

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 18 Выпуск 3/2023
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 18. Выпуск 3
2023**

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

Сквозной номер 172

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 18. Issue 3
2023**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 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	29.03.2023.
Подписан в свет	31.03.2023.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 19,40. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 101	

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Милан Голицки, д-р (технические науки, строительные конструкции), 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 Емноло, д-р техн. наук, проф., зав. каф. сопротивления материалов, теории упругости и пластичности,

Варшавский технологический университет, инженерно-строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Анна Александровна Дядичева

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Александр Дмитриевич Федотов

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Юрий Андреевич Табунщиков, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, 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:	29.03.2023

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

Katarzyna 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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova* **Layout:** *Aleksandr D. Fedotov*

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Е.Е. Ибе, Г.Н. Шибеева, Д.Д. Гоголь, А.Д. Никитин

**Формирование пространственно-композиционного решения молодежного центра «Полярный»
путем реновации старой застройки города Абакана 325**

В.Л. Беляев

Оценка эффективности стандартизации комплексного развития территории: градостроительный аспект . . . 334

Т.Н. Колесникова, П.Э. Кузнецов

**Анализ архитектуры современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов
и тенденции их развития 346**

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

Э. Микерего, Т. Акимана, Ж.П. Гаторе

**Assessment on the structural impact of the slabs with joists used in the reinforced concrete structures in Burundi
(Оценка влияния плит перекрытия со встроенными пустотелыми кирпичами,
используемыми железобетонных зданиях в Бурунди) 358**

В.В. Надольский

**Оценка расчетного значения несущей способности стальных элементов,
проектируемых на основе численных моделей 367**

А.А.Василькин, Р.М. Ахметзянов

**Определение коэффициента закручивания высокопрочного болтокомплекта
для предварительного натяжения 379**

М.Ю. Трошин, А.В. Турков

**Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений
в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной 391**

А.Р. Туснин, М.В. Постарнак

Мембранные конструкции: опыт применения и перспективы развития 401

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

М.Ш. Саламанова, С.-А.Ю. Муртазаев

Факторы влияния на деформативные свойства тяжелых бетонов на щелочных цементах 416

Н.З.Т. Лам, С.В. Самченко, Т.В. Лам, В.А. Щвецова

Оптимизация пропорций композиционного вяжущего с комплексными добавками 427

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Е.А. Король, Е.Н. Дегаев

Динамика снижения производственного травматизма 438

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Д.Ю. Шерстнёв, И.А. Брянский, Ю.В. Брянская

Взаимодействие водного потока и подводных трубопроводных переходов 447

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Н.Н. Монаркин

**Обеспечение требуемого воздухообмена в помещениях
при использовании компактных регенеративных теплоутилизаторов 455**

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

П.П. Олейник, Л.А. Пахомова

**Modeling the residential buildings erection of large-sized blocks
(Моделирование возведения жилых зданий из крупногабаритных блоков) 463**

Требования к оформлению научной статьи 471

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Ekaterina E. Ibe, Galina N. Shibaeva, Dobroslav D. Gogol, Alexander D. Nikitin

Developing the spatial composition of the polar youth center by renovating an old building in the city of Abakan 325

Valerij L. Belyaev

Evaluating the standardization effectiveness of integrated area development: the urban planning aspect 334

Tatyana N. Kolesnikova, Pavel E. Kuznetsov

Analysis of architecture of modern multifunctional cultural and entertainment complexes and their development trends 346

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

Emmanuel Mikerego, Trésor Akimana, Jean Pierre Gatore

Assessment on the structural impact of the slabs with joists used in the reinforced concrete structures in Burundi. . . 358

Vitali V. Nadolski

Evaluating the design value of the bearing capacity of steel elements designed using numerical models 367

Andrey A. Vasilkin, Roman M. Akhmetzyanov

Identification of the torsion coefficient of bolts in slip-critical connections 379

Mikhail Yu. Troshin, Andrey V. Turkov

The effect of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in three-layer panels made of cross-laminated timber 391

Alexander R. Tusnin, Mikhail V. Postarnak

Membrane structures: application experience and development prospects 401

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Madina Sh. Salamanova, Said-Alvi Yu. Murtazaev

Factors that influence deformation properties of heavy concretes containing alkali-activated cements. 416

Nguyen Doan Tung Lam, Svetlana V. Samchenko, Tang Van Lam, Victoria A. Shvetsova

Optimization of proportions of a composite binder that has multi-component additives 427

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Elena A. Korol', Evgeniy N. Degaev

Dynamics of decline in industrial injuries 438

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Dmitry Yu. Sherstnev, Ilya A. Bryansky, Yuliya V. Bryanskaya

Features of laying underwater pipeline crossings 447

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Nikolay N. Monarkin

Maintenance of the required indoor air exchange rate by using compact regenerative heat exchangers 455

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Pavel P. Oleynik, Liliya A. Pakhomova

Modeling the residential buildings erection of large-sized blocks. 463

Requirements for research paper design 471

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 711.4.025

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.325-333

Формирование пространственно-композиционного решения молодежного центра «Полярный» путем реновации старой застройки города Абакана

Екатерина Евгеньевна Ибе, Галина Николаевна Шibaева,

Доброслав Дмитриевич Гоголь, Александр Дмитриевич Никитин

*Хакасский технический институт — филиал Сибирского федерального университета
(ХТИ — филиал СФУ); г. Абакан, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В большинстве городов РФ актуальным остается вопрос реновации объектов, не использующихся по назначению. В основном это заброшенные промышленные предприятия, недостроенные и законсервированные объекты. Как правило, многие из них находятся в черте города, имеют развитую инфраструктуру и подведенные инженерные коммуникации. Такие здания обладают огромным потенциалом для реновации, например, в молодежный центр, который станет шагом на пути реализации молодежной политики РФ.

Материалы и методы. Проведен поиск подходящего объекта в черте г. Абакана с соответствующими параметрами для реновации его в молодежный центр. Выполнены визуальный осмотр, анализ конструктивной системы здания, фотосъемка, эскизные чертежи объекта. Разработана архитектурная концепция в виде трехмерной модели с помощью программных комплексов ArchiCAD и Lumion.

Результаты. Создан архитектурный концепт молодежного центра «Полярный», основой для которого стало существующее недостроенное здание школы верховой езды в г. Абакане. В молодежном центре «Полярный» применены многие основные принципы экодизайна и экоустойчивого проектирования. В частности, использовались экологичные материалы, природные цветовые оттенки и др.

Выводы. Показано, что имеется возможность эффективного освоения территорий, занятых заброшенными, пустующими или недостроенными зданиями, путем их реновации. Это позволит сформировать благоприятную среду для жизнедеятельности настоящего и будущих поколений. С помощью принципов экоустойчивого проектирования можно создавать здания и сооружения, которые не будут терять своей актуальности на протяжении многих лет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экодизайн, реновация городских территорий, архитектурная концепция, молодежный центр, экоустойчивое проектирование, градостроительство, дизайн-проект

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ибе Е.Е., Шibaева Г.Н., Гоголь Д.Д., Никитин А.Д. Формирование пространственно-композиционного решения молодежного центра «Полярный» путем реновации старой застройки города Абакана // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 325–333. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.325-333

Автор, ответственный за переписку: Екатерина Евгеньевна Ибе, katerina.ibe@mail.ru.

Developing the spatial composition of the polar youth center by renovating an old building in the city of Abakan

Ekaterina E. Ibe, Galina N. Shibaeva, Dobroslav D. Gogol, Alexander D. Nikitin

*Khakass Technical Institute — branch of the Siberian Federal University (KhTI — branch of SibFU);
Abakan, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The renovation of construction facilities, which are not used as intended, remains highly relevant in most cities of Russia. Basically, these are abandoned industrial enterprises, unfinished and mothballed facilities. As a rule, many of them are located within city limits; they feature well-developed infrastructure, and they are connected to the mains. Such buildings have a huge renovation potential. For example, they can be converted into a youth center, which will be a big step towards the implementation of the youth policy of the Russian Federation.

Materials and methods. In the course of the study, a search was launched to find an appropriate facility in the city of Abakan. Parameters of this facility must make it suitable for conversion into a youth center. The visual inspection, analysis of the structural system of the building, photographs, and sketch drawings were made. The next step was to develop its architectural concept in the form of a three-dimensional model using ArchiCAD and Lumen software packages.

Results. The architectural concept of the Polar youth center was developed in the course of this research project. The unfinished building of a riding school in Abakan was at the heart of the concept. Many fundamental principles of environmentally friendly and sustainable design were applied to the Polar youth center. Corresponding design methods were applied together with environmentally friendly materials, natural color hues, etc.

Conclusions. This paper demonstrates a solution focused on the effective development of areas occupied by abandoned, empty and unfinished buildings by means of their renovation aimed at developing a friendly living environment for the present and future generations. The application of sustainable design principles will allow creating buildings and structures that will maintain relevance for many years to come.

KEYWORDS: environmentally friendly design, renovation of urban areas, architectural concept, youth center, environmentally sustainable design, urban planning, design project

FOR CITATION: Ibe E.E., Shibaeva G.N., Gogol D.D., Nikitin A.D. Developing the spatial composition of the polar youth center by renovating an old building in the city of Abakan. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):325-333. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.325-333 (rus.).

Corresponding author: Ekaterina E. Ibe, katerina.ibe@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Под реновацией в строительстве принято считать протекающий в существующем здании адаптационный процесс изменения функционального назначения этого здания с целью дальнейшего использования. Реновация заброшенных и недостроенных объектов является наиболее важной проблемой для многих городов нашей страны. Как правило, многие из этих зданий окружены жилой застройкой, имеют подведенные коммуникации и развитую инфраструктуру [1, 2]. Например, промышленные территории давно существуют в структурах городов и чаще всего располагаются в их центральной части, так как изначально именно производственная деятельность была основным градообразующим фактором [3, 4]. Такими объектами могут быть и недостроенные спортивные сооружения, склады, ангары и прочие сооружения. Простаивая, они не выполняют своих функций, но могли бы послужить и иным целям [5–8].

Ключевое направление градостроительной политики — обеспечение устойчивого развития территорий, а также формирование благоприятной среды для жизнедеятельности настоящего и будущих поколений [9].

На сегодняшний день государство оказывает всевозможную поддержку молодежи, регулярно проводятся фестивали, съезды, различные молодежные форумы. Формирование здоровой молодежи как физически, так духовно и психологически — основное направление деятельности молодежной политики РФ. Согласно Стратегии развития молодежи Российской Федерации на период до 2025 года планируется создание неформального и инклюзивного образования, организация наставничества и приобщения молодежи к профессиональной деятельности.

На региональном уровне, а именно в Республике Хакасия, с целью реализации государственной молодежной политики соответствующим Поста-

новлением¹ был создан Фонд «Молодежный центр стратегических инициатив и проектов».

В настоящее время наблюдаются увеличение информации, внедрение технологий в повседневную жизнь, отмечается дефицит живого общения. Проблема организации досуга молодежи становится все более актуальной в связи со снижением общего уровня культурного развития молодежи; ее асоциальности; распространением элементов упрощенной массовой культуры; недостаточным количеством учреждений, отвечающих требованиям современности [10].

В нашей стране активно набирает популярность новый вид досуговых учреждений — молодежные центры. В большинстве городов сегодня можно встретить множество старых заброшенных и недостроенных объектов или сооружений, которые не используются по своему назначению, а только портят архитектурный облик города. Однако в них кроется огромный потенциал для создания молодежных центров. Характерные черты таких объектов делают их ценными ресурсами для создания общественных пространств:

- конструктивные особенности: большепролетные помещения, высокие потолки, свобода планировки;
- преимущества расположения: транспортная доступность, развитая транспортная инфраструктура;
- уникальный индустриальный дизайн: конструкции и старое оборудование как артефакты уникального интерьера;
- подведенные инженерные коммуникации [11–13].

Цель исследования — формирование условий для экоустойчивого развития территорий Республики Хакасия на примере создания архитектурной концепции молодежного центра.

¹ О создании некоммерческой организации «Фонд “Молодежный центр стратегических инициатив и проектов”»: Постановление Правительства Республики Хакасия от 12.02.2013 № 60.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процесс разработки архитектурной концепции здания состоит из нескольких этапов.

Первый этап — поиск подходящего объекта в черте г. Абакана, обладающего следующими параметрами: большепролетные помещения, высокие потолки, свобода планировки, развитая транспортная инфраструктура. Необходимы визуальный осмотр, анализ конструктивной системы здания, фотосъемка, а также составление эскизных чертежей объекта.

Второй этап — создание архитектурной концепции в виде трехмерной модели с помощью программных комплексов ArchiCAD и Lumion.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор объекта

В ходе анализа большого количества существующих заброшенных или недостроенных объектов на территории Абакана для реализации государственной молодежной политики выбрано недостроенное здание школы верховой езды (рис. 1), каркас которого был возведен более 10 лет назад (рис. 2, 3). Этот объект находится в центре города по ул. Крылова возле действующего ипподрома. Здание выполнено из стальной рамной конструкции со следующими характеристиками:

- длина сооружения — 72 м;
- шаг колонн — 6 м;
- пролет здания — 30 м;
- высота сооружения — более 10 м.

Также конструкцией предусмотрено расположение светоаэрационных фонарей на кровле. Указанные параметры объекта делают его удобным для реновации в молодежный центр.

Экодизайн

Экоустойчивое развитие территорий подразумевает проектирование зданий и сооружений, отвечающих определенным требованиям. Такие объекты должны быть построены из материалов, не способных пагубно повлиять на здоровье людей и окружающую среду, другими словами, с использованием экодизайна.

Экодизайн — направление дизайна, уделяющее ключевое внимание защите окружающей среды на протяжении всего жизненного цикла (ЖЦ) здания [14–16]. В данном подходе (рис. 4), помимо простоты и удобства, особое внимание уделяется:

- потреблению ресурсов при изготовлении строительных материалов;
- использованию экологически чистых материалов. Как правило, это природные материалы, такие как дерево, камень, хлопок, экокожа, стекло, кирпич, лен и др.;



Рис. 1. Существующий каркас здания школы верховой езды в г. Абакане (фото авторов)

Fig. 1. The photo of the riding school building frame in Abakan (made by the authors)



Рис. 2. Конструкции каркаса здания школы верховой езды в г. Абакане (фото авторов)

Fig. 2. The photo of the frame structures of the riding school building in Abakan (made by the authors)



Рис. 3. Каркас здания школы верховой езды в г. Абакане с высоты (фото авторов)

Fig. 3. The photo of the frame of the riding school building in Abakan, made from a height (the photo is made by the authors)

- безопасности использования таких материалов, отсутствию вреда здоровью человека, сведению к минимуму выбросов, вибраций, шумов, излучения и т.п.;

- безопасности утилизации и переработки материалов, а также возможности повторного использования [17].

