся переход к безусловной оптимизации. Для перво-
го шага оптимизации затраты на транспортировку
и погрузочно-разгрузочные работы рассчитываются
исходя из условия (9) и значения суммы уровня объ-
ема хранения и объема потребления, в данном про-
межутке (при условии заданного объема хранения
в начале работ и объема потребления за заданный
период времени) оптимальный объем поставки будет
определяться по формуле:

$$q_1 = q_1^s - q_0^s + q_{0-1}^c. \tag{11}$$

Значение числа рейсов n_k в сторону строительной
площадки округляется до целого в меньшую сторону.
При возникновении отрицательного значения
уровня хранения q_{k+1}^s на этапе планирования в случае

Табл. 2. Расчет плановых параметров системы снабжения для определения условных оптимальных значений
Table 2. Calculation of planned parameters of the supply system to determine the conditional optimal values

$q_0^x, \text{ т / т}$	$q_1^x, \text{ т / т}$	$q_{0-1}^n, \text{ т / т}$	$q_1, \text{ т / т}$	$i_1, \text{ дн.}$ days	$n_1, \text{ шт.}$ pcs	$\Sigma q_1, \text{ т / т}$	$\overline{q_1^x}, \text{ т / т}$	$C_x(\overline{q_1^x}),$ руб. / rub	$C(q_1^x + q_{0-1}^n),$ руб. / rub	$F_1(q_1^x),$ руб. / rub
5,00	5,00	5,00	1,00	1,00	5,00	5,00	7,50	750,00	2000,00	2750,00
	4,00		2,00	2,00	2,00	4,00	7,00	700,00	1600,00	2300,00
	3,00		3,00	3,00	1,00	3,00	6,50	650,00	1200,00	1850,00
	4,00		4,00	4,00	1,00	4,00	7,00	700,00	1600,00	2300,00
	5,00		5,00	5,00	1,00	5,00	7,50	750,00	2000,00	2750,00
$q_1^x, \text{ т / т}$	$q_2^x, \text{ т / т}$	$q_{1-2}^n, \text{ т / т}$	$q_2, \text{ т / т}$	$i_2, \text{ дн.}$ days	$n_2, \text{ шт.}$ pcs	$\Sigma q_2, \text{ т / т}$	$\overline{q_2^x}, \text{ т / т}$	$C_x(\overline{q_2^x}),$ руб. / rub	$C(q_2^x),$ руб. / rub	$F_2(q_2^x, q_2^x),$ руб. / rub
5,00	5,00	10,00	1,00	0,50	10,00	10,00	10,00	1000,00	2000,00	5750,00
	4,00		2,00	1,00	5,00	10,00	9,00	900,00	2000,00	5200,00
	2,00		3,00	1,50	3,00	9,00	7,50	750,00	1800,00	4400,00
	2,00		4,00	2,00	2,00	8,00	8,00	800,00	1600,00	4700,00
	5,00		5,00	2,50	2,00	10,00	10,00	1000,00	2000,00	5750,00
$q_2^x, \text{ т / т}$	$q_3^x, \text{ т / т}$	$q_{2-3}^n, \text{ т / т}$	$q_3, \text{ т / т}$	$i_3, \text{ дн.}$ days	$n_3, \text{ шт.}$ pcs	$\Sigma q_3, \text{ т / т}$	$\overline{q_3^x}, \text{ т / т}$	$C_x(\overline{q_3^x}),$ руб. / rub	$C(q_3^x),$ руб. / rub	$F_3(q_3^x, q_3^x),$ руб. / rub
5,00	5,00	15,00	1,00	0,33	15,00	15,00	12,50	1250,00	3000,00	10 000,00
	3,00		2,00	0,67	7,00	14,00	11,00	1100,00	2800,00	9100,00
	2,00		3,00	1,00	5,00	15,00	9,50	950,00	3000,00	8350,00
	3,00		3,00	1,33	3,00 + 1,00	16,00	10,00	1000,00	3200,00	8900,00
	5,00		5,00	1,67	3,00	15,00	12,50	1250,00	3000,00	10 000,00
$q_3^x, \text{ т / т}$	$q_4^x, \text{ т / т}$	$q_{3-4}^n, \text{ т / т}$	$q_4, \text{ т / т}$	$i_4, \text{ дн.}$ days	$n_4, \text{ шт.}$ pcs	$\Sigma q_4, \text{ т / т}$	$\overline{q_4^x}, \text{ т / т}$	$C_x(\overline{q_4^x}),$ руб. / rub	$C(q_4^x),$ руб. / rub	$F_4(q_4^x, q_4^x),$ руб. / rub
00'5	00'5	824,00	1,00	0,25	824,00	824,00	417,00	41 700,00	164 800,00	216 500,00
	00'3		2,00	0,50	412,00	824,00	415,00	41 500,00	164 800,00	215 400,00
	3,00		3,00	0,75	274,00 + 1,00	825,00	414,50	41 450,00	165 000,00	214 800,00
	2,00		4,00	1,00	206,00	824,00	414,00	41 400,00	164 800,00	215 100,00
	00'5		5,00	1,25	164,00	820,00	415,00	41 500,00	164 000,00	215 500,00

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

$q_4^x, \tau / t$	$q_5^x, \tau / t$	$q_{4-5}^n, \tau / t$	$q_5, \tau / t$	$i_5, \text{дн.}$ days	$n_5, \text{шт.}$ pcs	$\Sigma q_5, \tau / t$	$\overline{q_5^x}, \tau / t$	$C_x(q_5^x),$ руб. / rub	$C(q_5),$ руб. / rub	$F_5(q_5^x, q_5),$ руб. / rub
5,00	5,00	15,00	1,00	0,33	15,00	15,00	12,50	1250,00	3000,00	220 750,00
3,00	2,00		2,00	0,67	7,00	14,00	10,00	1000,00	2800,00	219 200,00
2,00	2,00		3,00	1,00	5,00	15,00	9,50	950,00	3000,00	218 750,00
2,00	3,00		4,00	1,33	3,00 + 1,00	16,00	10,00	1000,00	3200,00	219 300,00
1,00	1,00	–	5,00	1,67	3,00	15,00	8,50	850,00	3000,00	219 350,00
$q_5^x, \tau / t$	$q_6^x, \tau / t$	$q_{5-6}^n, \tau / t$	$q_6, \tau / t$	$i_6, \text{дн.}$ days	$n_6, \text{шт.}$ pcs	$\Sigma q_6, \tau / t$	$\overline{q_6^x}, \tau / t$	$C_x(q_6^x),$ руб. / rub	$C(q_6),$ руб. / rub	$F_6(q_6^x, q_6),$ руб. / rub
5,00	5,00	10,00	1,00	0,50	10,00	10,00	10,00	1000,00	2000,00	223 750,00
2,00	2,00	–	2,00	1,00	5,00	10,00	7,00	700,00	2000,00	221 900,00
2,00	1,00	–	3,00	1,50	3,00	9,00	6,50	650,00	1800,00	221 200,00
4,00	2,00	–	4,00	2,00	2,00	8,00	7,00	700,00	1600,00	221 600,00
1,00	1,00	–	5,00	2,50	2,00	10,00	6,00	600,00	2000,00	221 950,00
$q_6^x, \tau / t$	$q_7^x, \tau / t$	$q_{6-7}^n, \tau / t$	$q_7, \tau / t$	$i_7, \text{дн.}$ days	$n_7, \text{шт.}$ pcs	$\Sigma q_7, \tau / t$	$\overline{q_7^x}, \tau / t$	$C_x(q_7^x),$ руб. / rub	$C(q_7),$ руб. / rub	$F_7(q_7^x, q_7),$ руб. / rub
5,00	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	500,00	0,00	224 250,00
2,00	0,00	–	3,00	2,00	1,00	3,00	3,50	350,00	600,00	222 850,00
1,00	0,00	–	4,00	3,00	1,00	4,00	3,00	300,00	800,00	222 300,00
2,00	0,00	–	3,00	4,00	1,00	3,00	3,50	350,00	600,00	222 550,00
1,00	0,00	–	4,00	5,00	1,00	4,00	3,00	300,00	800,00	223 050,00

отсутствия резервных запасов требуется внести в расчет внеплановую поставку, равную принятому объему на данном шаге. В данном случае такой вариант решения не является оптимальным, так как при фактическом использовании графика в сопровождении строительства с заранее запланированными внеплановыми поставками контроль будет осуществляться не только за их исполнением, но и за непредвиденными изменениями графика снабжения, обусловленными внешними факторами строительного производства. Поэтому при планировании требуется максимально оптимизировать график, особенно это важно при долгосрочном планировании графика снабжения в случае многоменклатурных поставок.