Характерными чертами этого стиля являются:

- цветовая гамма из природных цветовых оттенков бежевого, коричневого, зеленого, синего, песочного;

- максимум свободного пространства;

- большое количество естественного освещения.

В целом данный подход позволяет снизить пагубное воздействие здания или сооружения на среду, в которой проживает человек [18]. Созданные в этом стиле проекты становятся более ресурсо- и энергоэффективными. Это достигается с помощью использования современных технологий и оборудования,

энергоэффективных и экологических материалов, оказывающих минимальное воздействие на окружающую среду [19, 20].

Молодежный центр «Полярный»

В процессе работы создан архитектурный концепт молодежного центра «Полярный», за основу которого принято существующее недостроенное здание школы верховой езды в г. Абакане по ул. Крылова. В нем предлагается максимально задействовать внутренний объем здания. На первом этаже открытое пространство — второй свет, где можно проводить мероприятия, встречи, концерты, а также устраивать спортивные площадки. Также на первом этаже могут быть размещены помещения для коворкинга, видеостудия, студия звукозаписи, meeting room, киберкомната, медиа-центр, мастерская 3D-печати, фотостудия, арт-



Рис. 4. Блок-схема «Характерные черты экодизайна» (выполнена авторами)

Fig. 4. The block diagram showing the characteristic features of environmentally friendly design (the block diagram is made by the authors)

лаборатория. Второй этаж — антресоль с дополнительным рабочим пространством, наблюдательная площадка, кафе с фуд-кортом, а также помещения AR-студии, коворкинга и комнаты креатива. Сво-

бода планировки и переносные конструкции позволяют перестраивать помещения под различные нужды. Пример такой планировки представлен на рис. 5–7.

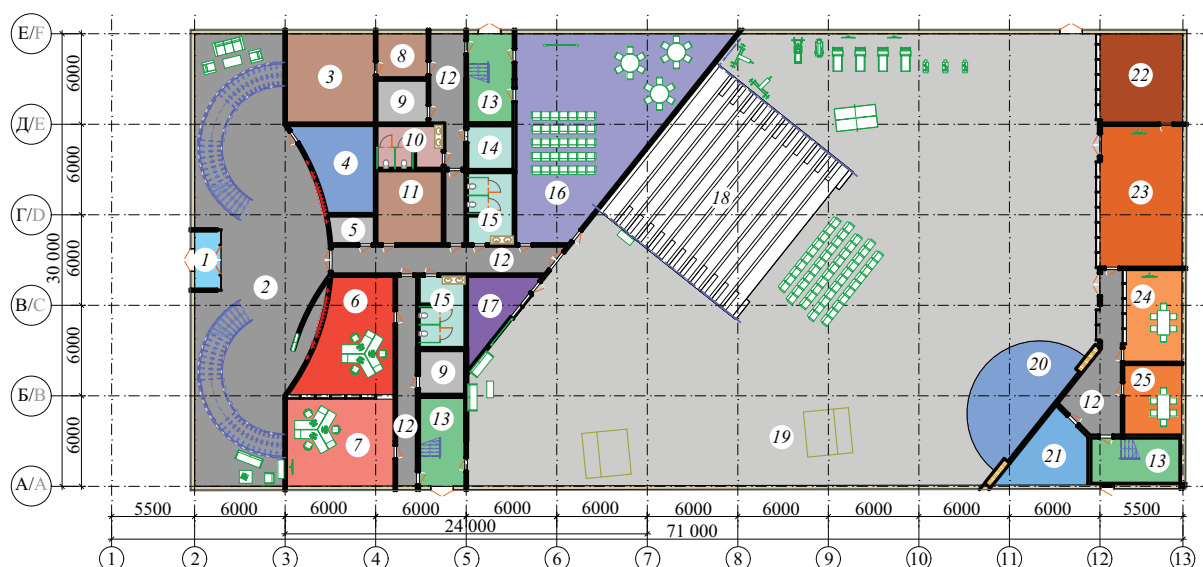


Рис. 5. Эскиз планировки первого этажа (выполнен авторами): 1 — тамбур; 2 — холл; 3 — кабинет директора; 4 — гардероб; 5 — комната охраны; 6 — студия звукозаписи; 7 — медиацентр; 8 — приемная; 9 — инженерная; 10 — с/у для персонала; 11 — кабинет администратора; 12 — коридор; 13 — лестничная клетка; 14 — КУИ; 15 — с/у; 16 — конференц-зал; 17 — зона коворкинга; 18 — разборная трибуна; 19 — зал событий; 20 — переносная сцена; 21 — гримерная; 22 — фотостудия; 23 — мастерская 3D-печати; 24 — арт-лаборатория; 25 — комната креатива

Fig. 5. The sketch of the layout of the ground floor (made by the authors): 1 — vestibule; 2 — hall; 3 — office of the director; 4 — cloakroom; 5 — security room; 6 — recording studio; 7 — media center; 8 — reception room; 9 — engineering room; 10 — staff bathroom; 11 — office of the administrator; 12 — hallway; 13 — stairwell; 14 — CER; 15 — w/c; 16 — meeting room; 17 — coworking area; 18 — portable grandstand; 19 — event hall; 20 — portable stage; 21 — dressing room; 22 — photo studio; 23 — 3D printing workshop; 24 — art laboratory; 25 — creative room

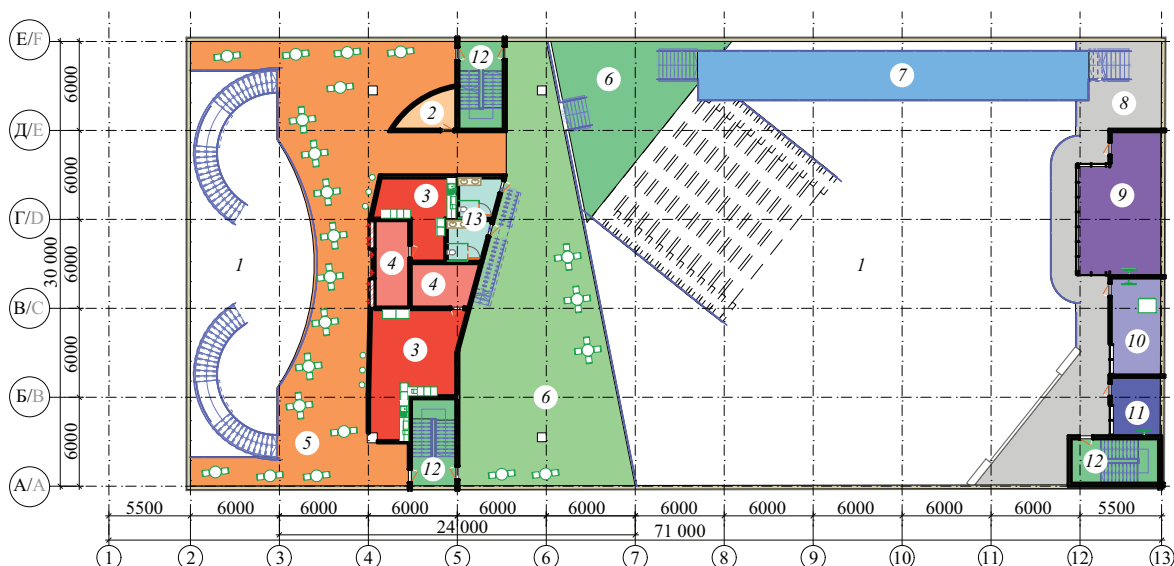


Рис. 6. Эскиз планировки второго этажа (выполнен авторами): 1 — второй свет; 2 — кофейня; 3 — кухня с зоной выдачи; 4 — помещение хранения; 5 — фуд-корт; 6 — рабочее пространство; 7 — антресоль; 8 — наблюдательная площадка; 9 — комната для кибертурниров; 10 — киберкомната; 11 — AR-студия; 12 — лестничная клетка; 13 — с/у

Fig. 6. The sketch of the layout of the first floor (made by the authors): 1 — the second light; 2 — coffee house; 3 — kitchen with delivery area; 4 — storage room; 5 — food court; 6 — workspace; 7 — mezzanine; 8 — observation deck; 9 — cyber tournament room; 10 — cyber room; 11 — AR-studio; 12 — stairwell; 13 — w/c

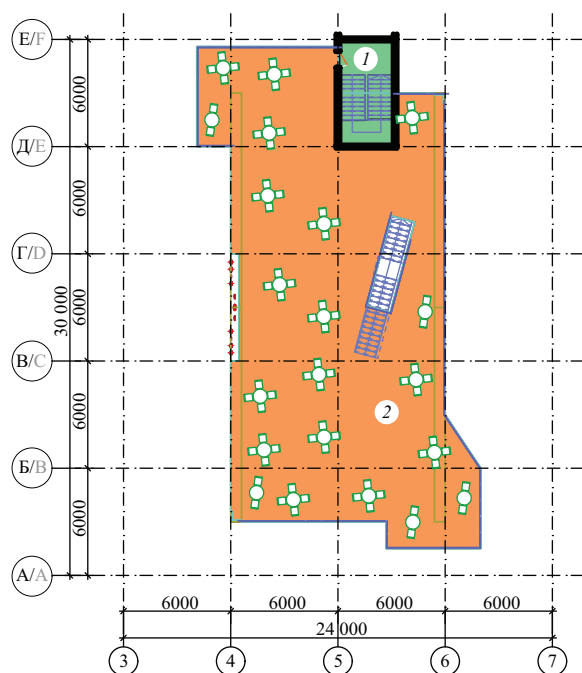


Рис. 7. Эскиз планировки третьего этажа (фуд-корт) (выполнен авторами): 1 — лестничная клетка; 2 — фуд-корт
Fig. 7. The sketch of the layout of the second floor (the food court, the sketch is made by the authors): 1 — stairwell; 2 — food court

В молодежном центре «Полярный» применены многие основные принципы экодизайна. В частности, большое количество естественного освещения и свободного пространства, свобода и гибкость

планировки. В проекте преобладают природные цветовые оттенки зеленого, бежевого, коричневого, песочного, черного (рис. 8, а-с).

Также в молодежном центре «Полярный» используются экологичные материалы. Полы изготовлены из паркетной доски, натурального камня и керамической плитки. Отделка внутренних стен — обои бумажные, шелковые, краски на водной основе. Последние также применяются для отделки потолков в помещениях. Во внутренней отделке можно встретить элементы дерева, металла, природного и искусственного камня [21].

Экстерьер здания выполнен по технологии «мокрого фасада» с помощью минеральной штукатурки, негорючей, стойкой к воздействию ультрафиолетовых лучей и развитию микроорганизмов [22].

Подобные (рис. 8, d, e) проекты реновации должны учитывать условия экоустойчивого проектирования. Основным и наиболее значимым недостатком данного подхода является его высокая стоимость. Однако такой курс проектирования даст возможность создавать дизайн-проекты, которые на многие годы вперед не потеряют всей актуальности. Эко-стиль с использованием природных цветовых оттенков, деревянных материалов, природных мотивов никогда не выйдет из моды. Здания в этом стиле будут выделяться из прочих существующих объектов городской застройки. При реновации объекта необходимо изначально применять те архитектурные методы, которые позволят добиться его современности на всех этапах ЖЦ.



a



b



c



d



е

Рис. 8. Архитектурная концепция молодежного центра «Полярный» (выполнена авторами)

Fig. 8. The architectural concept of the Polar youth center (made by the authors)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что сегодня, когда большинству городов РФ присуще такое явление, как пустующие промышленные здания, недостроенные объекты различного функционального назначения, имеется возможность эффективного освоения этих территорий путем реновации объектов, что позволяет сформировать благоприятную среду для жизнедеятельности настоящего и будущих поколений.

Применение принципов экоустойчивого проектирования даст возможность создавать здания и сооружения, которые не будут терять своей актуальности на протяжении многих лет.

Молодежные центры выполняют одну из наиболее важных задач в сфере культурного развития молодежи — организацию досуговой деятельности молодого поколения. Наиболее перспективным направлением в создании досуговых центров является разработка многофункциональных молодежных центров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гайдук А.Р. Реновация промышленных объектов и адаптация индустриальных зон городов к современным условиям (на примере г. Казань) // Известия КазГАСУ. 2016. № 4 (38). С. 83–88.
2. Ибе Е.Е., Абдываитова Д.М., Шибеева Г.Н. Реновация территории бывшего гидролизного завода в Республике Хакасия под жилую застройку // Вестник Евразийской науки. 2020. Т. 12. № 3.
3. Дубровина М.В. Основные методы реновации производственных территорий. Обоснование направления градостроительного использования территорий бывших производственных зон // Научный журнал. 2017. № 5 (18). С. 112–113.
4. Глухих А.А., Храпова Е.В. Опыт реновации промышленных зон на примере г. Москвы // Экономика сфера сервиса: проблемы и перспективы : мат. V Всерос. науч.-практ. конф. 2019. С. 15–18.
5. Котенко И.А., Токарева В.А. Реновация бывших промышленных территорий // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. № 3 (20). С. 47–52. DOI: 10.17673/Vestnik.2015.03.6
6. Буштыц Д.В., Забрускова М.Ю. Реновация бывших промышленных территорий и объектов срединной зоны в общественных пространствах // Известия КазГАСУ. 2018. № 2 (44). С. 47–55.
7. Дрозжжис Р.А. Реновация промышленных территорий // Вестник СибГИУ. 2015. № 1 (11). С. 84–86.
8. Ghosn F., Afify A., Mohsen H., Youssef M. Applying metamorphosis philosophy to revive the abandoned buildings // Architecture and Planning Journal. 2022. Vol. 28. Issue 1. DOI: 10.54729/SCYT9400
9. Тарута С.В., Донгак Ш.Х. Современные научно-теоретические подходы к определению понятия «реновация» // Экономика сферы сервиса: проблемы и перспективы : мат. V Всерос. науч.-практ. конф. 2019. С. 9–14.
10. Нагаева З.С., Мосякин Д.С. Актуальность создания системы молодежных центров // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 13 (65). С. 35–45.
11. Серегина А.А., Трибельская Е.Г. Приемы организации внутреннего пространства при реновации исторических индустриальных сооружений // Системные технологии. 2019. № 30. С. 138–146.
12. Трибельская Е.Г., Московцева А.М. Особенности реновации агропромышленных комплексов (на примере элеваторов) // Системные технологии. 2019. № 3 (32). С. 84–95.

13. Joja M. Temporary use of abandoned buildings // *Architecture Papers of the Faculty of Architecture and Design STU*. 2021. Vol. 26. Issue 3. Pp. 42–46. DOI: 10.2478/alfa-2021-0018

14. Тихомирова А.А., Бойко С.В. Использование экологически чистых материалов для строительства и отделки детских оздоровительных учреждений // *Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии*. 2015. С. 69–73

15. Pigosso D.C.A. Product ecodesign // *Life Cycle Engineering and Management of Products*. 2021. Pp. 169–204. DOI: 10.1007/978-3-030-78044-9_8

16. Mielniczek A., Roux C., Jacquino F. Toward enhanced ecodesign of urban project thanks to City Information Modelling // *SETAC 2022*. 2022.

17. Verlind G. Ecodesign for building materials and building construction // *Product Innovation and Eco-efficiency*. 1998. Pp. 213–223. DOI: 10.1007/978-94-015-8945-1_22

18. Belli F., Quella F. Ecodesign, design for reuse // *A Holistic View of Software and Hardware*

Reuse. 2021. Pp. 215–235. DOI: 10.1007/978-3-030-72261-6_7

19. Чембаров Е.А. Экодизайн как новое направление в дизайне // *Междисциплинарный диалог: современные тенденции в общественных, гуманитарных, естественных и технических науках*. 2014. № 1. С. 44–48.

20. Munaro M., Tavares S., Bragança L. The ecodesign methodologies to achieve buildings' deconstruction: A review and framework // *Sustainable Production and Consumption*. 2022. Vol. 30. Pp. 566–583. DOI: 10.1016/j.spc.2021.12.032

21. Кукарина Е.Е., Зорина М.А. Применение современных экологических материалов в отделочных работах // *Символ науки : Международный научный журнал*. 2018. № 7. С. 29–36.

22. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Характеристика современных материалов для облицовки фасадов и цоколей зданий и сооружений // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2020. № 4. С. 55–61.

Поступила в редакцию 10 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 14 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Екатерина Евгеньевна Ибе — кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и экономики; Хакасский технический институт — филиал Сибирского федерального университета (ХТИ — филиал СФУ); 655017, Республика Хакасия, г. Абакан, ул. Щетинкина, д. 27; РИНЦ ID: 649187, Scopus: 57205216978, ORCID: 0000-0002-3273-8160; katerina.ibe@mail.ru;

Галина Николаевна Шибеева — кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и экономики; Хакасский технический институт — филиал Сибирского федерального университета (ХТИ — филиал СФУ); 655017, Республика Хакасия, г. Абакан, ул. Щетинкина, д. 27; РИНЦ ID: 481067, Scopus: 57202799427; Shibaevagn@mail.ru;

Доброслав Дмитриевич Гоголь — студент; Хакасский технический институт — филиал Сибирского федерального университета (ХТИ — филиал СФУ); 655017, Республика Хакасия, г. Абакан, ул. Щетинкина, д. 27; SPIN-код: 9751-6622; boss.dobroslav@mail.ru;

Александр Дмитриевич Никитин — студент; Хакасский технический институт — филиал Сибирского федерального университета (ХТИ — филиал СФУ); 655017, Республика Хакасия, г. Абакан, ул. Щетинкина, д. 27; ORCID: 0000-0001-7035-2114; sasha010520@gmail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gaiduk A.R. Renovation of industrial facilities and adaptation of the industrial zones of the cities to modern conditions. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2016; 4(38):83-88. (rus.).

2. Ibe E.E., Abdivaitova D.M., Shibaeva G.N. Renovation of the hydrolysis factory territory in the Khakasia Republic for residential development. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020; 3(12). (rus.).

3. Dubrovina M.V. The main methods of renovation of production areas. Substantiation of the direction of urban planning use of the territories of former in-

dustrial zones. *Scientific Journal*. 2017; 5(18):112-113. (rus.).

4. Glukhikh A.A., Khrapova E.V. Experience in the renovation of industrial zones on the example of Moscow. *The Economy of the Service Sector: Problems and Prospects : Proceedings of the V All-Russian Scientific and Practical Conference Proceedings of the V All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2019; 15-18. (rus.).

5. Kotenko I.A., Tokareva V.A. Renovation of former industrial areas. *Vestnik of SSUACE. Town Planning*

and Architecture. 2015; 3(20):47-52. DOI: 10.17673/Vestnik.2015.03.6 (rus.).

6. Bustets D.V., Zabrskova M.Y. Renovation of former industrial territories and objects of the middle zone into public spaces. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018; 2(44):47-55. (rus.).

7. Drozhzhin R.A. Renovation of industrial areas. *Bulletin of SibGIU*. 2015; 1(11):84-86. (rus.).

8. Ghosn F., Afify A., Mohsen H., Youssef M. Applying metamorphosis philosophy to revive the abandoned buildings. *Architecture and Planning Journal*. 2022; 28(1). DOI: 10.54729/SCYT9400

9. Taruta S.V., Dongak Sh.Kh. Modern scientific and theoretical approaches to the definition of the concept of “renovation”. *The Economy of the Service Sector: Problems and Prospects : Proceedings of the V All-Russian Scientific and Practical Conference Proceedings of the V All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2019; 9-14. (rus.).

10. Nagaeva Z.S., Mosyakin D.S. The urgency of creating a system of youth centers. *Construction and Industrial Safety*. 2018; 13(65):35-45. (rus.).

11. Seregina A.A., Tribelskaya E.G. Features of the organization of internal space during the renovation of historical industrial buildings. *System Technologies*. 2019; 30:138-146. (rus.).

12. Tribelskaya E.G., Moskovtseva A.M. Features of renovation of agricultural complexes (on the example of elevators). *System Technologies*. 2019; 3(32):84-95. (rus.).

13. Joja M. Temporary use of abandoned buildings. *Architecture Papers of the Faculty of Architecture and Design STU*. 2021; 26(3):42-46. DOI: 10.2478/alfa-2021-0018

14. Tikhomirova A.A., Bojko S.V. The usage of environmentally friendly building materials the construction and decoration of children’s health institutions. *Proceedings of the Kostroma State Agricultural Academy*. 2015; 69-73. (rus.).

15. Pigosso D.C.A. Product ecodesign. *Life Cycle Engineering and Management of Products*. 2021; 169-204. DOI: 10.1007/978-3-030-78044-9_8

16. Mielniczek A., Roux C., Jacquino F. Toward enhanced ecodesign of urban project thanks to City Information Modelling. *SETAC 2022*. 2022.

17. Verlind G. Ecodesign for building materials and building construction. *Product Innovation and Eco-efficiency*. 1998; 213-223. DOI: 10.1007/978-94-015-8945-1_22

18. Belli F., Quella F. Ecodesign, design for reuse. *A Holistic View of Software and Hardware Reuse*. 2021; 215-235. DOI: 10.1007/978-3-030-72261-6_7

19. Chembarov E.A. Ecodesign as a new trend in design. *Interdisciplinary Dialogue: Current Trends in the Social, Humanitarian, Natural and Technical Sciences*. 2014; 1:44-48. (rus.).

20. Munaro M., Tavares S., Bragança L. The ecodesign methodologies to achieve buildings’ deconstruction: A review and framework. *Sustainable Production and Consumption*. 2022; 30:566-583. DOI: 10.1016/j.spc.2021.12.032

21. Kukarina E.E., Zorina M.A. The use of modern eco-friendly materials in finishing works. *Symbol of Science: International Scientific Journal*. 2018; 7:29-36. (rus.).

22. Pavlycheva E.A., Pikalov E.S. Characteristics of modern materials for cladding facades and socle of buildings and structures. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2020; 4:55-61. (rus.).

Received October 10, 2022.

Adopted in revised form on February 14, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

B I O N O T E S : **Ekaterina E. Ibe** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction and Economics; **Khakass Technical Institute — branch of the Siberian Federal University (KhTI — branch of SibFU)**; 27 Shchetinkina st., Abakan, 655017; Russian Federation; ID RSCI: 649187, Scopus: 57205216978, ORCID: 0000-0002-3273-8160; katerina.ibe@mail.ru;

Galina N. Shibaeva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction and Economics; **Khakass Technical Institute — branch of the Siberian Federal University (KhTI — branch of SibFU)**; 27 Shchetinkina st., Abakan, 655017; Russian Federation; ID RSCI: 481067, Scopus: 57202799427; Shibaevagn@mail.ru;

Dobroslov D. Gogol — student; **Khakass Technical Institute — branch of the Siberian Federal University (KhTI — branch of SibFU)**; 27 Shchetinkina st., Abakan, 655017; Russian Federation; SPIN-code: 9751-6622; boss.dobroslov@mail.ru;

Alexander D. Nikitin — student; **Khakass Technical Institute — branch of the Siberian Federal University (KhTI — branch of SibFU)**; 27 Shchetinkina st., Abakan, 655017; Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7035-2114; sasha010520@gmail.ru.

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

Оценка эффективности стандартизации комплексного развития территории: градостроительный аспект

Валерий Львович Беляев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Успешное практическое внедрение новой модели комплексного развития территории (КРТ) во многом определяется эффективностью национальной системы стандартизации, причем именно применительно к планировочному аспекту. Данному предмету и аспекту посвящено авторское исследование, результаты которого изложены в статье (системно такое исследование выполнено впервые). Цель работы состояла в оценке целесообразности разработки отдельного блока документов по стандартизации, касающихся КРТ в условиях перманентного развития указанной модели и наличия системно-структурных проблем, касающихся «планировочного» блока стандартизации.

Материалы и методы. Осуществлен поиск и критический обзор основных предметных научных публикаций, а также анализ сводов правил в сфере градостроительства и их проектов. Детально рассмотрены четыре проекта СП, разработанные в качестве попытки повышения методического статуса Стандарта комплексного развития территорий. Анализ выполнялся на предмет соответствия нормам предметного законодательства и требованиям основополагающего ГОСТ Р 1.6–2013.

Результаты. Отмечены недостатки механизма КРТ, а также системные дефекты в исследуемой сфере стандартизации. Они касаются как слабой ориентации действующих СП на реализацию механизма КРТ, так и несоответствия четырех проектов «предметных» сводов правил установленным нормам и требованиям разработки СП. Показано, что выявленные недостатки во многом обусловлены слабой эффективностью государственного управления в исследуемой сфере.

Выводы. Подтверждена нецелесообразность разработки документов по стандартизации в сфере КРТ вне понимания их места и роли в системе таких документов, отнесенных к блоку «Градостроительство». Как альтернативный вариант предложены пути к построению перспективного комплекса нормативных технических документов блока «Градостроительство», а также к имплементации Стандарта комплексного развития территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: градостроительство, комплексное развитие территории, оценка, дефекты, эффективность стандартизации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Беляев В.Л. Оценка эффективности стандартизации комплексного развития территории: градостроительный аспект // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 334–345. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.334-345

Автор, ответственный за переписку: Валерий Львович Беляев, belyaevvl@mgsu.ru, vbelyaev2011@mail.ru.

Evaluating the standardization effectiveness of integrated area development: the urban planning aspect

Valerij L. Belyaev

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

ABSTRACT

Introduction. Successful practical implementation of a new model of integrated area development is largely determined by the effectiveness of the national standardization system in terms of its planning aspect. The author's research is focused on this subject and aspect, and research results are presented in the article (this is the first consistent description of this research project). The purpose of the research project is to assess the feasibility of drafting an independent set of standardization documents on integrated area development in conditions of the ongoing development of the model itself and amid systemic and structural problems in the "planning"-related set of standardization documents.

Materials and methods. Principal research publications were identified and reviewed; Codes of urban planning rules and respective projects were analyzed. Four draft Construction Regulations were considered in more detail. These draft documents were an attempt to improve the methodological status of the Standard of Integrated Area Development. The analysis was focused on compliance with the norms of the legislation and requirements of fundamental GOST R 1.6–2013.

Results. In the course of the analysis, weaknesses of the integrated area development mechanism and systemic standardization defects were identified. They deal with the insufficient focus of the current Codes of Rules on the implementation

of the mechanism of integrated area development, and the inconsistency of four draft “subject-oriented” Codes of Rules with current norms and requirements for the development of Codes of Rules. It is shown that the weaknesses, thus identified, are largely due to the insufficient efficiency of public administration in the studied area.

Conclusions. The authors proved the inexpedience of developing standardization documents on integrated area development without understanding their position and role in the system of documents included into the Urban Planning set. As an alternative, methods of drafting a promising set of technical regulations on Urban Planning, and the implementation of the Standard of Integrated Area Development are proposed.

KEYWORDS: urban planning, integrated area development, evaluation, defects, standardization efficiency

FOR CITATION: Belyaev V.L. Evaluating the standardization effectiveness of integrated area development: the urban planning aspect. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):334-345. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.334-345 (rus.).

Corresponding author: Valerij L. Belyaev, belyaevvl@mgsu.ru, vbelyaev2011@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Национальная модель комплексного развития территории (КРТ) рассматривается как современный и радикальный инструмент деvelopeмента в сфере пространственного развития. Она введена относительно недавно путем внесения изменений и дополнений в Градостроительный кодекс Российской Федерации (глава 10 ГрК РФ). Процесс обсуждения и согласования соответствующего законопроекта № 1023225-7 (принят в итоге как Федеральный закон от 30.12.2020 № 494-ФЗ), в том числе в профильном Комитете Госдумы РФ, проходил при наличии существенных замечаний оппонентов¹. Отмечались дефекты концептуального характера, касающиеся обоснования выбора границ территорий, выбираемых для КРТ; снижения уровня гарантий для застройщиков; степени защиты имущественных (прежде всего — жилищных) прав участников КРТ и иных заинтересованных лиц; сокращения полномочий местного самоуправления и др. Механизм КРТ виделся экспертам излишне усложненным, требующим принятия дополнительных и конкретных мер переходного периода.

Острота вопроса ожидаема, она в целом объективно обусловлена спецификой принятия соответствующих градостроительных решений, отражающих различные технические, технологические, социальные, экологические, экономические аспекты и особенности развития городских территорий и застройки [1]. В рассматриваемом случае такая острота связана с многоаспектностью предмета и предложенного инструментария правового регулирования (затрагиваются не только градостроительные, но также гражданские, земельные, жилищные и иные отношения) и его новизной. Многочисленные поправки в законопроект свидетельствуют как о компромиссном характере итогового решения, так и о недостаточном уровне пер-

воначальной проработки, степени научной и иной обоснованности правовой модели. На это указывает и продолжающаяся критика отдельных аспектов механизма КРТ. В частности, авторы ГрК РФ указывают на концептуальные отступления от духа и буквы Кодекса в части нивелирования таких основополагающих инструментов как территориальное планирование и градостроительное зонирование, а также на недостатки в части, касающейся планировки территории [2].

Эти и иные «болезни» нового института КРТ в определенной степени унаследованы от прежних моделей девелоперского характера, в разное время введенных в состав ГрК РФ (развитие застроенных территорий, комплексное развитие и комплексное освоение территорий). Они не получили должного развития и применения (отсутствие детализации правового регулирования и поддержки в части стандартизации), поэтому по итогам обобщения практики были заменены механизмом КРТ путем принятия закона № 494-ФЗ.