В графовой интерпретации вершинами графа являются события, а ребра представляют собой управленческие взаимодействия [21]. Для построения сетевого графика в качестве вершин принимается уровень хранения ресурсов в момент k . График распределен по оси ординат согласно уровню хранения, по оси абсцисс — согласно продолжительности работ от k до $k+1$. Ребра графика представляют собой интервал между поставками, определяемый согласно продолжительности работ от k до $k+1$ и числу полных рейсов до строительной площадки. В вершинах графика помимо номера оптимизируемого шага

указывается уровень хранения на настоящем шаге k и на следующем $k+1$. Значение уровня хранения на следующем шаге, отображаемое в текущем секторе, определяется исходя из минимального, но достаточного объема потребления для обеспечения бездефицитного движения грузопотоков. В нижнем секторе вершины указывается суммарный объем поставки ресурсов на рассматриваемом временном промежутке с пометкой о необходимости организации внеплановой поставки также для обеспечения бездефицитного движения грузопотоков. Конечной вершиной графика является точка, в которой завершается рассматриваемый этап возведения здания, а уровень хранения переходит к нулю. Сетевой график с указанием оптимального варианта распределения грузопотоков представлен на рис. 2.

На основе полученных данных был разработан алгоритм планирования оптимального графика снабжения строительного производства. Ввиду отсутствия ограничений на установку условий оптимальности задачи динамического программирования данный алгоритм может широко применяться в строительной отрасли, если на основные параметры оптимизации не накладывается условие целочисленности:

1. Анализ влияния факторов стесненности (возможность или невозможность хранения ресурсов

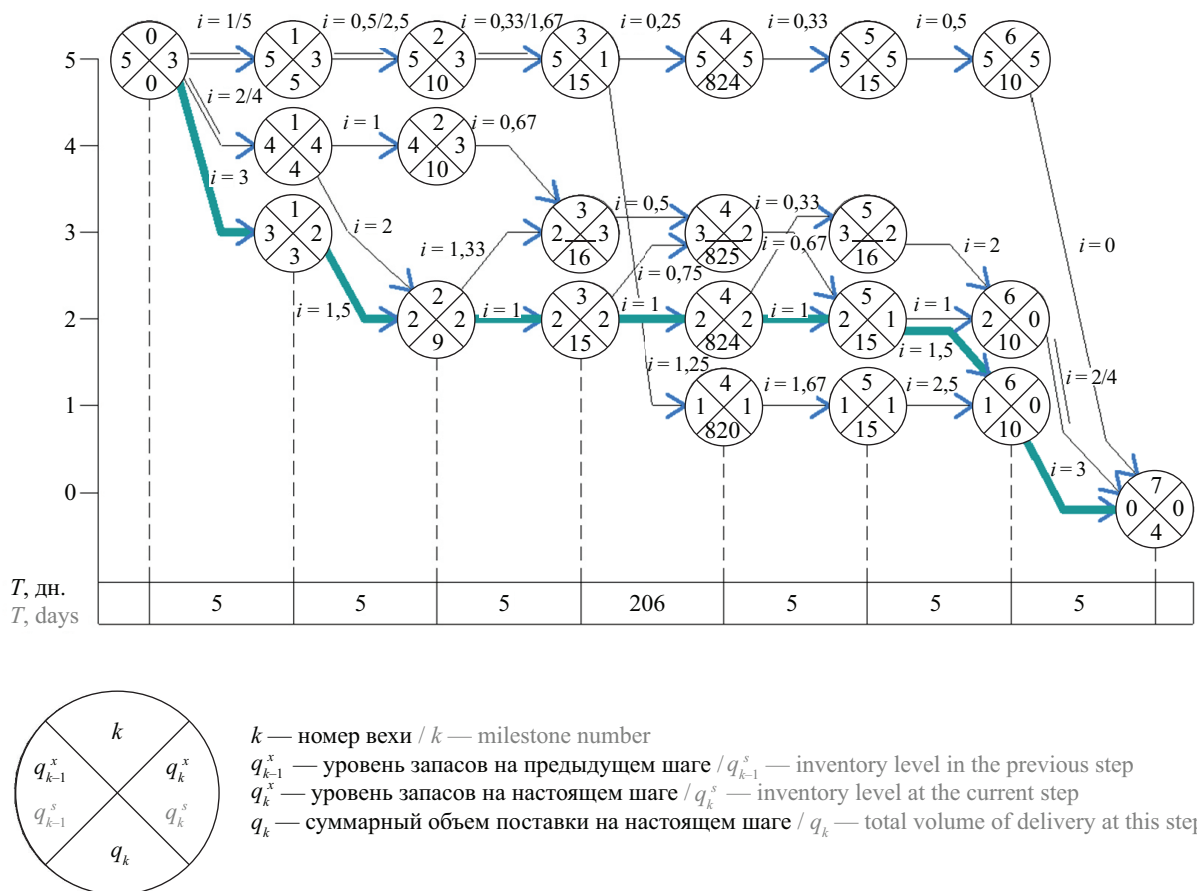


Рис. 2. Сетевой график поставки материальных ресурсов

Fig. 2. Network schedule for the supply of material resources

в границах строительной площадки и допустимый объем хранения).

2. Определение возможных состояний системы (на основе объема работ и календарного графика СМР определить объем потребления ресурсов).

3. Разделение календарного графика СМР на ве-хи (согласно уменьшению или увеличению количества рабочих потоков/смен технологических этапов возведения здания).

4. Определение целевой функции и граничных условий задачи оптимизации на основе известных факторов влияния и особенностей строительного производства.

5. Разработка стратегии оптимизации поставок материальных ресурсов с учетом сокращения интервала между поставками для предотвращения дефицитного состояния и минимизации стоимости операций.

6. Определение метода решения задачи оптимизации (прямая/обратная задача).

7. Построение оптимизационной задачи с решением k -числа рекуррентных соотношений, обусловленного количеством этапов, на которые был разделен процесс (этап) возведения здания.

8. Учет возможности внепланового пополнения резервных запасов для обеспечения ритмичного осуществления СМР при изменении интенсивности потребления ресурсов.

9. Построение сетевого графика снабжения с указанием всех возможных вариантов движения грузопотоков для дальнейшего применения в сопровождении СМР в качестве автоматизированного инструмента оперативного принятия организационных решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования был разработан алгоритм применения метода динамического программирования для долгосрочного планирования графика поставки материальных ресурсов на строительную площадку в стесненных условиях. Заключительным шагом алгоритма является построение сетевого параметрического графика движения грузопотоков для определения оптимального распределения ресурсов как на этапе планирования, так и при сопровождении СМР с возможностью внесения необходимых корректировок и последовательного пересчета будущих оптимальных значений.

Одним из факторов, которым подвержено строительство в условиях стесненности, является ограничение складских, заготовительных площадей, мест под осуществление погрузочно-разгрузочных операций, а также ограничение единовременного нахождения на строительной площадке грузовых транспортных средств. При полном анализе всех контролируемых

факторов, влияющих на строительное производство, определяются граничные условия решения задачи оптимизации. Основное условие — это поддержание объема производственных запасов на минимальном, но достаточном уровне, вместе с тем не превышая границу максимального объема ресурсов. При превышении границы максимального объема хранения формируется резервный запас, с помощью которого пополняются производственные запасы в течение осуществления СМР для предотвращения возникновения дефицита. Исходя из того, какой суммарный объем резервного запаса был получен на этапе планирования, делается вывод о необходимых мощностях складов временного хранения.