Учитывался при этом и опыт реновации жилых территорий [3], которая в силу специального закона осуществлялась только в г. Москве². Однако по своему механизму (в том числе в правовом отношении) ее проведение также не было лишено серьезных недостатков [3, 4]. Стоит отметить и ряд проблем, возникающих при попытках расширения как спектра, так и аспектов реновации, например, посредством дополнительного включения сегмента промышленных территорий [5, 6] и внедрения стандартов «зеленого» строительства³ [7, 8].

Схожесть механизмов КРТ и реновации имеется, закон № 494-ФЗ иногда даже называют «законом о российской реновации». Прямая аналогия в данном

² О статусе столицы Российской Федерации : Закон Российской Федерации от 15.04.1993 № 4802-1. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_3356/

³ Такие попытки, безусловно, актуальны, хотя в части внедрения стандартов зеленого строительства не выглядят бесспорными с позиций как текущих тактических соображений, так и с точки зрения статуса таких стандартов. URL: <https://urban.hse.ru/mirror/pubs/share/790420326.pdf?ysclid=lamnflhr4y92985438>

¹ Автор принимал участие в обсуждениях законопроекта, являясь экспертом Комитета Государственной Думы по транспорту и строительству (членом секции «Архитектура и градостроительство. Основы правового регулирования» Экспертного совета данного Комитета).

случае, правда, не вполне корректна, так как закон № 494-ФЗ предусматривает более широкий спектр видов КРТ, включающий развитие как жилой, так и нежилой застроенной территории, а также пространственное развитие незастроенной территории. Кроме того, сейчас в ч. 1 ст. 65 ГрК РФ выделяется еще случай запуска механизма КРТ по инициативе правообладателей земельных участков и (или) правообладателей объектов недвижимости.

Несмотря на ряд так и не устраненных недостатков (наиболее полно такие правовые дефекты исследованы в работах С.И. Шульженко [9–11]), закон № 494-ФЗ был принят, причем в кратчайшие сроки, что, по-видимому, в определенной степени связано со стремлением выполнить поставленные Президентом РФ стратегические задачи по выходу на заданный уровень ежегодного объема вводимого жилья (120 млн м²). Осознавая несовершенство закона № 494-ФЗ и призывая к необходимости «системного решения поднятого вопроса», Минстрой России как уполномоченное ведомство подготовил новый законопроект о совершенствовании механизма КРТ, впрочем, направленный только на обеспечение баланса прав и обязанностей участников КРТ⁴.

Если говорить о сути механизма КРТ, то речь в законе № 494-ФЗ идет не только о редевелопменте, но также и о применении механизма государственного (муниципального) частного партнерства (ГЧП). Публичный участник при этом вкладывается не только традиционным номинально-административным участием (содействие, создание «необходимых условий», утверждение документов и т.п.), он еще осуществляет финансовое участие через реализацию инструментов инфраструктурного меню⁵. В то же время применение модели ГЧП, тем более в сфере пространственного развития, все еще находится в стадии становления и не обеспечено должным уровнем правового регулирования. Иллюстрацией актуальности темы служит, например, поиск возможного использования механизма КРТ в направлении выработки «доверительной формы партнерства участников градостроительной деятельности» для привлечения внебюджетных средств при сохранении исторического наследия⁶ [12]. Такая ситуация характерна и в целом для девелоперской деятельности, которая также не обеспечена совре-

менной нормативной правовой базой (пробелы, начиная с отсутствия закрепления базового понятийного аппарата и др. [13]).

За исключением применения отдельных элементов градостроительного зонирования в составе правил землепользования и застройки (ПЗЗ) (обозначение границ территории КРТ, предельных параметров инфраструктурной обеспеченности и доступности), основной градостроительный инструмент КРТ — планировка территории, подготовка документации которой в данном случае согласно ГрК РФ является обязательной. Такая подготовка в отличие от ПЗЗ рассматривается как традиционный способ реализации соответствующих документов территориального планирования (вспомним практику советского периода по разработке проектов детальной планировки и проектов застройки территории). Несмотря на это и институт планировки территории нельзя считать совершенным, в том числе в силу очевидной тенденции придания несвойственной ему нагрузки по определению правового режима создаваемых или развиваемых объектов недвижимости [2, 14–16].

Переходя непосредственно к исследуемой теме строительного нормирования (стандартизации), отметим, что современная ситуация в данной сфере также характеризуется рядом нерешенных проблем, раскрытых, например, в авторской статье [17]. В 2022 г. осуществлен резкий поворот в сторону добровольности практического применения требований сводов правил СП и иных документов по стандартизации, рассматриваемых как инструмент оценки соответствия законодательно установленным требованиям безопасности. Однако, невзирая на прогрессивность тенденции добровольности в стандартизации, такой резкий поворот, на наш взгляд, не выглядит достаточно обоснованным⁷.

Наиболее тяжелым остается положение дел в сфере стандартизации применительно к градостроительному (планировочному) уровню. Следует подчеркнуть объективную сложность данной сферы, связанную с ее многоаспектностью и социальным характером [1], дефицитом и (или) размытостью нормативно установленных требований планировочной безопасности. При этом Минстрой России как разработчик СП вместе с уполномоченным им

⁴ О внесении изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации : проект Федерального закона. URL: <https://regulation.gov.ru/projects#npa=132555>

⁵ Использование инструментов «инфраструктурного меню» в развитии регионов : Минстрой России. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/ispolzovanie-instrumentov-infrastruktornogo-menyu-v-razviti-regionov/>

⁶ Механизм КРТ можно использовать при сохранении исторического наследия. URL: <https://vladimir-resin.ru/8261>

⁷ Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», и о признании утратившим силу постановления Правительства Российской Федерации от 04.07.2020 № 985 : Постановление Правительства РФ от 28.05.2021 № 815 (ред. от 20.05.2022). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_385390/

подведомственным учреждением⁸ далеко не всегда учитывает эти и иные особенности стандартизации планировочного уровня, продолжая унифицировано рассматривать ее только в рамках строительного (технического) нормирования. Продолжается и практика игнорирования нормативно установленного требования о том, что документы по стандартизации должны соответствовать нормам законодательства. Это обстоятельство обуславливает целесообразность отражения в статье результатов анализа соответствующих нормативных правовых актов (НПА).

Показательно, что на федеральном уровне практически прекращено выполнение прикладных научно-исследовательских работ (НИР) по этой теме. В то же время результаты такой НИР, проведенной в 2016 г., выявили критическую ситуацию в части стандартизации в планировочном сегменте с обоснованием варианта выхода из нее с помощью изменения структуры и характера (обособления, автономизации) данного сегмента системы документов по стандартизации⁹. Кризисная ситуация нашла подтверждение и в ходе деятельности экспертного подкомитета 9 «Градостроительство» ТК 465 «Строительство» (ПК 9). Для ее исправления в 2019 г. был направлен доклад от подкомитета в адрес руководства Минстроя России с соответствующими предложениями¹⁰.

Следует признать, что в силу дефицита исследований и в условиях специфики национальной системы стандартизации применительно к планировочной сфере, по сути, отсутствуют современные научные публикации по данной теме. Исключением, по-видимому, являются отдельные статьи специалистов НИУ МГСУ, включая статьи автора [17–20]. Вследствие такого своеобразия работы зарубежных исследователей вряд ли можно считать референтными, поскольку за рубежом, как правило, упор сделан на локальный (объектный) уровень строительного нормирования, а требования планировочного характера устанавливаются НПА, причем обычно принимаемыми на муниципальном

уровне. За единичным исключением [21] не выявлены такие публикации и применительно к исследуемой теме стандартизации, касающейся рамок КРТ, что дополнительно подчеркивает как ее новизну, так и актуальность разработки. Что касается актуальности института КРТ, то она подтверждена, например, составом Стратегии развития строительной отрасли, одобренной в конце октября 2022 г. Правительством РФ (использование проектов КРТ как механизма расселения аварийного жилья и т.д.)¹¹. В организационно-управленческом плане об актуальности КРТ свидетельствует образование в 2021 г. в составе Минстроя России нового специализированного Департамента КРТ¹². В Департаменте пока сосредоточено внимание на практических аспектах модели «инфраструктурного меню», хотя его основной задачей является выработка предложений по реализации государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере КРТ. Не наблюдается в настоящее время его координация со смежным Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры, который отвечает за развитие НПА и нормативно-технических документов (НТД) в сфере градостроительной деятельности.

Проведенный предварительный анализ подчеркивает актуальность и новизну исследуемых вопросов. В то же время он позволяет (в качестве рабочей гипотезы) предположить не достаточную целесообразность разработки документов по стандартизации блока «Градостроительство», область применения которых декларируется как КРТ, до момента системного устранения дефектов в составе соответствующих НПА и до реформатирования структуры документов по стандартизации в области градостроительного проектирования. Цель работы состоит в подтверждении такого предположения путем детализации анализа действующих СП, а также проектов СП, касающихся КРТ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предмет исследования — оценка эффективности стандартизации (документов по стандартизации) в сфере градостроительства применительно к аспекту задач КРТ. Учитывая то, что такие документы по стандартизации в настоящее время принимаются исключительно в формате сводов правил¹³, из состава реестра СП выделен перечень СП,

⁸ Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве (ФАУ ФЦС). URL: <https://www.faufcc.ru/?ysclid=19vflad9qe953816285>

⁹ Работы по мониторингу и анализу действующих нормативных технических документов в строительстве и подготовке предложений по перспективному составу комплекса нормативных технических документов в области градостроительства и территориального планирования выполнены в 2016 г. в соответствии с договором от 11.08.2016 между АО «НИЦ “Строительство”» и ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» (ответственный исполнитель директор ООО «Институт “Теринформ”» М.В. Дорофеев при участии автора настоящей статьи).

¹⁰ Доклад инициирован и составлен М.В. Дорофеевым (секретарь, а позднее руководитель ПК9) при участии автора (член ПК9, а позднее его секретарь).

¹¹ Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года : Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2022 № 3268-р.

¹² Департамент комплексного развития территорий. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/about/d/departament-kompleksnogo-razvitiya-territoriy/>

¹³ В отмеченном выше докладе ПК 9 предложена принципиально иная структура таких документов с акцентом на формат ГОСТ.

касающихся сферы градостроительства. Путем критического обзора данных СП были отобраны и детально рассмотрены те документы, которые содержат или должны содержать предметные требования в части КРТ.

Аналогичным образом по данным официальных открытых источников (сайты Росстандарта, Минстроя России, ФАУ ФЦС) отобраны и рассмотрены проекты новых СП или проекты внесения изменений в действующие СП. Использованы также материалы, поступившие на экспертизу в Технический комитет по стандартизации 507 «Градостроительство» (ТК 507), созданный в июне 2022 г.¹⁴ Более детально проанализированы те разработки, которые непосредственно касаются КРТ. Рассмотрение выборки документов и их проектов осуществлялось с помощью методов научного познания (элементы индукции, дедукции, анализа) с опорой на требования основополагающих (базовых) ГОСТ. По результатам обобщения итогов оценок и анализа сделан вывод о недостаточной эффективности стандартизации в сфере градостроительства применительно к задачам КРТ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прежде всего, необходимо определиться с понятиями, включенными в предмет исследования, основные из них раскрыты в статье автора [18]. В условиях отсутствия закрепления в составе ГрК РФ термина «градостроительство» под ним по совокупности признаков целесообразно понимать сегмент градостроительной деятельности, включающий территориальное планирование, градостроительное зонирование и планировку территории. Часто в профессиональной терминологии, а иногда и в региональном законодательстве «градостроительство» отождествляется с понятием «градостроительное проектирование». По объему понятий это, на наш взгляд, некорректно применительно к градостроительному (территориальному) зонированию, являющему собой деятельность сугубо правового характера (не случайно в первой редакции ГрК РФ, принятой в 1998 г., эта деятельность справедливо обозначалась как правовое зонирование¹⁵) и по этой причине объективно выводимого из сферы технического регулирования (строительного нормирования). Кроме того, в силу своего предмета и структуры территориальное планирование тяготеет именно к планированию (прежде всего, на федеральном и региональном уровне), а не к проектированию.

Что касается понятий «стандартизация» и «комплексное развитие территорий», то они раскрыты и закреплены законодательно. Стандартизация, согласно соответствующему Закону (162-ФЗ), это деятельность в части разработки и применения документов по стандартизации (ДС) и иная деятельность для упорядоченности в отношении объектов стандартизации¹⁶. КРТ в ГрК РФ определяется как совокупность мероприятий, выполняемых в соответствии с утвержденной документацией по планировке территории (ДПТ) и направленных на создание благоприятных условий проживания граждан, обновление среды жизнедеятельности и территорий общего пользования поселений, городских округов. Такое понимание, в частности, подтверждает, что основным градостроительным инструментом КРТ является планировка территории.

В состав раздела 30 «Градостроительство» Реестра сводов правил входит 15 СП, которые ранее проанализированы автором с позиций полноты и качества требований градостроительного характера с выполнением их целевой структурной группировки [18]. К первой группе отнесены СП, которые по определению не имеют отношения ни к объекту, ни к аспекту стандартизации (нормирования) сферы градостроительства, либо такое отношение выглядит сомнительным (СП 18 и СП 19 соответственно о проектировании промышленных и сельскохозяйственных объектов; СП 323, СП 348 о проектировании соответственно наружного освещения, промышленных парков и промышленных кластеров). В то же время, если рассматривать их с позиций КРТ, следует отметить, что модель КРТ согласно ГрК РФ распространяется на неэффективно используемые как жилые, так и иные территории, и в первую очередь промышленные. В этом отношении применительно к развитию территории крупных земельных участков производственных объектов в рамках КРТ в состав СП 18 и СП 348 могут быть включены отдельные требования на этот счет, впрочем, данный вопрос требует дополнительного исследования. Стоит рассмотреть включение аналогичных требований в состав СП 19 (см. ниже), а также в состав СП 53 о проектировании садоводческих товариществ, имея в виду, что механизм КРТ, а следовательно, и обязательность подготовки ДПТ, предполагается распространить и на территории товариществ (в случае реализации такой законодательной инициативы)¹⁷. Что касается СП второй группы, то номинально они содержат в своих наименованиях термин «Правила градостроитель-

¹⁴ Автор является полномочным представителем НИУ МГСУ как члена ТК 507. URL: <https://eipp.ru/office/tkgrad.html>

¹⁵ Градостроительный кодекс Российской Федерации : от 07.05.1998 № 73-ФЗ (ред. от 31.12.2005). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_18685/?ysclid=lao0se8fb152595045

¹⁶ О стандартизации в Российской Федерации : Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ (последняя редакция). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_181810/

¹⁷ URL: <https://rspp.ru/events/news/komissiya-rspp-sformirov-ala-predlozheniya-po-sovershenstvovaniyu-zakonodatelstva-v-sfere-krt--6368cd92944df/>

ного проектирования» (СП 398 «Набережные...», СП 401 по высотным зданиям и комплексам, СП 475 «Парки...»). Однако в настоящее время территории данных объектов не подлежат развитию по механизму КРТ и далее не рассматриваются.

Третья группа СП, касающихся благоустройства территорий, находится на стадии формирования и включает предметный СП 82. К ней можно отнести и СП 475 (в части благоустройства территории парков), а также СП 476 по правилам планировки, застройки и благоустройства жилых микрорайонов. Очевидно, что закон № 494-ФЗ ориентирован на редевелопмент именно жилых территорий, в этой связи СП 476 рассмотрен далее дополнительно. Разделы СП 476 по благоустройству и СП 82 не рассматриваются, учитывая, что благоустройство согласно ГрК РФ формально не отнесено к сфере градостроительства непосредственно, и данную группу СП в перспективе следует структурно вычленивать автономно [17].

Четвертая группа содержит СП планировочного характера, в первую очередь в нее входит основной (базовый) СП 42 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений», исторически содержащий и требования для локального уровня. СП 42 представляет собой актуализацию «планировочного» СНиП, разработанного в советский период. Кроме того, в эту группу может быть включен СП 476 и СП 396 по градостроительному проектированию улиц и дорог населенных пунктов.

По своей сути СП 42 должен быть, прежде всего, сориентирован на уровень планировки территории, однако четкой «привязки» нормативно-технических требований и рекомендаций к конкретным видам ДПТ и их составным частям он до сих пор не содержит, несмотря на такие рекомендации экспертов и внесение в СП 42 целого ряда различных изменений. Отсутствует в СП 42 достаточное количество и качество требований применительно к КРТ. Лишь в 2022 г. предпринята такая попытка, а именно Изменением № 3 к СП 42 включено номинальное требование (п. 7.7) о необходимости выполнения КРТ на основе закона № 494-ФЗ, а также на основе требований самого СП 42 с учетом конкретизации в региональных нормативах градостроительного проектирования (РНГП). Однако в СП 42 отсутствуют специальные требования применительно к условиям КРТ за исключением допущения об увеличении плотности жилой и общественно-деловой застройки при КРТ (табл. Б. 1). При этом параметры такого снижения должным образом не обоснованы, на что указывалось при прохождении экспертизы Изменения № 3 к СП 42 в рамках ПК 9 [18]. Отмечалось, что состав СП 42 содержит ряд разделов и пунктов, не касающихся градопроектирования (их содержат также СП 476 и СП 396, разработка которых велась на базе СП 42). В целом же данный свод

правил большинством экспертов ПК 9 и все чаще профессиональным цехом признается дефектным, исчерпавшим свой потенциал и поэтому малоперспективным для дальнейшего развития. В качестве альтернативы предлагается декомпозиция СП 42, которая может стать основой новой структуры и состава ДС в сфере градостроительства [17, 18].

Из числа проектов новых СП следует выделить четыре проекта, заявленная область применения которых непосредственно касается КРТ. Это проекты СП «Градостроительство. Комплексное развитие территорий. Общие положения построения моделей городской среды», СП «Градостроительство. Комплексное развитие территорий. Малоэтажная модель городской среды», СП «Градостроительство. Комплексное развитие территорий. Среднеэтажная модель городской среды», СП «Градостроительство. Комплексное развитие территорий. Центральная модель городской среды». Подготовка проектов данных СП была дополнительно включена в План Минстроя России по разработке (актуализации) СП на 2022 г. за счет внебюджетных средств «Фонд ДОМ. РФ» и выполнена силами АО «ЦНИИПромзданий» при участии «Фонд ДОМ. РФ», ФАУ ФЦС и других¹⁸.

В составе иных плановых разработок, кроме отмеченных четырех новых СП, экспертами ТК 507 также рассмотрены в 2022 г. проекты Изменения № 1 к СП 19, СП 53, СП 475, СП 476, некоторые из которых объективно должны касаться модели КТР в части подготовки ДПТ. В то же время, как показал анализ, в составе проектов таких изменений, а также в составе перечисленных СП (с учетом внесенных в них изменений) требования в части подготовки ДПТ либо отсутствуют (проектом Изменения № 1 к СП 19 предложено упразднить упоминание о ДПТ (п. 4.1)), либо раскрыты недостаточно, не отвечая в полной мере нормам ГрК РФ (СП 53, СП 475), соответственно отсутствуют в них и специальные требования в контексте КРТ. Дефицит таких требований в какой-то мере оправдан, учитывая установленную отраслевым законодательством факультативность подготовки проекта планировки территории в случае развития территории садоводческих товариществ¹⁹. Однако при внедрении модели КРТ такая факультативность пропадает.

¹⁸ О внесении изменений в План разработки и утверждения сводов правил и актуализации ранее утвержденных строительных норм и правил, сводов правил на 2021 г., утвержденный приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 01.03.2021 № 99/пр : Приказ Минстроя России от 19.04.2021 № 236/пр. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_390732/#dst100005

¹⁹ О ведении гражданами садоводства и огородничества для собственных нужд и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 29.07.2017 № 217-ФЗ (последняя редакция). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_221173/

Показательно, что не содержит таких требований и СП 476, тогда как он с позиций закона № 494-ФЗ является «ключевым» для КРТ. В этом отношении его состав целесообразно дополнить, например, требованиями, связанными с обоснованием соответствия планируемых параметров, местоположения и назначения объектов регионального и местного значения расчетным показателям минимально допустимого уровня обеспеченности территории объектами соответствующих инфраструктур и расчетным показателям максимально допустимого уровня территориальной доступности таких объектов для населения. Как известно, данные показатели устанавливаются в составе ПЗЗ применительно к территории, в границах которой предусматривается осуществление КРТ (п. 7 ч. 4 ст. 42 ГрК РФ).

Прежде чем перейти к детальному рассмотрению четырех проектов СП, заявляемых «Фондом ДОМ. РФ» в качестве предметных (специальных) именно для КРТ, отметим, что они базируются на Стандарте комплексного развития территорий (далее — Стандарт), разработанном ранее в основном силами КБ «Стрелка» с использованием зарубежного опыта. Цель Стандарта — повышение комфортности и выразительности, главным образом, жилой застройки путем повышения ее разнообразия, компактности и плотности с введением для этого целевых моделей городской среды²⁰.

Задачей разработки проектов СП стало повышение статуса Стандарта (хотя бы отдельных его положений) с уровня методических рекомендаций до нормативно-технического документа в расчете на обязательность и масштабирование его применения. Для этого проведены соответствующие организационные мероприятия (совещания на уровне руководства Минстроя России и др.), результаты которых не указывали на выполнение разработок именно в формате СП (речь шла о сохранении методически рекомендательного статуса). Несмотря на это, такая разработка была включена в план Минстроя и осуществлена в формате СП.

Рассматривать четыре проекта СП (проекты СП 1, 2, 3, 4) будем с позиций основополагающих стандартов. Это обусловлено тем, что согласно порядку разработки сводов правил, установленному Постановлением Правительства РФ от 01.07.2016 № 624 (п. 9)²¹, экспертиза проекта СП осуществля-

ется в порядке, утвержденном Росстандартом²², т.е. в соответствии с требованиями ГОСТ Р 1.6-2013, определившим правила организации и проведения экспертизы проектов стандартов²³.

Вначале необходимо указать, что разработка проектов СП 1, 2, 3, 4 должна позиционироваться не иначе как заявка на изменение или некое дополнение структуры СП раздела 30 «Градостроительство» Реестра СП в части КРТ. Однако сама эта «базовая» структура не выглядит эффективной хотя бы в силу отмеченной внутренней ее противоречивости, касающейся области применения включенных в нее СП, а главное в силу принципиальной неполноты в части как функционального охвата, так и игнорирования иных (кроме СП) форматов документов по стандартизации. В этом отношении требуется соответствующая трансформация и доработка всей структуры и желательна ее автономизация ([18], см. также выше). Только так, двигаясь от общего к частному, можно объективно определить нишу и перечень документов по стандартизации в сфере КРТ. Очевидно, что предложенная инициатива «Фонд ДОМ. РФ», построенная по противоположному принципу выхватывания «частного» из несозданного еще «общего», не выглядит логичной (целесообразно иметь представление о месте и роли такого блока документов в общей обновленной структуре).

Согласно нормативным требованиям в проектах СП 1, 2, 3, 4 следует приводить оправдавшие себя на практике рекомендуемые способы и методы достижения целей Технического регламента о безопасности зданий и сооружений (№ 384-ФЗ)²⁴ и решения конкретных задач по обеспечению безопасности, поставленных в данном ФЗ, включая те из них, которые обеспечивают проверку объективными методами, в том числе используя механизм оценки соответствия (согласно № 162-ФЗ любые СП нацелены на обеспечение соблюдения требований технических регламентов). При этом следует исключить те предлагаемые требования, которые носят не технический, а правовой характер, включая запреты и допуски, а факты валидации проектируемых требований целесообразно подтвердить документально. Как показал анализ, большинство

²⁰ Стандарт комплексного развития территорий. URL: <https://www.дом.рф/urban/standards/printsipy-kompleksnogo-razvitiya-territorii/?ysclid=laqocky9i90010119>

²¹ Об утверждении Правил разработки, утверждения, опубликования, изменения и отмены сводов правил : Постановление Правительства РФ от 01.07.2016 № 624 (ред. от 14.12.2021). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_201099/

²² Об утверждении Порядка проведения экспертизы проектов документов, разрабатываемых и применяемых в национальной системе стандартизации : приказ Росстандарта от 05.05.2016 № 547 : зарег. в Минюсте России 26.08.2016 № 43420. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_203930/

²³ ГОСТ Р 1.6-2013. Стандартизация в Российской Федерации. Проекты стандартов. Правила организации и проведения экспертизы. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104891?ysclid=lbs0w0xo55706304818>

²⁴ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/

таких нормативных требований в проектах СП 1, 2, 3, 4 не учтено.

Необходимо уточнить объекты стандартизации (область применения проектируемых СП 1, 2, 3, 4) и их аспекты, исключив требования в части архитектурно-строительного проектирования, которые не относятся к градостроительству (см. выше). Это, кроме всего, устранил внутреннее несоответствие с наименованием проектов СП 1, 2, 3, 4 и областью их применения, заявленной в пояснительных записках к проектам СП, как разработка «градодокументации» в рамках модели КРТ. Предлагаемое практическое применение моделей городской среды не предусмотрено главой 10 ГрК РФ, что в соответствии с законодательством ставит под сомнение возможность включения их в состав документов по стандартизации, тем более в качестве аспекта нормирования (стандартизации).

Также учитывая, что согласно ГрК РФ модель КРТ касается подготовки ДПТ, следует исключить предметные требования в части территориального планирования, а рекомендации по градостроительному зонированию применять только в части установленной в ГрК РФ применительно к КРТ (акцент необходимо сделать на планировке территории как градостроительной основы КРТ). Кроме того, следует уточнить, распространяются ли требования по КРТ на ДПТ, подготавливаемую для территорий иных типов (кроме тех, в границах которых реализуется модель КРТ). В целом также заявляемая в проектах СП область применения должна соответствовать гл. 10 ГрК РФ не только в части видов (уровней) градостроительной деятельности, но и в части идентификации видов исходной градостроительной ситуации (новое строительство на незастроенной территории города, новое строительство на территории аварийного жилфонда, реконструкция застроенной периферийной части города, реконструкция застроенной центральной части города), которые следует учесть в полном объеме.

Разработанные проекты СП в различных частях не отвечают и иным правовым требованиям. Помимо того, что в них отсутствует конкретная «привязка» к законодательно установленным требованиям безопасности к объекту регулирования (№ 384-ФЗ), не приведены и какие-либо указания относительно выполнения инженерных изысканий, обеспечивающих согласно ГрК РФ принятие рационального и безопасного проектно-планировочного решения. В части применения прогрессивных технологий и устранения применения устаревших технологий целесообразно внести конкретные указания на обеспечение использования прогрессивных урбанистических технологий (например, модели «Умный город», «Глубокий город» и др.) и на устранение применения устаревших технологий.

Следовало бы также привести конкретные технические требования, обеспечивающие оценку соответствия требованиям пожарной безопасности и законодательства об энергоэффективности^{25, 26}, а также дополнительно учесть особенности образования и использования земельных участков МКД и ТСЖ, установленные земельным и жилищным законодательством с «привязкой» соответствующих требований к подготовке проекта межевания территории. Несоответствия с законодательством РФ стоит устранить и в отношении терминологии («разукрупнение земельных участков» и др.), а также относительно предлагаемых нелегитимных форматов и процедур (выделение квартала как единого земельного участка, образование отдельного земельного участка для размещения двора, модель основного и дополнительного земельного участка, выбор земельных участков).

Наряду с формальным упоминанием СП 473²⁷ целесообразен конкретный учет градостроительного потенциала развития подземного пространства путем внесения соответствующих требований (как вариант отсылочного характера). В контексте поставленных в проектах СП 1, 2, 3, 4 задач это имеет существенное значение (обеспечивается повышение значений параметров, нормирующих уровни компактности, экологичности и др.). Идеологически (см., например, практику подземной урбанистики передовых стран и требования СП 473) комплексное и масштабное развитие городского подземного пространства рассматривается как равноценное, а иногда и приоритетное градостроительное направление, в том числе вполне социально, экономически и экологически окупаемое (практика Монреалья и других городов). Объективные затруднения при этом (санитарно-гигиенические, технические, геологические и т.д.) успешно преодолеваются применением соответствующих инновационных технических (включая передачу солнечного света вглубь), строительных и горных технологий, а также выполнением изысканий и исследований. Все это в РФ уже находит применение и, безусловно, будет развиваться далее.

²⁵ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (последняя редакция). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/

²⁶ Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (последняя редакция). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/

²⁷ СП 473.1325800.2019. Здания, сооружения и комплексы подземные. Правила градостроительного проектирования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564543320?ysclid=lbs8sp24s6560883633>

Необходимо исключить предлагаемую необоснованную регуляционную нагрузку на нормативы градостроительного проектирования при обеспечении более четкого разграничения с проектируемыми и отсылочными (к СП 42) требованиями. При этом следует учитывать, что такие нормативы согласно ГрК РФ касаются только размещения и проектирования «публичных» объектов, за создание которых отвечает соответствующий уровень власти (управления). Жилые здания в подавляющем большинстве к таким объектам не относятся.