За оптимальность системы снабжения в целом отвечает целевая функция затрат на погрузочно-разгрузочные работы, транспортировку груза и хранение. Вместе с тем, если при решении рекуррентного соотношения на некотором шаге оптимизации было получено значение, которому соответствует минимальная стоимость, то это не говорит об оптимальности данного значения на протяжении всего рассматриваемого этапа СМР. Переход к многопоточному ведению работ приводит к нестационарному потреблению ресурсов (до рассмотрения менее контролируемых факторов, которые также могут повлиять на интенсивность потребления ресурсов), что исключает вариант снабжения мелкими партиями. Согласно расчетам в табл. 2, для рассматриваемого типа материальных ресурсов эффективными являются средние объемы поставки, которые позволяют накапливать резервный запас на этапах с одним/двумя параллельно идущими потоками (в случае, если его пополнение не предусмотрено на подготовительном этапе), а на этапах с максимальным числом параллельно идущих потоков расходовать накопленный резервный запас без необходимости увеличения объемов поставки, что, в свою очередь, приведет либо к увеличению числа грузовых транспортных средств, либо к уменьшению интервала между поставками (что также ведет к увеличению числа единовременного нахождения грузовых транспортных средств на строительной площадке).

В дальнейшем планируется рассмотреть более сложные системы снабжения с многоименными поставками, провести анализ сценариев развития событий и разработать порядок действий для их предупреждения на этапе планирования. Вместе с тем в будущих исследованиях требуется рассмотреть возможности автоматизации процесса планирования, используя данный метод оптимизации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Болодурина И.П., Спешников Е.А. Математические и инструментальные средства обеспечения интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению грузопотоками // Прикладная матема-

тика и вопросы управления. 2023. № 2. С. 93–107. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.2.09. EDN HILJFN.

2. Lamekhov V., Chervotenko E. Usage of dynamic programming method in transport and logistics centers

construction and development projects // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. In book: VIII International Scientific Siberian Transport Forum. 2020. Vol. 1115. Pp. 357–366. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_35

3. Дюкова О.М. Логистика строительства: современное понимание и тенденции // *Вестник УРАО*. 2017. № 4. С. 69–73. EDN OAGRQH.

4. Карпушкин И.Д. Актуальные вопросы логистики строительства на современном этапе // *Основы ЭУП*. 2023. № 2 (37). С. 95–99. DOI: 10.51608/23058641_2023_2_95. EDN RQMEER.

5. Седов Д.С. Факторы стесненности в условиях плотной городской застройки // *Вестник МГСУ*. 2010. № 4 (1). С. 171–174. EDN NEJDSH

6. Putz D., Schwabeneder D., Auer H., Fina B. A comparison between mixed-integer linear programming and dynamic programming with state prediction as novelty for solving unit commitment // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 125. Pp. 3–12. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106426

7. Mizutania E., Dreyfus S. A tutorial on the art of dynamic programming for some issues concerning Bellman's principle of optimality // *ICT Express*. 2023. Vol. 9. Pp. 1144–1161. DOI: 10.1016/j.icte.2023.07.001

8. Sun J., Apornak A., Ma G. Presenting a mathematical model for reduction of delays in construction projects considering quality management criteria in uncertainty condition // *Journal of Engineering Research*. 2023. DOI: 10.1016/j.jer.2023.08.021

9. Kedir F., Hall M.D. Resource efficiency in industrialized housing construction : a systematic review of current performance and future opportunities // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 286. P. 15. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125443

10. Zhang Y. A survey of dynamic programming algorithms // *Applied and Computational Engineering*. 2024. Vol. 35 (1). Pp. 183–189. DOI: 10.54254/2755-2721/35/20230392

11. Khaled E., Hisham S. Dynamic site layout planning using approximate dynamic programming // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2009. Vol. 23 (2). Pp. 119–127. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:2(119)

12. Шрамко А.П. Оптимизация транспортно-технологических процессов методом динамического

го программирования // *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. № 4 (1). С. 184–194. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.050. EDN UGPEGW.

13. Басараб А. Применение динамического программирования в задачах управления профессиональными рисками в строительстве // *Безопасность в техносфере*. 2017. № 6 (6). С. 47–53. DOI: 10.12737/article_5af024e4e17da6.63463049. EDN XNBWQP.

14. Пименов С.И. Строительная информационная модель // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2022. № 3 (13). С. 72–84. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.07

15. Taghaddos M., Mousaei A., Taghaddos H., Hermann U., Mohamed Y., AbouRizk S. Optimized variable resource allocation framework for scheduling of fast-track industrial construction projects // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 158. P. 24. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105208

16. Essien J. Application of branch and bound and dynamic Programming in demand forecasting for supply chain optimization // *International Journal of Science and Research*. 2023. Vol. 12 (5). Pp. 2617–2623. DOI: 10.21275/SR23528175430

17. Шепелев В.Д., Альметова З.В., Шепелева Е.В., Алферова И.Д. Использование маневровых транспортных средств для сокращения простоев в пункте оборота // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент*. 2018. № 3. С. 169–175. DOI: 10.14529/em180320. EDN YBJWQX.

18. Ran Y. Optimizing operations management and business analytics strategies under uncertainty: dynamic programming // *Advances in Economics Management and Political Sciences*. 2023. Vol. 49 (1). Pp. 150–156. DOI: 10.54254/2754-1169/49/20230507

19. Louadj K., Aidene M. Direct method for resolution of optimal control problem with free initial condition // *International Journal of Differential Equations*. 2012. Vol. 6. P. 18. DOI: 10.1155/2012/173634

20. Мамонтова Е.В., Воейко О.А. Применение бережливого производства при оценке качества управления отходами // *Компетентность*. 2024. № 1. С. 51–56. DOI: 10.24412/1993-8780-2024-1-51-57

21. Ильюк В.В., Кузнецов О.А. Повышение эффективности управления логистическими потоками // *Вестник РМАТ*. 2023. № 2. С. 21–26. EDN WDCNDI.

Поступила в редакцию 24 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 3 мая 2024 г.

Одобрена для публикации 4 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Ярослав Дмитриевна Агеева — ассистент кафедры технологии и организации строительства; Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин); 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; SPIN-код: 7587-8474, ORCID: 0009-0004-5827-0238; ya.ageyeva@sibstrin.ru;

Юрий Александрович Чиркунов — доктор физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики; Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин);

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; SPIN-код: 2688-5663, Scopus: 18433752300, ORCID: 0000-0001-7128-0757; chr102@yandex.ru;

Азарий Абрамович Липидус — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ORCID: 0000-0001-7846-5770; Lapidusaa@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bolodurina I.P., Speshilov E.A. Mathematical and instrumental means for providing an intelligent decision support system for managing cargo flows. *Applied mathematics and management issues*. 2023; 2:93-107. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.2.09. EDN HILJFN. (rus.).
2. Lamekhov V., Chervotenko E. Usage of Dynamic Programming Method in Transport and Logistics Centers Construction and Development Projects. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. In book: *VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. 2020; 1115:357-366. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_35
3. Dyukova O.M. Construction logistics: modern understanding and trends. *Bulletin of URAO*. 2017; 4:69-73. EDN OAGRQH. (rus.).
4. Karpushkin I.D. Current issues of construction logistics at the present stage. *Fundamentals of EUP*. 2023; 2(37):95-99. DOI: 10.51608/23058641_2023_2_95. EDN RQMEEP. (rus.).
5. Sedov D.S. Factors of constraint in conditions of dense urban development. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2010; 4(1):171-174. EDN NEJDSH.
6. Putz D., Schwabeneder D., Auer H., Fina B. A comparison between mixed-integer linear programming and dynamic programming with state prediction as novelty for solving unit commitment. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021; 125:3-12. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106426
7. Mizutania E., Dreyfus S. A tutorial on the art of dynamic programming for some issues concerning Bellman's principle of optimality. *ICT Express*. 2023; 9:1144-1161. DOI: 10.1016/j.icte.2023.07.001
8. Sun J., Apornak A., Ma G. Presenting a mathematical model for reduction of delays in construction projects considering quality management criteria in uncertainty conditions. *Journal of Engineering Research*. 2023. DOI: 10.1016/j.jer.2023.08.021
9. Kedir F., Hall M.D. Resource efficiency in industrialized housing construction e A systematic review of current performance and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 286:15. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125443
10. Zhang Y. A survey of dynamic programming algorithms. *Applied and Computational Engineering*. 2024; 35(1):183-189. DOI: 10.54254/2755-2721/35/20230392
11. Khaled E., Hisham S. Dynamic Site Layout Planning Using Approximate Dynamic Programming. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2009; 23(2):119-127. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:2(119)
12. Shramko A.P. Optimization of transport and technological processes using the dynamic programming method. *Marine intellectual technologies*. 2021; 4(1):184-194. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.050. EDN UGPEGW. (rus.).
13. Basarab A. Application of dynamic programming in problems of managing professional risks in construction. *Safety in the technosphere*. 2017; 6(6):47-53. DOI: 10.12737/article_5af024e4e17da6.63463049. EDN XNBWQP. (rus.).
14. Pimenov S.I. Construction information model. *Bulletin of PNIPU. Construction and architecture*. 2022; 3(13):72-84. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.07 (rus.).
15. Taghaddos M., Mousaei A., Taghaddos H., Hermann U., Mohamed Y., AbouRizk S. Optimized variable resource allocation framework for scheduling of fast-track industrial construction projects. *Automation in Construction*. 2024; 158:24. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105208
16. Essien J. Application of branch and bound and dynamic Programming in demand forecasting for supply chain optimization. *International Journal of Science and Research*. 2023; 12 (5):2617-2623. DOI: 10.21275/SR23528175430
17. Shepelev V.D., Almetova Z.V., Shepeleva E.V., Alferova I.D. The use of shunting vehicles to reduce downtime at the turnover point. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Economics and management*. 2018; 3:169-175. DOI: 10.14529/em180320. EDN YBJWQX. (rus.).
18. Ran Y. Optimizing Operations Management and Business Analytics Strategies under Uncertainty: Dynamic Programming. *Advances in Economics Management and Political Sciences*. 2023; 49(1):150-156. DOI: 10.54254/2754-1169/49/20230507
19. Louadj K., Aidene M. Direct Method for Resolution of Optimal Control Problem with Free Initial Condition. *International Journal of Differential Equations*. 2012; 6:18. DOI: 10.1155/2012/173634
20. Mamontova E.V., Voeyko O.A. Application of lean production in assessing the quality of waste management. *Competence*. 2024; 1:51-56. DOI: 10.24412/1993-8780-2024-1-51-57 (rus.).
21. Ilyuk V.V., Kuznetsov O.A. Increasing the efficiency of logistics flow management. *RMAT Bulletin*. 2023; 2:21-26. EDN WDCNDI. (rus.).

Received April 24, 2024.

Adopted in revised form on May 3, 2024.

Approved for publication on September 4, 2024.

B I O N O T E S: **Yaroslava D. Ageeva** — Assistant of the Department of Technology and Organization of Construction; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; SPIN-code: 7587-8474, ORCID: 0009-0004-5827-0238; ya.ageyeva@sibstrin.ru;

Yuri A. Chirkunov — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; SPIN-code: 2688-5663, Scopus: 18433752300, ORCID: 0000-0001-7128-0757; chr102@yandex.ru;

Azariy A. Lapidus — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ORCID: 0000-0001-7846-5770; Lapidusaa@mgsu.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Конвергенция как новая парадигма организации инжиниринга и реинжиниринга в строительстве

Сергей Борисович Сборщиков^{1,2}, Наталья Валериевна Лазарева^{1,2}

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

² Национальный исследовательский технологический университет МИСИС (ННТУ МИСИС), г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Любое развитие может испытывать воздействие двух явлений: конвергенции и дивергенции. Конвергенция — это процесс сближения уровней развития систем (экономических, социальных, антропотехнических) во времени, противоположный ей процесс называется дивергенцией. Данные явления обусловлены в основном процессами глобализации и научно-технического прогресса. Приводится классификация видов конвергенции, даны их определения. Реализация на практике концепции конвергенции связана с теоретическими построениями применительно к инжинирингу и реинжинирингу, которые, в свою очередь, обуславливают необходимость формирования нового организационно-экономического механизма инвестиционно-строительной деятельности (ИСД), в основе которого может лежать использование диссипативных организационных структур. Представлено определение подобных структур и идентифицированы их основные свойства и ограничения в реализации.

Материалы и методы. Применялись положения системного подхода, структурного и функционального анализа управления ИСД, методологии логистики регулирующих воздействий, а также методов инвестиционного проектирования, стратегического, оперативного управления в контексте развития теории управления жизненным циклом объектов капитального строительства.

Результаты. Выполнен анализ проявления конвергенции в инвестиционно-строительной сфере, в том числе выявлены ее причины, даны классификация и терминологическая идентификация видов конвергенции, установлено влияние конвергенции на реинжиниринг бизнес-процессов и организационной структуры в строительстве, и на этой основе приведено теоретическое обоснование использования диссипативных организационных структур для обеспечения устойчивого развития.

Выводы. Явление конвергенции во многом определяет такой вид деятельности, как реинжиниринг, который направлен на повышение эффективности за счет трансформации и рационального построения процессов управления, а также организационных структур в условиях наличия диссипации регулирующих воздействий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конвергенция, реинжиниринг, контроллинг, бизнес-процессы, диссипативные организационные структуры, строительные организации, строительная отрасль, система регулирования, логистика регулирующих воздействий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Конвергенция как новая парадигма организации инжиниринга и реинжиниринга в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 2014–2022. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.2014-2022

Автор, ответственный за переписку: Наталья Валериевна Лазарева, tous2004@mail.ru.

Convergence as a new paradigm of engineering and reengineering in construction

Sergej B. Sborshchikov^{1,2}, Natal'ya V. Lazareva^{1,2}

¹ Research Center of Construction; Moscow, Russian Federation;

² National Research Technological University MISIS (NUST MISIS); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Any development can be affected by two phenomena of convergence and divergence. Convergence is the process of convergence of the levels of development of systems (economic, social, anthropotechnical) over time, and the opposite process is called divergence. These phenomena are mainly caused by the processes of globalization and scientific and technological progress. The classification of types of convergence is provided and their definitions are given. The practical implementation of the concept of convergence is associated with theoretical constructions in relation to engineering and reengineering, which in turn determine the necessity of the formation of a new organizational and economic mechanism for investment and construction activities, which may be based on the use of dissipative organizational structures. The paper defines such structures and identifies their main properties and limitations in implementation.

Materials and methods. The study used the provisions of a systematic approach, structural and functional analysis of investment and construction management, methodology of logistics of regulatory influences, as well as methods of invest-

ment design, strategic, operational management in the context of the development of the theory of life cycle management of capital construction facilities.

Results. The analysis of the manifestation of convergence in the investment and construction sector is carried out, including its causes, classification and terminological identification of types of convergence are given, the influence of convergence on the reengineering of business processes and organizational structure in construction is established, and on this basis a theoretical justification is given for the use of dissipative organizational structures to ensure sustainable development.

Conclusions. The phenomenon of convergence largely determines such type of activity as reengineering, which is aimed at increasing efficiency through transformation and rational construction of management processes, as well as organizational structures in the presence of dissipation of regulatory influences.

KEYWORDS: convergence, reengineering, controlling, business processes, dissipative organizational structures, construction organizations, construction industry, regulatory system, logistics of regulatory impacts

FOR CITATION: Sborshchikov S.B., Lazareva N.V. Convergence as a new paradigm of engineering and reengineering in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):2014-2022. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.2014-2022 (rus.).

Corresponding author: Natal'ya V. Lazareva, tous2004@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Любое развитие может испытывать воздействие двух явлений: конвергенции и дивергенции. Конвергенция — это процесс сближения уровней развития систем (экономических, социальных, антропотехнических) во времени, противоположный ей процесс называется дивергенцией. Согласно одноименной теории, главными движущими силами конвергенции являются научно-технический прогресс и капитал, благодаря которым и происходит выравнивание уровня экономического развития разных систем, применительно к инвестиционно-строительной деятельности (ИСД) — территориальных, отраслевых, корпоративных. Однако деятельность подобных систем вне зависимости от расположения в иерархии испытывает сильные возмущения и колебания разной природы, что приводит к перманентному неравновесному состоянию, а для устойчивого положения системы необходим механизм регулирования ИСД [1]. В логике исследования следует установить проявление конвергенции в инвестиционно-строительной сфере и ее влияние на процессы трансформации организационных структур, а также направления их развития.