Оказались невыдержанными и нормативные требования организационно-управленческого характера. В частности, отметим отсутствие полноценной научно-исследовательской проработки для обоснования предлагаемых к нормативно-техническому закреплению планировочных решений и параметров. Выполненные в 2018 г. исследования, на результаты ссылаются исполнители разработки проектов СП 1, 2, 3, 4, направлены на обоснование включения изменений в отдельные СП (СП 42, СП 82, СП 296 и др.). Более того, их предварительное рассмотрение в ПК 9 вызвало серьезные вопросы экспертов подкомитета. Была признана необходимость проведения специальной работы по системной экспертизе результатов исследований, которая, к сожалению, не была проведена. Глубина, релевантность и охват проработки международного опыта применения предлагаемых к нормативно-техническому закреплению планировочных решений недостаточны. В частности, не учтен (либо недостаточно учтен) опыт КНР и других стран Юго-Восточной Азии, стран бывшего социалистического содружества. Обоснование социально-экономической эффективности достижения целей КРТ в случае использования разработанных проектов СП также отсутствует, в том числе в сравнении с эффектами применения действующих нормативных требований. На момент рассмотрения проектов СП не было указано на результаты обязательного, в данном случае межведомственного, согласования (Минэкономразвития России и др.) и согласования со «смежными» ТК Росстандарта.

Стоит учесть и отмеченный выше факт резкого поворота вектора НТД в сторону добровольности применения подавляющего большинства требований НТД. Применение проектируемых требований СП 1, 2, 3, 4, как и иных требований НТД в части градопроектирования, теперь будет носить добровольный характер (соответственно в текстах НТД придется снизить уровень императивности, оптимизировав применение терминов «следует», «необходимо» и т.д.). Следует также учесть и законодательную новеллу по переходу на новый формат единого документа территориального планирования и градостроительного зонирования (ст. 28.1. ГрК РФ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модель КРТ обозначена как актуальный и ключевой национальный инструмент пространственного развития. В то же время ее радикальный характер и недостаточная первоначальная обоснованность приводят к необходимости совершенствования по ходу практики реализации КРТ. Становление института КРТ сопровождается, кроме того, рядом сложностей инфраструктурного (обеспечивающего) характера, прежде всего речь идет о несовершенстве системы стандартизации в данной сфере.

Проведенное исследование посвящено оценке эффективности такой системы в сегменте градостроительного проектирования, являющегося ядром модели КРТ. Его результаты показали дефекты (в основном это пробелы, а также коллизии и дублирование) в составе СП всех выделенных групп раздела 30 «Градостроительство» Реестра сводов, т.е. их слабую приспособленность для решения спектра задач КРТ (гл. 10 ГрК РФ). Одновременно подтверждена структурная неэффективность данного раздела СП и подчеркнута исчерпанность потенциала дальнейшего развития базового «планировочного» СП 42.

В некотором смысле отмеченные дефекты оправдывает то, что область применения НТД раздела 30 не заявлялась конкретно как сфера КРТ. Поэтому акцент был сделан на детальном рассмотрении четырех проектов СП, которые по определению должны быть направлены на стандартизацию именно в рамках КРТ. Их анализ выполнен с позиций ответственности формальным требованиям основополагающего ГОСТ Р 1.6-2013. В итоге обнаружен ряд несоответствий нормативным требованиям (прежде всего, законодательным требованиям безопасности, установленным № 384-ФЗ, а также нормам № 162-ФЗ), начиная с некорректности определения предмета и аспекта нормирования (модели городской среды). Таким дефектам способствовали причины организационно-управленческого характера (включение в план разработок, не обеспеченных достаточным научным обоснованием и практической верификацией, игнорирование мнения экспертов и др.). В условиях очевидной необходимости структурного совершенствования «планировочного» раздела ДС и проведения для этого соответствующего обоснования вне этого контекста предложено принятие блока данных четырех СП, что не отвечает логике программного подхода.

Проведенный целевой анализ выполнен впервые, он выявил актуальность и новизну исследуемых вопросов. Но главное, что он позволил подтвердить рабочее предположение (гипотезу) о нецелесообразности разработки документов по стандартизации блока «Градостроительство», область применения которых декларируется как КРТ, до момента системного устранения дефектов в составе соответствующих НПА и до реформа-

тирования структуры документов по стандартизации в сфере градостроительного проектирования. Дальнейшие исследования в данном направлении, на наш взгляд, должны быть нацелены на обоснование создания системы опережающего научно-исследовательского обеспечения модернизации нормативной технической базы в области градостроительства, формирования перспективного облика и целевой модели новой системы нормативных технических документов в данной сфере. В идеале нормативно-техническая база должна касаться не только прикладных, но и фундаментальных научных исследований (с оптимизацией планов ЦНИИП Минстроя России и РААСН, а также совершенствованием порядка их формирования и с обеспечением участия в этом профессионального экспертного сообщества). Синхронно и гармонизировано предлагается также актуализировать подходы по внедрению Стандарта КРТ в части его имплементации в обновляемую нормативную техническую базу с расширением спектра видов развития террито-

рии (не ограничиваясь только жилой застройкой), как вариант в формате научно-технической рабочей программы (дорожной карты). Следует дополнительно проработать релевантную мировую практику для ее использования при развитии рассматриваемого сегмента стандартизации. В итоге выявится необходимость и целесообразность как внесения изменений (дополнений) в действующие, так и разработки новых НТД, в том числе в формате ГОСТ (включая формат предварительного национального стандарта). Обсуждение таких предложений было осуществлено в рамках заседаний ПК 9, в начале 2022 г. — на совещании у руководства ФАУ ФЦС (целесообразно также проведение такого совещания на уровне руководства Минстроя России), а в настоящее время продолжается в рамках заседаний ТК 507. По итогам голосования на заседании ТК 507 в конце октября 2022 г. проекты СП 1, 2, 3, 4 не были рекомендованы к утверждению. По имеющейся информации исполнителями осуществляется доработка данных проектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Сборщиков С.Б., Журавлев П.А.* Организация разработки градостроительных решений // *Строительство: наука и образование*. 2022. Т. 12. № 2. С. 6–20. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.1
2. *Трутнев Э.К.* О проектах планировки территорий реновации // *Имущественные отношения в Российской Федерации*. 2020. № 6 (225). С. 14–28.
3. *Киевский И.Л., Хоркина Ж.А., Леонов В.В. и др.* Реновация. Крупномасштабный городской проект рассредоточенного строительства : монография. М. : Русская школа, 2018. 192 с.
4. *Акамова Н.В., Чейшвили М.З.* Пробелы правового регулирования реновации в г. Москве // *Проблемы экономики и юридической практики*. 2018. № 4. С. 110–114.
5. *Барсукова Т.Г.* Управление проектами программы реновации промышленных территорий в городе Москве: особенности и направления развития // *Плехановский барометр*. 2018. № 1. С. 11–15.
6. *Безгодько Д.В.* Проблемы реновации промышленных территорий Санкт-Петербурга // *Экономика и социум*. 2020. № 3 (70). С. 250–254.
7. *Бенуж А.А., Вьюков И.С.* Зарубежный опыт и оценка потенциала использования в России стандарта BREEAM при программе реновации застроенных территорий // *Устойчивое развитие территорий : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф.* 2018. С. 103–107.
8. *Самойлова Н.А.* Международный стандарт оценки воздействия на среду жизнедеятельности BREEAM Communities (градостроительство) в Рос-

- сии // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 9. С. 1168–1181. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1168-1181
9. *Шульженко С.И.* Правовые проблемы комплексного развития территорий (Часть 1) // *Управленческое консультирование*. 2022. № 1. С. 165–183. DOI: 10.22394/1726-1139-2022-1-165-183
10. *Шульженко С.И.* Правовые проблемы комплексного развития территорий (Часть 2) // *Управленческое консультирование*. 2022. № 2. С. 174–189. DOI: 10.22394/1726-1139-2022-2-174-189
11. *Шульженко С.И.* Правовые проблемы комплексного развития территорий (Часть 3) // *Управленческое консультирование*. 2022. № 3. С. 172–189. DOI: 10.22394/1726-1139-2022-3-172-189
12. *Исаев Н.В.* Проблемы правового регулирования соглашений о государственно-частном партнерстве // *Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева*. 2020. Т. 1. № 3 (96). С. 81–89.
13. *Саперова А.П.* Анализ организации комплексного освоения территорий девелоперскими компаниями // *Современные методы организации и управления строительством : сб. ст. молодых ученых, аспирантов, молодых специалистов, студентов*. 2020. С. 147–151.
14. *Окопная А.С., Митягин С.Д.* Формирование вектора развития документации по проекту планировки территории // *Вестник научных конференций*. 2019. № 3–3 (43). С. 118–119.
15. *Арсеньев С.В., Киевская Р.Л.* Организационно-экономическая модель реновации с учетом разработки проектов планировки территорий // *Про-*

мышленное и гражданское строительство. 2019. № 8. С. 44–48. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.08.44-48

16. Юшкова Н.Г., Алексеев Ю.В. Совершенствование координации в системе территориального планирования, градостроительного зонирования и планировки территории // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2020. № 3 (31). С. 36–53. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-31-3-36-53

17. Беляев В.Л. Стандартизация в градостроительстве: особенности, проблемы, пути совершенствования // Экология урбанизированных территорий. 2022. № 2. С. 67–73. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-67-73

18. Лептюхова О.Ю. Анализ свода правил «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» и его значение в современном градостроительном проектировании // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 3. С. 98–104. DOI: 10.24412/1816-1863-2020-13098

19. Беляев В.Л. Инженерные изыскания для обоснования градостроительного проектирования: проблемы и перспективы системы государственного регулирования // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 2. С. 3–9. DOI: 10.31857/S0869780920020022

20. Беляев В.Л. Национальные особенности и перспективы совершенствования государственного регулирования градостроительного освоения подземного пространства // Экономика строительства и природопользования. 2021. № 1 (78). С. 111–121. DOI: 10.37279/2519-4453-2021-1-111-121

21. Зайчук М.Б. Регенерация территории жилой застройки с применением Стандарта комплексного развития на примере микрорайона Юбилейный г. Иркутска // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 2 (37). С. 342–353. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-2-342-353

Поступила в редакцию 23 декабря 2022 г.

Принята в доработанном виде 15 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Валерий Львович Беляев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства, доцент кафедры инженерных изысканий и геоэкологии; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 693675, Scopus: 56297569700, ORCID: 0000-0002-2228-015X; vbelyaev2011@mail.ru.

REFERENCES

1. Sborshchikov S.B., Zhuravlev P.A. Organizing the development of urban planning solutions. *Construction: Science and Education*. 2022; 12(2):6-20. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.2.1 (rus.).
2. Trutnev E.K. Issues of renovation territories planning. *Property relations in the Russian Federation*. 2020; 6(225):14-28. (rus.).
3. Kievskiy I.L., Khorkina Zh.A., Leonov V.V. et al. *Renovation. Large-scale urban dispersed construction project: monograph*. Moscow, Russian school, 2018; 192. (rus.).
4. Akayomova N.V., Cheyshvili M.Z. Gaps in legal regulation of renovation in Moscow. *Problems of Economics and Legal Practice*. 2018; 4:110-114. (rus.).
5. Barsukova T.G. Project management of the program of renovation of industrial territories in Moscow: features and directions of development. *Plekhanovsky barometer*. 2018; 1:11-15. (rus.).
6. Bezgodko D.V. Problems of renovation of industrial territories of Saint-Petersburg. *Economy and Society*. 2020; 3(70):250-254. (rus.).
7. Benuzh A.A. Foreign experience and assessment of the potential of using the BREEAM standard in Russia in the program of renovation of built-up areas. *Sustainable Development of Territories: Collection of*

Reports of the International Scientific and Practical Conference. 2018; 103-107. (rus.).

8. Samoylova N.A. Urban planning in Russia and international standard for assessing the impact on the environment of BREEAM Communities. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(9):1168-1181. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1168-1181 (rus.).

9. Shulzhenko S.I. Legal problems of complex development of territories (Part 1). *Administrative Consulting*. 2022; 1:165-183. DOI: 10.22394/1726-1139-2022-1-165-183 (rus.).

10. Shulzhenko S.I. Legal problems of complex development of territories (Part 2). *Administrative Consulting*. 2022; 2:174-189. DOI: 10.22394/1726-1139-2022-2-174-189 (rus.).

11. Shulzhenko S.I. Legal problems of complex development of territories (Part 3). *Administrative consulting*. 2022; 3:172-189. DOI: 10.22394/1726-1139-2022-3-172-189 (rus.).

12. Isaev N.V. Problems of legal regulation of public-private partnership agreements. *Bulletin of V.N. Tatishchev Volga State University*. 2020; 1(3):(96):81-89. (rus.).

13. Saperova A.P. Analysis of the organization of complex development of territories by development companies. *Modern methods of organization and management of construction : collection of articles by young scientists, graduate students, young specialists, students*. 2020; 147-151. (rus.).
14. Okopnyaya A.S., Mityagin S.D. Formation of the development vector of documentation on the territory planning project. *Bulletin of Scientific Conferences*. 2019; 3-3(43):118-119. (rus.).
15. Arsenev S.V., Kievskaya R.L. Organizational and economic model of renovation with due regard for the development of territory planning projects. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 8:44-48. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.08.44-48 (rus.).
16. Yushkova N.G., Alekseev Ju.V. Improvement of coordination in the system territorial planning, urban zoning and territory planning references. *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technologies*. 2020; 3(31):36-53. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-31-3-36-53 (rus.).
17. Belyaev V.L. Standardization in urban planning: features, problems, ways of improvement. *Ecology of Urbanized Territories*. 2022; 2:67-73. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-2-67-73 (rus.).
18. Leptyuhova O.Yu. Regulatory document “Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements” analysis for its significance in modern urban planning. *Ecology of Urbanized Territories*. 2020; 3:98-104. DOI: 10.24412/1816-1863-2020-13098 (rus.).
19. Belyaev V.L. Engineering surveys to substantiate urban planning design: problems and prospects of the system of state regulation. *Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology*. 2022; 2:3-9. DOI: 10.31857/S0869780920020022 (rus.).
20. Belyaev V.L. National features and prospects for improving state regulation of urban development of underground space. *Economics of Construction and Environmental Management*. 2021; 1(78):111-121. DOI: 10.37279/2519-4453-2021-1-111-121 (rus.).
21. Zajchuk M.B. Regeneration of housing sector using the integrated area development standard on the example of the Yubileyniy microdistrict of Irkutsk. *News of universities. Investment. Construction. Realty*. 2021; 11(2):342-353. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-2-342-353 (rus.).

Received December 23, 2022.

Adopted in revised form on February 15, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

B I O N O T E S: **Valerij L. Belyaev** — Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate Professor of the Department of Urban Planning; Associate Professor of the Department of Engineering Surveys and Geoecology; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 693675, Scopus: 56297569700, ORCID: 0000-0002-2228-015X; vbelyaev2011@mail.ru.