В этой связи в качестве научной гипотезы исследования предполагается верифицировать возможность формирования организационных структур ИСД, способных обеспечивать устойчивое развитие в состоянии перманентного нарушенного равновесия экономической системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель исследования — анализ проявления конвергенции в инвестиционно-строительной сфере и на этой основе теоретическое обоснование использования диссипативных организационных структур для обеспечения устойчивого развития.

В соответствии с указанной целью необходимо решение следующих задач: провести анализ причин, вызывающих конвергенцию; дать классификацию ее видов; идентифицировать влияние конвергенции на реинжиниринг бизнес-процессов и организационной структуры в строительстве; предложить новые подходы к формированию организационных структур,

исходя из учета явления конвергенции и применяя методологию реинжиниринга.

Решение указанных задач предполагает использование системного подхода к рассмотрению инвестиционно-строительной сферы, структурного и функционального анализа управления инвестиционно-строительной деятельностью, методологии логистики регулирующих воздействий, а также методов инвестиционного проектирования, стратегического, оперативного управления в контексте развития теории управления жизненным циклом (ЖЦ) объектов капитального строительства (ОКС).

С точки зрения практической ценности положения данного исследования позволяют сформировать отраслевые и корпоративные конкурентные преимущества, способные обеспечить устойчивое развитие ИСД на уровнях иерархии в рамках управления ЖЦ ОКС и, как следствие, привести к сокращению времени принятия управленческих решений и их корректировки, а в конечном итоге к снижению продолжительности и стоимости строительства.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как отмечено выше, современные явления, которые протекают в социальных, экономических и антропотехнических системах, характеризуются, в первую очередь, наличием факторов, определенных процессами глобализации и научно-технического прогресса (НТП) [1–4].

В качестве одного из таких явлений можно отметить конвергенцию. Согласно экономическому словарю, под конвергенцией понимается сближение различных экономических систем, стирание различий между ними, обусловленное общностью социально-экономических проблем и наличием одних объективных закономерностей развития [5].

Однако в зависимости от области проявления этого явления и превалирования тех или иных факторов можно выделить следующие виды конвергенции (рис. 1):

- 1) социальная;
- 2) территориальная;
- 3) технологическая;
- 4) организационная.



Рис. 1. Факторы, виды и последовательность проявления конвергенции

Fig. 1. Factors, types and sequence of convergence manifestations

Определяющими признаками конвергенции вне зависимости от уровня проявления можно установить:

1) направление вектора взаимодействия элементов, их развития — взаимное сближение, схождение, интеграция;

2) характер объектов, вовлеченных во взаимодействие в рамках конвергенции, — разнородные по происхождению, назначению, функционалу и т.д.

В этой связи можно дать следующие определения представленным выше терминам (видам конвергенции).

Социальная конвергенция — сближение различных обществ, социумов, социальных групп, нивелирование различий между ними.

Территориальная конвергенция — выравнивание уровня развития земельных участков одноименных и смежных зон данного поселения, а также подобных территорий разных населенных пунктов.

Технологическая конвергенция — процесс интеграции несвязанных между собой технологий в их новые виды (например, аддитивные, природоподобные технологии и т.д.).

Организационная конвергенция — это объединение в одной структуре разнопрофильных узкоспециализированных подразделений (по назначению, функционалу, виду выполняемых работ).

Как указывалось выше, причинами конвергенции служат многочисленные факторы, однако, по мнению авторов, определяющими являются факторы, относящиеся к глобализации и НТП. В свою очередь, их воздействие на тот или иной вид конвергенции неодинаково, что обусловлено различной силой и интенсивностью приложения, а также характером и причинами возникновения тех или иных процессов глобализации и научно-технического развития.

Очевидно, что глобализация оказывает непосредственное воздействие на социальную конвергенцию, так как затрагивает основы как внутренних, так и внешних взаимоотношений социумов, социальных групп в планетарном масштабе. На остальные виды конвергенции процессы глобализации влияют опосредованно через взаимодействие различных социальных групп, в том числе и профессиональных, относящихся к ИСД.

В то же время НТП, в первую очередь, направлен на территориальный и технологический виды конвергенции, как следствие социальной, территориальной и технологической конвергенции, проявляется организационная, которую можно считать производной от процессов интеграции и схождения, вызванных глобализацией и научно-техническим развитием.

Однако необходимо отметить, что организационная конвергенция нивелирует и противоположно направленные процессы, которые также вызваны НТП, — это дивергенция, к ней можно отнести, например, углубление специализации, увеличение числа участников ИСД.

Ярким проявлением организационной конвергенции служит инжиниринговая схема управления, которая зарекомендовала себя как эффективная конфигурация организации управления ИСД, особенно при возведении уникальных, технически сложных объектов, а также реализации крупных инвестиционных проектов.

Отличительной особенностью инжиниринговой схемы является дифференциация управленческой и производственной деятельности между участниками ИСД, что обуславливает появление такого ее субъекта, как организатор строительства, в качестве которого, как правило, выступает инжиниринговая компания. Она не только реализует конкретный инвестиционный проект, но и организует деятельность по подготовке к строительству, возведению здания, сооружения, сдаче его в эксплуатацию и, если необходимо, дальнейшей эксплуатации объекта, однако собственными силами производство строительных, монтажных, обеспечительных и иных работ не выполняет, для этих целей инжиниринговая компания привлекает специализированных подрядчиков.

Таким образом, инжиниринговую схему можно рассматривать как частный случай подрядного способа ведения работ, который наряду с хозяйственным установлен Градостроительным кодексом РФ. Другой его разновидностью служит генподрядная схема, в соответствии с которой деятельность основного участника возведения объекта — генподрядчика ограничена рамками этапа строительства, и при этом собственными силами он выполняет порядка 60 % общего объема работ и только для производства специальных работ привлекает субподрядчиков [6–11].

В настоящее время по разным причинам объективного характера наблюдается постепенный переход от традиционной генподрядной схемы управления строительством к инжиниринговой. Подобный

качественный переход приводит к появлению новых организационных структур, охватывающих своим функционированием все этапы ЖЦ ОКС [12–15]. В качестве примеров указанных организационных методов можно привести стратегический контроллинг, оперативно-производственный контроллинг, интегральный контроль, а в качестве организационных структур — производственно-инжиниринговый центр, логистический центр и др.

Создание эффективных систем стратегического и оперативного управления предполагает наличие, наряду с подсистемами планирования, контроля, подсистемы принятия (корректировки) решений (планов), интегрированной с контуром обратной связи (рис. 2). Данный состав и конфигурация системы управления на уровнях иерархии позволяют ей быть более адаптивной к изменениям внешней среды и внутренних условий реализации инвестиционных проектов, а также принимать своевременные и адекватные решения как управленческого, так и технического характера.

Возможно и дальнейшее объединение отдельных функциональных элементов различных уровней иерархии, связанных с контролем и принятием (корректировкой) решений, т.е. контроллингом как стратегическим, так и оперативно-производственным [16–23]. Подобная конвергентность может стать основой для другого перспективного организационного метода — интегрального контроля реализации инвестиционных программ и проектов, особенно востребованного для строительства технически сложных и уникальных зданий, сооружений.

Реализация на практике концепции конвергенции и связанных с ней теоретических построений, таких как инжиниринг и реинжиниринг, обуславливает необходимость формирования нового организационно-экономического механизма ИСД, который представляет собой интеграцию экономических инструментов (методов) и организационных структур управления указанным видом деятельности.