Анализ архитектуры современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов и тенденции их развития

Татьяна Николаевна Колесникова, Павел Эдуардович Кузнецов

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева);

г. Орел, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Многофункциональный культурно-зрелищный комплекс объединяет в единое целое пространства различного функционального назначения, где наряду с основной зрелищной функцией осуществляются другие общественные функции. Одна из причин появления многофункциональных зрелищных комплексов — потеря актуальности ряда существующих объектов культуры в современных социальных условиях. От проектирования монофункциональных зданий произошел переход к возведению многофункциональных культурно-зрелищных центров. Цель исследования — выявление особенностей формирования архитектуры многофункциональных культурно-зрелищных комплексов и тенденций их развития на современном этапе.

Материалы и методы. Исследование проводилось на основе изучения, анализа, обобщения, сравнения особенностей архитектуры десяти наиболее выдающихся примеров зарубежной и отечественной практики проектирования и строительства.

Результаты. Анализ показал, что архитектура многофункциональных культурно-зрелищных комплексов в первые годы XXI в. формировалась в различных странах мира. Показано, что культурно-зрелищные комплексы вобрали в себя множество общественных функций и сегодня являются одним из развитых типов многофункциональной архитектуры.

Выводы. Основные тенденции развития современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов: проектирование и строительство масштабных многозальных центров с высокоразвитой инфраструктурой; важная градообразующая роль в композиционной структуре города; единое объемно-планировочное решение; совершенствование конструктивных, инженерных решений; повышенные требования как к внешнему облику зданий, так и к их интерьеру; экологическое проектирование с максимальным использованием всего спектра технологий, приемов, направленных на формирование здоровой, комфортной и безопасной среды для жизнедеятельности человека.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многофункциональный культурно-зрелищный комплекс, центр исполнительских искусств, культурный центр, концертный зал, театр, градостроительное размещение, объемно-планировочное решение, конструктивные особенности, экологическое проектирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Колесникова Т.Н., Кузнецов П.Э. Анализ архитектуры современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов и тенденции их развития // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 346–357. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.346-357

Автор, ответственный за переписку: Павел Эдуардович Кузнецов, pavel19980915@gmail.ru.

Analysis of architecture of modern multifunctional cultural and entertainment complexes and their development trends

Tatyana N. Kolesnikova, Pavel E. Kuznetsov

Orel State University named after I.S. Turgenev; Orel, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A multifunctional cultural and entertainment complex encompasses spaces of various functional purposes into a single whole. A complex building performs various public functions together with the main function of entertainment. One of the reasons why multifunctional entertainment complexes have emerged is the loss of relevance by a number of existing culture facilities in the present-day environment. A transition was made from the design of multifunctional buildings to construction of multifunctional cultural and entertainment centers. The purpose of the study is to identify the features of architecture of multifunctional cultural and entertainment complexes and their development trends at the present stage.

Materials and methods. The study encompassed investigation, analysis, generalization, and comparison of architectural features of ten most outstanding foreign and domestic design and construction facilities.

Results. The analysis showed that in the early 21st century the architecture of modern multifunctional cultural and entertainment complexes developed in various countries of the world. The authors assume that modern cultural and entertainment complexes absorb many public functions, and today they are a well-developed specimen of multifunctional architecture.

Conclusions. The main trends in the development of modern multifunctional cultural and entertainment complexes include the design and construction of large-scale multi-hall centers with highly developed infrastructure; their important role in the urban compositional structure; a single space-planning solution; improvement of structural engineering solu-

tions; tighter requirements for the appearance of buildings and their interior; environmental design with maximal application of the entire range of technologies, techniques focused on a healthy, comfortable and safe living environment.

KEYWORDS: multifunctional cultural and entertainment complex, center for performing arts, cultural center, concert hall, theater, urban planning, space planning solution, design features, environmental design

FOR CITATION: Kolesnikova T.N., Kuznetsov P.E. Analysis of the architecture of modern multifunctional cultural and entertainment complexes and their development trends. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):346-357. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.346-357 (rus.).

Corresponding author: Pavel E. Kuznetsov, pavel19980915@gmail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Культурно-зрелищные здания всегда занимали важное место в архитектурном проектировании, что связано с их значительной ролью в жизни общества. Здания и комплексы культуры возводились с разной степенью интенсивности на всех этапах развития человечества. По мере развития градостроительных, архитектурных и строительных технологий менялся и подход к проектированию сооружений данного типа. Их функциональное наполнение стало одной из основных тенденций формирования и развития архитектуры многофункциональных культурно-зрелищных комплексов. От проектирования монофункциональных зданий, таких как театры и концертные залы, во многих странах произошел переход к строительству высокотехнологичных многофункциональных культурно-зрелищных центров, включающих объекты различного назначения.

Одна из причин появления многофункциональных культурно-зрелищных комплексов — потеря актуальности ряда существующих объектов культуры в современных социальных условиях в связи с новыми приоритетами населения. На формирование интересов общества в рамках культурно-информационного пространства оказывает влияние множество факторов культурно-зрелищной сферы, таких как состояние материально-технической базы культурных центров, профессиональный уровень работающих в них специалистов, а также экономический расцвет и кризисы, духовные спад или подъем в обществе, его нравственные идеалы, представления о красоте, соображения практической пользы и необходимости, культурные и национальные связи и др. [1–3].

В связи с этим важнейшей чертой создания культурных центров, наряду с обеспечением «повседневной жизни» искусства, является поиск и зарождение новых стилей и направлений в искусстве, их популяризация и взаимообогащение. В настоящее время, когда культурная жизнь многогранна и находится в непрерывном состоянии поиска, особенно актуально существование многообразия типов многофункциональных культурно-зрелищных комплексов. Это архитектурные пространства, которые не только формируют эстетически выразительную среду, но и знакомят человека с мировыми достижениями в области культуры и искусства,

дают ему новые знания, расширяют мировоззрение, раздвигают границы мира. Культурный центр рассматривается как сложное интегрирующее начало, основополагающий закон которого — синтез искусств на базе архитектуры. Их создание и развитие в будущем возможны только через изучение и систематизацию опыта проектирования и строительства зданий подобного типа в прошлом и на современном этапе [4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Многофункциональный культурно-зрелищный комплекс объединяет в единое целое пространства различного функционального назначения, где наряду с основными зрелищными объектами введены сопутствующие объекты общественного обслуживания с целью удовлетворения и расширения спектра услуг и функций, что в конечном счете должно привести к более полному духовному обогащению личности.

Цель исследования — выявление научно обоснованных особенностей формирования и развития архитектуры многофункциональных культурно-зрелищных комплексов исходя из отечественной и зарубежной практики проектирования и строительства подобных сооружений.

Задачи исследования:

1. Проанализировать зарубежный и отечественный опыт проектирования и строительства современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов.
2. Определить факторы, влияющие на формирование и развитие архитектуры данных центров.
3. Выявить основные тенденции развития современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов.

Объект исследования — архитектура современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов.

При проведении исследования проанализирован опыт проектирования и строительства десяти уникальных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов различного типа, построенных в XXI в. и расположенных на территории Европы и Азии.

Методологической основой исследования архитектуры комплексов и выявления тенденций их

развития стал комплексный подход на основе изучения и анализа источников, в том числе текстовых: научных, литературно-публицистических; электронно-цифровых; проектно-графических: архитектурных, инженерно-конструктивных; фотографических; синтеза и обобщения, сравнения особенностей архитектуры аналогов современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Один из самых грандиозных современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов — Национальный центр исполнительских искусств Wei-Wu-Ying, построенный по проекту голландского архитектора Франсин Хаубен в 2010–2018 гг. в одноименном городском парке в Гаосюне (Тайвань).

Общая площадь трехэтажного комплекса составляет 141 000 м², высота — 37,4 м. Центр включает четыре основные площадки для выступлений, рассчитанные на 5861 зритель, — оперный театр на 2236 мест, концертный зал на 1981 место, концертный зал для камерной музыки и сольных концертов на 434 места, драматический театр на 1210 мест и открытый амфитеатр. В состав также входят библиотека, репетиционные помещения площадью более 1000 м², два конгресс-зала на 100 и 200 мест, выставочные пространства площадью 800 м², ресторан, кафе, офисы. Все это делает его крупнейшим в мире культурным центром.

Особенностями служат форма и планировочное решение объекта, представляющего собой несколько залов разного формата и размера, обособленных друг от друга, но накрытых единым «полотном» прямоугольной формы. Большой навес, изображающий кроны баньяновых деревьев, с одной стороны плавно спускается к земле и образует красивый ландшафтный открытый амфитеатр со ступенчатыми сиденьями, органично вписываясь в окружа-

ющую среду. Парк вокруг, в свою очередь, становится неформальной сценой. Дизайн театрального комплекса с его открытыми общественными пространствами и ландшафтом крыши является логическим продолжением парка: здание и ландшафт естественным образом сливаются, образуя единое целое. Многоуровневая крыша также используется как парк для отдыха и обеспечивает равномерное охлаждение здания, что актуально в условиях субтропического климата. Под этой крышей находится Banyan Plaza — просторное, защищенное общественное пространство. Между четырьмя залами, которые образуют «стволы», поддерживающие волнистую крышу, рельеф, поднимающийся от уровня земли до плюс пяти метров, становится частью ландшафта парка [5, 6].

Конструктивные и инженерно-технические решения объекта уникальны: волнистая алюминиевая крыша размером 225 × 160 м опирается на несущую конструкцию, которая сочетает в себе трубчатый стальной пространственный каркас с монолитным бетонным фундаментом и вертикальными циркуляционными стержнями. Нижняя сторона козырька облицована 2320 индивидуально изогнутыми стальными плитками толщиной 6 мм. Общая площадь стальной обшивки составляет 23 000 м². Сварные швы между стальными пластинами выполнены визуально заметными, напоминая грузовой корабль, в различных точках площади также есть отметки ватерлинии, указывающие высоту здания над уровнем моря. Эти детали отражают историю Гаосюна как центра судостроения. Плоский фасад с белой металлической облицовкой имеет линейное остекление вдоль каждой стороны третьего этажа, который консольно выступает над двумя нижними этажами (рис. 1).

Другой масштабный и красивейший культурно-зрелищный комплекс — Национальный центр исполнительских искусств в Пекине, построенный по проекту французского архитектора Поля Андре в 2001–2007 гг. в историческом центре столицы.

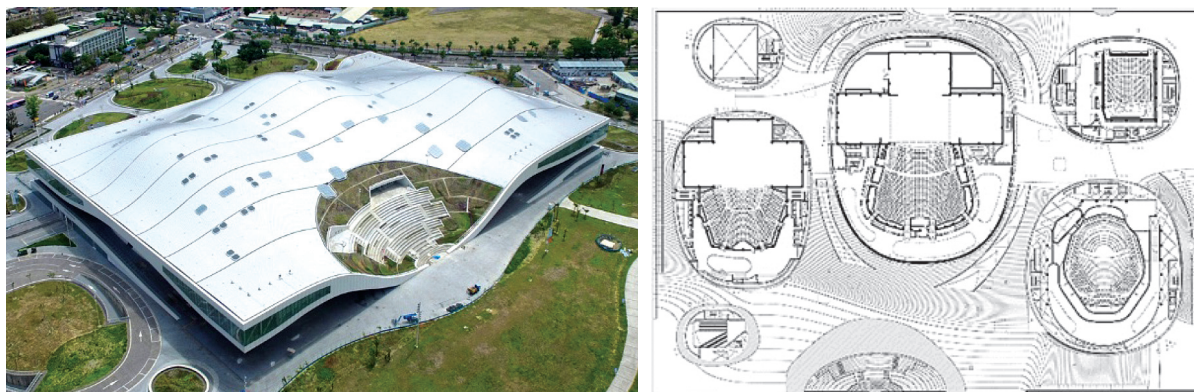


Рис. 1. Национальный центр исполнительских искусств Wei-Wu-Ying в Гаосюне

Fig. 1. Wei-Wu-Ying National Center for Performing Arts in Kaohsiung

Общая площадь комплекса — 217 500 м². Основное сооружение Национального центра представляет собой уникальную эллипсоидную оболочку высотой около 46,6 м, которая перекрывает единое пространство без внутренних опор. Глубина подземной части — 32,5 м. Длинная ось эллипса составляет 212 м, короткая ось — 143 м, а его периметр — более 600 м. Поверхность корпуса, разделенная надвое изогнутой стеклянной полосой, состоит из 18 398 титановых панелей и более 1226 листов сверхчистого стекла. В здание, окруженное искусственным озером площадью 35 000 м², можно попасть через впечатляющий туннель со стеклянной крышей длиной 70 м. Из него посетители оказываются в огромном фойе, где, как на площади, размещены три зрительных зала: оперный вместимостью 2416 зрителей, концертный — 2017, драматический театр — 1040 человек [7]. В дополнение к основным залам имеются помещения для выставок, библиотека, конференц-залы, магазины, рестораны, кафе (рис. 2).

Образцом нового поколения центров искусств мирового класса, шедевром современной архитектуры является Эспланада — театр в заливе. Комплекс, построенный в 1996–2001 гг., расположен в Сингапуре на берегу залива Марина-Бэй. Проект разработан британским архитектором Майклом Уилфордом и архитектурной фирмой из Сингапура DP Architects.

Комплекс вместимостью 5290 человек состоит из двух основных зрительных залов — театра на 1950 мест и концертного зала на 1825 мест, а также сольной (245 мест), театральной (220 мест), репетиционной, Annex (450 мест) студий, театра на 600 мест и открытого театра. Другие общественные функции выполняют крупный торговый центр, библиотека исполнительских искусств, выставочные, фестивальные пространства, рестораны, кафе.

Общая площадь четырехуровневого Центра составляет 60 000 м², высота — 38 м. Выразительной архитектурной и конструктивной особенностью комплекса служат два огромных уникальных стеклянных полусферических купола, размещенных над основными залами [8]. Для солнцезащиты использовано более 7000 треугольных алюминиевых зонтов, расположенных под разными углами в зависимости от положения солнца (рис. 3).

Инновационные экопозитивные решения многофункционального культурно-зрелищного комплекса были применены японским архитектором Сигэру Баном и его французским партнером Жаном де Гастеном при разработке проекта Центра музыки и исполнительских искусств La Seine Musicale, построенного в 2014–2017 гг. в Париже на острове Сеген.