Определяя инжиниринг как разработку и воплощение в натуре технических решений, реинжиниринг можно установить как качественное преобразование уже существующих, в том числе и воплощенных

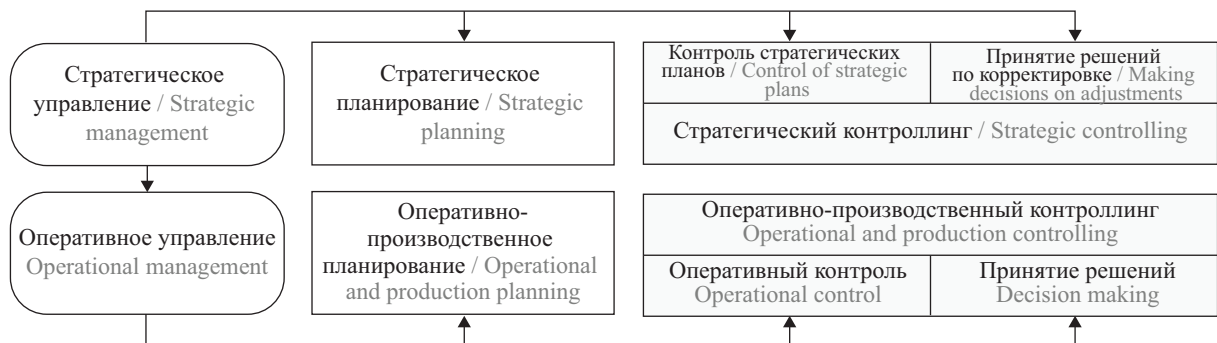


Рис. 2. Составляющие стратегического и оперативного управления (цветом выделена предметная область интегрального контроля)

Fig. 2. Components of strategic and operational management (the subject area of integrated control is highlighted in colour)

в материально-вещественной форме, технических (инженерных) решений.

Экономические методы управления будут испытывать сильное влияние современных тенденций и практик, в основе которых лежат цифровая трансформация, контроллинг, устойчивое развитие, риск-ориентированный подход и управление ЖЦ. Приведенные методы определяют поиск соответствующих им форматов управления (воздействия) [24–29]. В современных условиях наиболее адекватным и перспективным форматом воздействия на ИСД является инжиниринговая схема управления, которая из-за усложнения возводимых объектов и процессов их проектирования, строительства и эксплуатации предполагает решение широкого спектра управленческих и технических задач, координацию большого количества участников ИСД [30–35].

В этой связи в рамках инжиниринговой схемы управления для обеспечения ее эффективности должна быть сформирована организационная структура, учитывающая во избежание противоречий с новыми экономическими методами и флуктуациями внешней среды перспективные и инновационные подходы в организационном проектировании систем управления ИСД.

Современная экономическая обстановка, в которой протекает ИСД, характеризуется постоянным поиском равновесия и сопряженной с этим состоянием неопределенностью и, следовательно, риском. Одна из основных задач управления — обеспечение устойчивого развития. Данная задача актуальна как для отраслевого и федерального уровня иерархии, так и для корпоративного.

Экономические системы постоянно стремятся к состоянию равновесия, в котором пребывают достаточно короткое время. Причем состояние равновесия в настоящее время достигается в основном за счет внешнего регулирующего воздействия, т.е. подобное равновесие — гомеостатическое. Согласно данному положению, интенсивность и направление регулирующего воздействия требуется постоянно поддерживать на соответствующем обстановке уровне, так как оно испытывает влияние диссипации (рассеивания). Из-за проблемы разрыва единственным действенным инструментом поддержания гомеостатического равновесия служит организационная структура. Таким образом, одной из основных функций системы управления служит необходимость обеспечения устойчивого состояния в неравновесной экономической среде за счет организационных построений. Подобные структуры называются диссипативными.

Диссипативные организационные структуры в полной мере соответствуют инжиниринговой схеме управления и характеризуются сложностью и спонтанностью, которые свойственны экономическим и антропогенным системам. К таким системам относятся и инвестиционно-строительная сфера.

Специфика строительной отрасли дополняет свойства диссипативных организационных структур кластерностью, которую можно обозначить как связанное

множество участников ИСД, имеющих свою специализацию, а также внешний или внутренний характер взаимодействия с субъектом управления, который проявляется на определенном этапе ЖЦ ОКС.

В то же время внутри кластера наблюдается сходимость между его элементами по определенному признаку, т.е. имеет место конвергенция. Конвергентность диссипативных организационных структур также можно определить как их свойство.

Разные этапы ЖЦ ОКС имеют разную номенклатуру работ и мероприятий, соответственно это отражается на составе участников ИСД — исполнителей работ относительно этапов и периодов ЖЦ. Количественная подвижность или изменяемость диссипативных структур является еще одним их свойством.

Обозначив в качестве основных такие свойства диссипативных структур, как сложность, спонтанность, кластерность, конвергентность и изменяемость, можно утверждать, что для избежания хаотичных, неуправляемых флуктуаций в системе управления ИСД необходимы регулирующие воздействия, предметом которых будут процессы управления и организационная структура. Это является предметной областью реинжиниринга, а обеспечение эффективности регулирующих воздействий и всей системы управления — сфера применения контроллинга.

С другой стороны, обладая указанными выше свойствами, которые устанавливают возможности развития ИСД, на функционирование диссипативных организационных структур оказывают сильное влияние ограничения, вызванные национальными, отраслевыми и локальными (проектными) особенностями реализации ИСД. Такие особенности определяют ограничительные факторы, например: стоимость, время функционирования, организационно-технологическую надежность и т.д. Соблюдение ограничений, в которых действуют диссипативные структуры, — это основная функция контроллинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе приведенного выше можно констатировать, что явление конвергенции во многом определяет такой вид деятельности, как реинжиниринг, который направлен на повышение эффективности за счет трансформации и рационального построения процессов управления, а также организационных структур. Устойчивое развитие характеризуется перманентным нарушением равновесия и в этой связи инструментом, который бы обеспечил поступательное движение по заданной траектории, могут стать диссипативные организационные структуры. В свою очередь, они обладают конвергентностью и способностью к качественным и количественным изменениям в организации, т.е. реинжинирингу. Подобная гносеологическая спираль свидетельствует о важности понимания явления конвергенции и принятия методологии реинжиниринга для организации систем управления инвестиционно-строительной деятельностью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Сборщиков С.Б.* Логистика регулирующих воздействий в инвестиционно-строительной сфере (теория, методология, практика) : дис. ... д-ра экон. наук. М., 2012. 361 с. EDN QGBVJV.
2. *Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В.* Реинжиниринг процессов материально-технического обеспечения как основа формирования и функционирования логистических центров в строительстве // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 1. С. 102–115. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.102-115
3. *Сборщиков С.Б., Журавлев П.А., Лазарева Н.В.* Проектное управление: инжиниринг и реинжиниринг в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 12. С. 75–82. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.75-82. EDN DXYNBS.
4. *Lazareva N.* Innovative components of sustainable development in construction // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. P. 04001. DOI: 10.1051/mateconf/201819604001
5. *Сборщиков С., Лазарева Н.* Реинжиниринг строительных организаций и реинжиниринг строительной отрасли // Русский инженер. 2022. № 3 (76). С. 45–47. EDN XWACRC.
6. *Малахов В.И.* Ресурснопроектный метод — ценообразование в системе BIM // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 3 (991). С. 52–56. EDN XXAUML.
7. *Малахов В.И.* Стратегия структуризации промышленно-строительного холдинга : дис. ... канд. экон. наук. М., 2005. 155 с. EDN KJZTJW.
8. *Шинкарева Г.Н., Маслова Л.А.* Комплексный инжиниринг как способ интенсификации строительного производства // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2018. № 3. С. 37–41. EDN QIPUEW.
9. *Шинкарева Г.Н.* Интенсификация строительного производства за счет применения комплексного инжиниринга // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2017. № 7. С. 43–46. EDN RAOOYW.
10. *Шинкарева Г.Н.* Модель инжиниринговой схемы организации строительства для контрактов жизненного цикла : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 172 с. EDN XJZLZQ.
11. *Колосова Е.* BIM-технологии в инвестиционно-строительной деятельности. Итоги дискуссионного клуба НПИ // Геоинфо. 2022. № 2. С. 32–35. EDN GAVEVM.
12. *Leybman D., Khripko T.* Quality assurance program of a nuclear facility // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703015
13. *Хрипко Т.В.* Исследование применения технологий информационного моделирования в строительной отрасли КНР // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 2. С. 50–52. EDN OWZZEX.
14. *Khripko T.* Mathematical modeling of failure of port control systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Issue 1. P. 012101. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012101
15. *Zhuravlev P., Bachus E., Markova I.* Directions of modernization of systems for ensuring the quality of construction of nuclear power facilities // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 05039. DOI: 10.1051/mateconf/201825105039
16. *Попков А.Г.* Реализация комплексных логистических решений корпорации «единого заказчика»: на примере строительной отрасли // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Т. 12. № 5–1. С. 324–328. DOI: 10.34670/AR.2022.65.75.026. EDN URUYR.
17. *Zhuravlev P., Bachus E., Markova I.* Nomenclature of works and costs for ensuring the quality of construction products. Identification methods // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661. Issue 1. P. 012128. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012128
18. *Яжлев И.К., Попков А.Г., Белогурова О.А.* Проблемы нормативно-правового обеспечения внедрения ресурсо-, энергосберегающих технологий в градостроительной деятельности // Экономика и предпринимательство. 2020. № 3 (116). С. 1000–1002. DOI: 10.34925/EIP.2020.116.3.212. EDN AJSLCW.
19. *Шумейко Н.М.* Понятия стоимости в строительстве // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 11 (1011). С. 42–45. EDN YMXXDRJ.
20. *Клюев В.Д., Зайцев Д.А., Журавлев П.А.* Нормативная база для стоимостной оценки капитального ремонта многоквартирных домов // Управление многоквартирным домом. 2015. № 1.
21. *Журавлев П.А.* Номенклатура требуемых объектов капитального строительства для ресурсно-технологического моделирования // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 7. С. 52–57. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.52-57. EDN NVXALL.
22. *Попков А.Г.* Кадровое обеспечение строительного производства. Новые подходы к формированию, функционированию, регулированию // Техническое регулирование. Строительство, проектирование и изыскания. 2011. № 8. С. 29–33.
23. *Журавлёв П.* Инженерная защита. Требуемые изменения строительных нормативов и регламентов // Русский инженер. 2022. № 4 (77). С. 44–48. EDN NAFYWT.
24. *Жаров Я.В.* Информационное моделирование строительства на основе блочнокластерной структуры // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2019. № 11. С. 10–14. EDN XTWNSE.
25. *Жаров Я.В.* Организационно-технологическое проектирование в строительстве на основе интеллектуального блока планирования // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 193–199. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-193-199. EDN RQXZDJ.
26. *Киевский И.Л., Аргунов С.В., Жаров Я.В., Юргайтис А.Ю.* Алгоритмизация систем планирования, управления и обработки информации в стро-

ительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 11. С. 14–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.14-24. EDN AGNCHY.

27. Коченкова Е.М., Денисов А.В. Информационное моделирование при решении вопросов защиты окружающей среды объектов строительства // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования — 2022 : сб. докл. Третьей нац. науч. конф. 2023. С. 583–587. EDN BYPLIE.

28. Kochenkova E.M. Environmental protection. Features of information modeling at the stages of the high-rise building life cycle // Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сб. мат. семинара молодых ученых XXV Междунар. науч. конф. 2022. С. 115–120. EDN XSOQZK.

29. Буренин В.С., Езерский В.А., Монастырев П.В. Исследование современных тенденций проектирования жилых зданий в России и за рубежом // Архитектура и время. 2017. № 5. С. 2. EDN YMXHRR.

30. Силка Д.Н., Ермолаев Е.Е. Методологические аспекты новой модели развития строительного комплекса // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 1 (20). С. 34. EDN QIGNGG.

31. Симанович В.М., Ермолаев Е.Е. Осуществление строительства, реконструкции, капитального ремонта объекта капитального строительства // Норми-

рование и оплата труда в строительстве. 2018. № 12. С. 4–8. EDN WIDEBF.

32. Ермолаев Е.Е. Зарубежный и отечественный опыт использования элементов инжиниринга, аутсорсинга и аутстаффинга в строительном производстве // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2019. № 4. С. 49–67. EDN LNBLOC.

33. Монастырев П.В., Евдокимцев О.В., Гавриков В.А., Зеленин Г.В. Институт архитектуры, строительства и транспорта в проблемах устойчивого развития региона // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 46–68. EDN UMONJC.

34. Захаров П.Н., Матвеев М.Ю., Хижняков Д.М. Анализ подходов к оценке уровня инновационности развития строительных организаций // Инновации в отраслях народного хозяйства как фактор решения социально-экономических проблем современности : сб. докл. и мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. 2014. С. 143–151. EDN TKNHQT.

35. Коробко В.И., Карданская Н.Л., Матвеев М.Ю. Философские категории развития в теории управления // Инновации в отраслях народного хозяйства как фактор решения социально-экономических проблем современности : сб. докл. и мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. 2014. С. 8–14. EDN TKNHEV.

Поступила в редакцию 20 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 мая 2024 г.

Одобрена для публикации 5 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Борисович Сборщиков** — доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник, дирекция научно-технических проектов и экспертиз; **Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»);** 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; заведующий кафедрой «Промышленный менеджмент»; **Национальный исследовательский технологический университет МИСИС (НИТУ МИСИС);** 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1; РИНЦ ID: 431022; tous2004@mail.ru;

Наталья Валериевна Лазарева — кандидат технических наук, доцент, руководитель проектов; дирекция научно-технических проектов и экспертиз; 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; доцент, кафедра «Промышленный менеджмент»; **Национальный исследовательский технологический университет МИСИС (НИТУ МИСИС);** 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1; **Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»);** РИНЦ ID: 808973; tous2004@mail.ru.

Вклад авторов:

Сборщиков С.Б. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, научное редактирование, итоговые выводы.

Лазарева Н.В. — обработка материала, проведение исследования, доработка текста, описание результатов и формулирование выводов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Sborshikov S.B. *Logistics of regulatory impacts in the investment and construction sector (theory, methodology, practice) : dis. ... doc. economics.* Moscow, 2012; 361. EDN QGBVJV. (rus.).

2. Sborshikov S.B., Lazareva N.V. Reengineering of logistics processes as the basis for the establishment and

operation of logistics centres in the construction industry. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(1):102-115. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.102-115 (rus.).

3. Sborshikov S.B., Zhuravlev P.A., Lazareva N.V. Project management: engineering and reengineering in

- construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 12:75-82. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.75-82. EDN DXYNBS. (rus.).
4. Lazareva N. Innovative components of sustainable development in construction. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:04001. DOI: 10.1051/mateconf/201819604001
5. Sborshchikov S.B., Lazareva N.V. Reengineering of construction organizations and reengineering of the construction industry. *Russian Engineer*. 2022; 3(76):45-47. EDN XWACRC. (rus.).
6. Malakhov V.I. Projectresource method — pricings in BIM. *BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2017; 3(991):52-56. EDN XXAURL. (rus.).
7. Malakhov V.I. *Strategy of structuring an industrial and construction holding : dis. ... cand. of economic sciences*. Moscow, 2005; 155. EDN KJZTJW. (rus.).
8. Shinkareva G.N., Maslova L.A. Integrated engineering as a way to intensify construction production. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2018; 3:37-41. EDN QIPUEW. (rus.).
9. Shinkareva G.N. Intensification of construction production through the use of integrated engineering. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2017; 7:43-46. EDN RAOOYW. (rus.).
10. Shinkareva G.N. *Model of engineering scheme of construction organization for life cycle contracts : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2018; 172. EDN XJZLZQ. (rus.).
11. Kolosova E. BIM technologies in investment and construction activities. The results of the NPI discussion club. *Geoinfo*. 2022; 2:32-35. EDN GAVEVM. (rus.).
12. Leybman D., Khripko T. Quality assurance program of a nuclear facility. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:03015. DOI: 10.1051/e3sconf/20199703015
13. Khripko T.V. Research of application of information modeling technologies in the construction industry of KNR. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2021; 2:50-52. EDN OWZZEX. (rus.).
14. Khripko T. Mathematical modeling of failure of port control systems. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012101. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012101
15. Zhuravlev P., Bachus E., Markova I. Directions of modernization of systems for ensuring the quality of construction of nuclear power facilities. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:05039. DOI: 10.1051/mateconf/201825105039
16. Popkov A.G. Implementation of integrated logistics solutions of the corporation “Single Customer”: on the example of the construction industry. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2022; 12(5-1):324-328. DOI: 10.34670/AR.2022.65.75.026. EDN URUYR. (rus.).
17. Zhuravlev P., Bachus E., Markova I. Nomenclature of works and costs for ensuring the quality of construction products. Identification methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 661(1):012128. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012128
18. Yazhlev I.K., Popkov A.G., Belogurova O.A. Problems of regulatory support for the introduction of resource-and energy-saving technologies in urban development. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2020; 3(116):1000-1002. DOI: 10.34925/EIP.2020.116.3.212. EDN AJSLCW. (rus.).
19. Shumeyko N.M. Concepts of the construction cost estimate. *BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2018; 11(1011):42-45. EDN YMXDRJ. (rus.).
20. Klyuyev V.D., Zaitsev D.A., Zhuravlev P.A. Regulatory framework for cost estimation of capital repairs of apartment buildings. *Management of an Apartment Building*. 2015; 1. (rus.).
21. Zhuravlev P.A. Nomenclature of capital construction objects required for resource and technological modeling. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 7:52-57. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.52-57. EDN NVXALL. (rus.).
22. Popkov A.G. Staffing of construction production. New approaches to the formation, functioning, regulation. Technical Regulation. *Construction, Design and Surveys*. 2011; 8:29-33. (rus.).
23. Zhuravlev P. Engineering protection. Required changes in building regulations and regulations. *Russian Engineer*. 2022; 4(77):44-48. EDN NAFYWT. (rus.).
24. Zharov Ya.V. Building information modeling based on block-cluster structure. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2019; 11:10-14. EDN XTNWSE. (rus.).
25. Zharov Ya.V. Organizational technological design in construction based on an intelligent planning unit. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 6(77):193-199. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-193-199. EDN RQXZDJ. (rus.).
26. Kievskiy I.L., Argunov S.V., Zharov Ja.V., Yurgaitis A.Yu. Algorithmization of planning, management and information processing systems in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 11:14-24. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.14-24. EDN AGNCHY. (rus.).
27. Kochenkova E.M., Denisov A.V. Information modeling in solving environmental protection issues of construction facilities. *Actual problems of the construction industry and education – 2022 : collection of reports of the Third National Scientific Conference*. 2023; 583-587. EDN BYPLIE. (rus.).
28. Kochenkova E.M. Environmental protection. Features of information modeling at the stages of the high-rise building life cycle. *Construction — formation of the living environment : collection of materials of the seminar of young scientists of the XXV International Scientific Conference*. 2022; 115-120. EDN XSOQZK. (rus.).
29. Burenin V.S., Ezersky V.A., Monastirev P.V. Investigation of modern trends in the design of residential

buildings in Russia and abroad. *Architecture and Time*. 2017; 5:2. EDN YMXHRR. (rus.).

30. Silka D., Ermolaev E. Methodological aspects of the new model of building complex. *Online journal Naukovedenie*. 2014; 1(20):34. EDN QIGNGG. (rus.).

31. Simanovich V.M., Ermolaev E.E. Implementation of construction, reconstruction, capital repairs of a capital construction facility. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2018; 12:4-8. EDN WIDEBF. (rus.).

32. Ermolayev E.E. Foreign and domestic experience in the use of elements of engineering, outsourcing and outstaffing in the construction industry. *Rationing and Remuneration of Labor in Construction*. 2019; 4:49-67. EDN LNBLOC. (rus.).

33. Monastirev P.V., Evdokimtsev O.V., Gavrikov V.A., Zelenin G.V. Institute of Architecture, Construction and Transport in the problems of sustainable development of the region. *Sustainable development of the re-*

gion: architecture, construction and transport : materials of the VIII International Scientific and Practical Conference. 2021; 46-68. EDN UMONJC. (rus.).

34. Zakharov P.N., Matveev M.Yu., Khizhnyakov D.M. Analysis of approaches to assessing the level of innovation in the development of construction organizations. *Innovations in the sectors of the national economy, as a factor in solving socio-economic problems of our time : collection of reports and materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2014; 143-151. EDN TKNHQT. (rus.).

35. Korobko V.I., Kardanskaya N.L., Matveev M.Yu. Philosophical categories of development in management theory. *Innovations in the sectors of the national economy as a factor in solving socio-economic problems of our time : collection of reports and materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2014; 8-14. EDN TKNHEV. (rus.).

Received May 20, 2024.

Adopted in revised form on May 27, 2024.

Approved for publication on October 5, 2024.

B I O N O T E S : **Sergej B. Sborshchikov** — Doctor of Economics Sciences, Professor, Chief Researcher, Directorate of Scientific and Technical Projects and Expertise; 4, 1 Leninsky prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation; **Research Center of Construction**; 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; Head of the Department of Industrial Management; **National Research Technological University MISIS (NUST MISIS)**; ID RSCI: 431022; tous2004@mail.ru;

Natal'ya V. Lazareva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Project Manager; Directorate of Scientific and Technical Projects and Expertise; **Research Center of Construction**; 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; Associate Professor, Department of Industrial Management; **National Research Technological University MISIS (NUST MISIS)**; 4, 1 Leninsky prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation; ID RSCI: 808973; tous2004@mail.ru.

Contribution of the authors:

Sergej B. Sborshchikov — scientific guidance, research concept, methodology development, writing the source text, scientific editing, final conclusions.

Natal'ya V. Lazareva — processing of the material, conducting the study, revision of the text description of the results and formation of conclusions of the study.

The authors declare that there is no conflict of interest.



ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ СОБОЛЕВ

10.12.1934 – 18.01.2006

10 декабря 2024 года исполняется 90 лет со дня рождения профессора, доктора технических наук, академика Российской инженерной академии Дмитрия Николаевича Соболева.

Родился Дмитрий Николаевич 10 декабря 1934 года в Москве. Окончив в 1951 году школу, поступил на факультет «Промышленный транспорт» Московского инженерно-строительного института им. В.В. Куйбышева. Успешно окончил его в 1956 году, получив квалификацию «Инженер-строитель путей сообщения».

Наукой начал заниматься еще во время обучения на 2-м курсе, посещая кружок при кафедре строительной механики под руководством Р.Р. Матевосяна и В.Н. Пастушихина. К окончанию 4-го курса подготовил совместно с Э.Н. Кузнецовым и В.В. Петровым научную работу «К расчету непрямоугольных пластинок вариационным методом профессора В.З. Власова».

В 1956 году Д.Н. Соболев поступил в аспирантуру кафедры «Строительная механика». Его научным руководителем стал выдающийся ученый, член-корреспондент АН СССР, профессор Василий Захарович Власов. После скоропостижной кончины В.З. Власова в 1958 году руководство аспирантом принял на себя профессор, доктор технических наук В.Г. Рекач.

В 1959 году Д.Н. Соболев защитил кандидатскую диссертацию на тему «Применение вариационного метода В.З. Власова к расчету непрямоугольных пластинок», после чего был оставлен на кафедре «Строительная механика» в должности ассистента.

Не прерывая преподавательскую деятельность в МИСИ им. В.В. Куйбышева, в 1961 году Д.Н. Соболев начал работать в лаборатории «Расчет сооружений» ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Этой лабораторией в те годы руководил выдающийся ученый, профессор, доктор технических наук Алексей Руфович Ржаницын.

С 1962 года Д.Н. Соболев занимался разработкой методов расчета крупнопанельных зданий на неоднородном упругом основании. В 1963 году его исследования привели к созданию новой модели упругого основания, в котором коэффициент постели является гауссовской случайной функцией. Результаты этой работы были представлены на Втором Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике в 1964 году и опубликованы в 1965 году в первом номере журнала «Строительная механика и расчет сооружений». В дальнейшем это направление интенсивно развивалось как в трудах самого Д.Н. Соболева (докторская диссертация «Статистические модели упругого основания», 1973 год), так и в работах его многочисленных учеников. По этой тематике успешно прошла защита около 50 кандидатских и 6 докторских диссертаций.

В 1995 году Д.Н. Соболев был избран членом-корреспондентом Российской и Международной инженерных академий. В 1997 году он стал их действительным членом.

В памяти тех, кому посчастливилось быть знакомым с Дмитрием Николаевичем, он навсегда останется не только блестящим ученым, но и добрым и отзывчивым человеком, прекрасным товарищем.

Кафедра строительной и теоретической механики НИУ МГСУ

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество 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 (*a*, *b* и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

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 библиотечных 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 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия^{2...}

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 языке¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке² 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.

Biographies: **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.

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК 000000000000000000000000130

ОКТМО 45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2024 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги руб. коп.

Итого руб. коп. « » 20 г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mg-su.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mg-su.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmg-su.ru/>