Общая площадь здания — 36 500 м², высота — 72,5 м. Комплекс имеет девять надземных, один подземный этаж и рассчитан на 5150 мест (многофункциональный зал Grande Seine на 4000 мест,



Рис. 2. Центр исполнительских искусств в Пекине

Fig. 2. Beijing Performing Arts Center

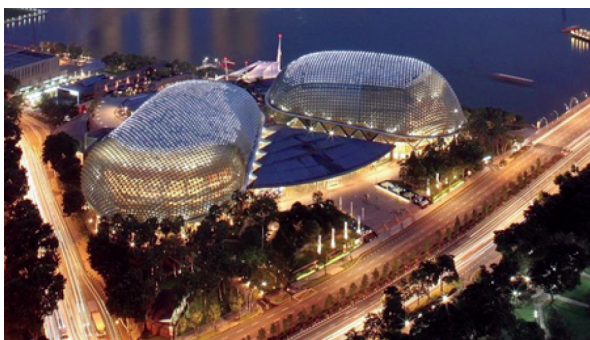
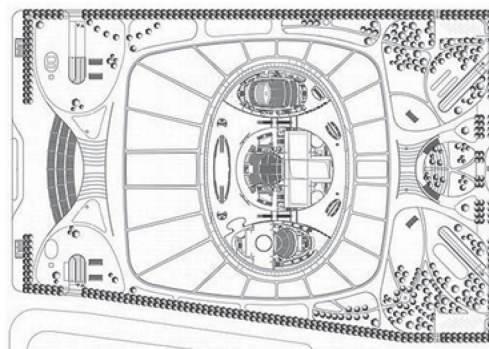


Рис. 3. Эспланада — театр в заливе

Fig. 3. Esplanade, the Theatre in the Bay

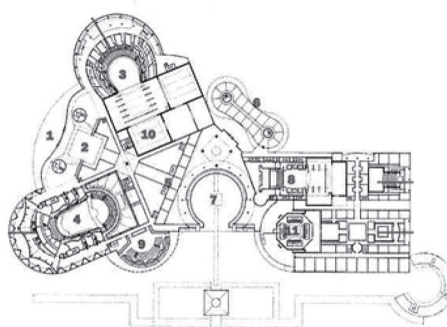




Рис. 4. Центр La Seine Musicale

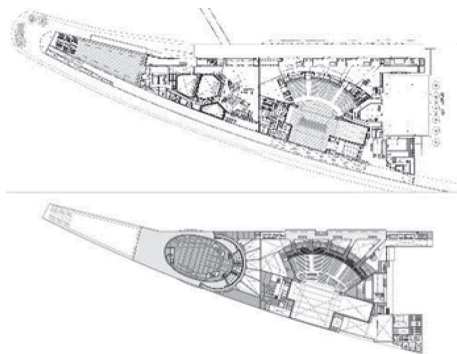
Fig. 4. La Seine Musicale center

концертный зал Auditorium на 1150 мест). Кроме того, в состав комплекса входят центр репетиций и звукозаписей, выставочные помещения, залы для семинаров, пресс-центр, школа вокала, рестораны, бары и магазины [9–11].

Центр La Seine Musicale имеет смелую и инновационную архитектуру, представленную стеклянной оболочкой яйцевидной формы на деревянном решетчатом каркасе, в котором находится зал Auditorium. Деревянная конструкция, расположенная на высоте 27,5 м, простирается примерно на 70 м по продольной оси и около 45 м по поперечной оси. Вокруг этой конструкции по круговой системе рельсов вращается большой «парус» высотой 45 м, на котором размещены солнечные панели (рис. 4).

Уникальными функционально-планировочным, объемно-пространственным и конструктивным решениями обладает Аудиториум Parco della Musica в Риме, построенный в 1996–2002 гг. по проекту итальянского архитектора Ренцо Пиано. Центр представляет собой современный многофункциональный культурно-зрелищный комплекс, посвященный музыке.

Четырехэтажный комплекс высотой 34 м, площадью 55 000 м², общей вместимостью 4850 зрителей состоит из трех концертных залов на 2744, 1133, 673 места, театральной студии на 300 мест, а также



открытого амфитеатра на 3000 мест. Помимо главных залов комплекс включает четыре многоцелевых зала-студии, музейные, выставочные пространства, библиотеку, рестораны, магазины.

Три «музыкальные шкатулки» как бы «парят» над зеленью парка. Они максимально отделены друг от друга, с тем чтобы исключить проблему наложения звука, но в то же время соединены у основания непрерывным вестибюлем. Крыша состоит из алюминиевой облицовки, опирающейся на смешанную конструкцию из клееных деревянных балок и стальных ребер, а ее форма контрастирует со строгой геометрией кирпичных стен (рис. 5).

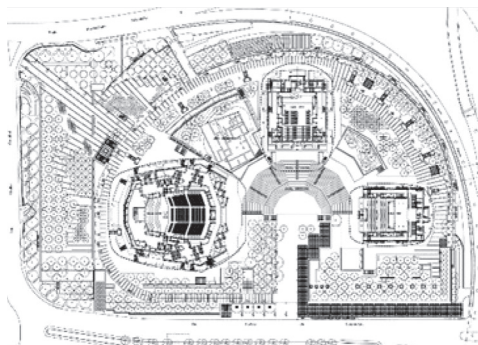
Новые решения в области строительства многофункциональных культурно-зрелищных комплексов применены французским архитектором Полем Андре при разработке проекта Большого театра Цзинань в Китае, построенного в 2010–2013 гг. в Центральном парке.

Центр общей вместимостью 3900 мест занимает площадь 72 000 м² и включает оперный театр на 1800 мест, концертный зал на 1600 мест, многофункциональный зал на 500 мест, аудитории, коммерческие объекты [12]. Каждый зал расположен в отдельном здании и своим архитектурно-художественным обликом напоминает разновеликие «лепестки» — раковины. Комплекс имеет переменную этажность. Самый большой корпус (оперный театр)



Рис. 5. Аудиториум Parco della Musica

Fig. 5. Parco della Musica Auditorium



высотой около 38 м имеет четыре надземных и два подземных этажа.

Три корпуса Большого театра и два боковых здания, расположенные на массивном каменном подиуме, покрыты непрозрачной металлической облицовкой и застекленными полосами по центральной линии, которые мягко подсвечиваются в ночное время (рис. 6).

Оригинальным и необычным зарубежным примером многофункционального культурно-зрелищного комплекса выступает концертный зал и конференц-центр «Харпа». Здание, построенное в 2007–2011 гг. в городе Рейкьявик (Исландия), расположено в гавани у самой кромки воды. Проект разработал датский архитектор Хеннинг Ларсен совместно с датским художником Олафуром Элиассоном.

Общая площадь комплекса — 28 000 м², высота — 43 м. Здание имеет переменную этажность — от пяти до восьми уровней. Четыре зала, рассчитанные на 3285 зрителей, оформлены в стиле исландских природных особенностей: «Элдоборг» (1800 мест), «Сильфурберг» (840 мест), «Нордюрльес» (450 мест), «Кальдалон» (195 мест). В состав комплекса также входят конференц-зал, переговорные комнаты, залы для приемов, просторные открытые пространства для выставок, два ресторана, офисы, магазины.



Рис. 6. Большой театр Цзинань

Fig. 6. Jinan Grand Theatre

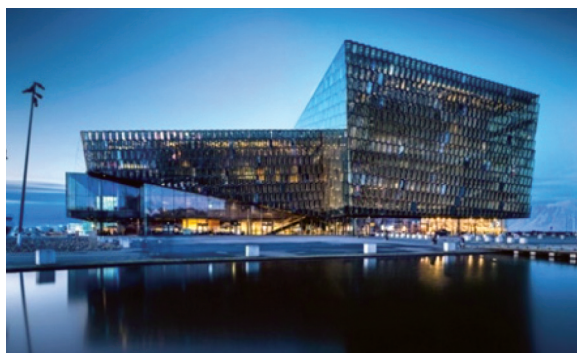


Рис. 7. Концертный зал «Харпа»

Fig. 7. Harpa Concert Hall

Стены здания выполнены из стального каркаса и стекла. Одна из ярких особенностей комплекса — южный фасад, который состоит из модульной системы двенадцатигранных геометрических фигур, заполненных более чем тысячей «квазикарпичами» высотой около 2,2 м каждый [13]. Стекланные панели фасада здания напоминают базальт (горную породу), из которого состоит большая часть горной системы Исландии (рис. 7).

Одним из крупнейших в мире центров исполнительских искусств, современным типом многофункционального культурно-зрелищного комплекса является Московский международный Дом музыки (ММДМ), построенный в 2000–2002 гг. по проекту архитекторов Ю. Гнедовского, В. Красильникова, Д. Солопова, М. Гавриловой, С. Гнедовского.

В комплекс входят четыре зала общей вместимостью 3056 зрителей — Светлановский на 1716 мест, Камерный на 528 мест, Театральный на 526 мест и зал Шнитке (Новый зал) на 286 мест, студия звукозаписи, аудио-видео комплекс, музей имени Е.Ф. Светланова, ресторан «Аллегро», летняя Open Air площадка на 700–800 мест, музыкальная терраса [14].

Общая площадь Дома музыки — 42 000 м², высота — более 46 м. В здании 10 надземных этажей с трехэтажным стилобатом и два подземных уровня. Основной несущий каркас — монолитный

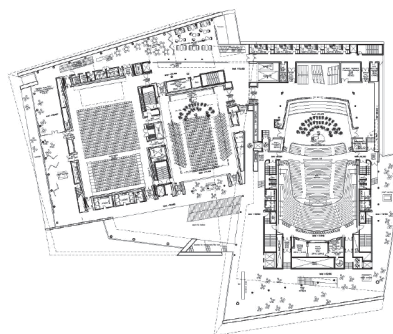
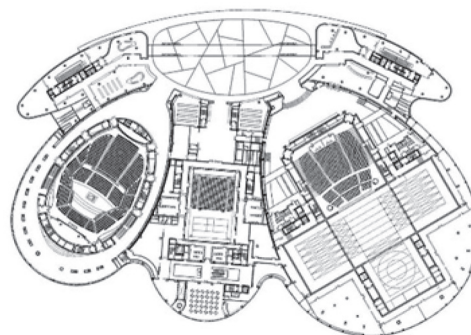




Рис. 8. Московский Дом музыки

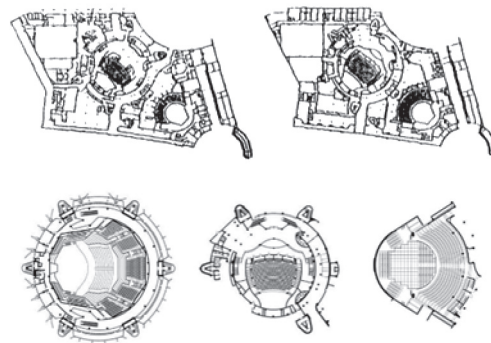
Fig. 8. Moscow House of Music

железобетон. Круглое здание из стекла и стали, построенное в стиле хай-тек, венчает огромный купол диаметром 50 м (рис. 8).

Другим отечественным примером многофункциональной архитектуры и одной из самых современных музыкальных площадок мирового уровня является концертный зал «Зарядье», расположенный в одноименном природно-ландшафтном парке. Проект здания разработан московским проектным бюро ТПО «Резерв» под руководством В. Плоткина при участии главного архитектора г. Москвы С. Кузнецова. Открытие состоялось в 2018 г.

Общая площадь концертного комплекса составляет 25 600 м². Четырехэтажное здание включает два концертных зала общей вместимостью 1950 зрителей (на 1550 и 400 мест), звукозаписывающую студию, два кафе по 400 мест каждое и бар на 100 человек. К зданию примыкают два открытых амфитеатра на 1600 и 400 зрителей.

Два фасада здания органично вписываются в искусственно созданный ландшафт парка. Уникальной особенностью концертного зала служит эксплуатируемая зеленая кровля, накрытая «стеклянной корой» площадью 8650 м² — крупнейшей в мире светопрозрачной большепролетной конструкцией с применением энергосберегающих тех-



нологий — 166 солнечных батарей. Высота верхней точки изгиба коры — более 34 м [15, 16]. Покрытие выполнено из металлического каркаса и стеклопакетов треугольной формы (рис. 9).

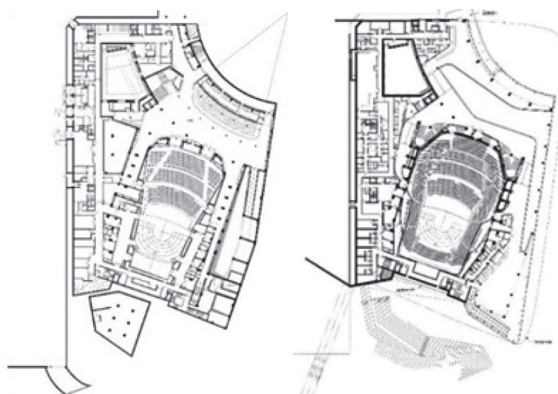
Ультрасовременные инновационные технологии, отвечающие высочайшему мировому уровню, применены при разработке проекта и возведении концертного зала «Крокус Сити Холл». Это единственный в России многоуровневый, многофункциональный зал-трансформер, максимальная вместимость которого составляет более 9500 зрителей. «Крокус Сити Холл» входит в крупнейший деловой и торгово-выставочный центр «Крокус-Сити», расположенный в Красногорске Московской области [17]. Разработка проекта и строительство здания осуществлены российским холдингом Scorus Group. Концертный зал, названный в честь народного артиста СССР Муслима Магомаева, был открыт 25 октября 2009 г.

Семизэтажное здание высотой более 35 м, общей площадью 38 100 м² имеет уникальный большой зрительный зал на 5865 мест, который может трансформироваться в средний на 2922 зрителя (партер, амфитеатр, бельэтаж) или малый зал на 1866 зрителей (партер, амфитеатр). Кроме того, каждый зал может быть сконфигурирован еще в четырех различ-



Рис. 9. Концертный зал «Зарядье»

Fig. 9. Zaryadye Concert Hall



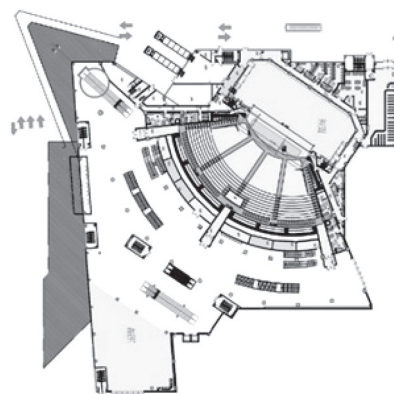


Рис. 10. «Крокус Сити Холл»

Fig. 10. Crocus City Hall

ных форматах. Размеры зала: длина — более 50 м, ширина — 100 м, высота — 30 м. Зрительская зона этой многоуровневой площадки выполнена в форме амфитеатра. Круговая акустическая система создает стереоэффект и покрывает каждый участок зала, делая слышимость практически идеальной. В состав комплекса также входят музей, посвященный Муслиму Магомаеву, ресторан премиум класса Backstage, 11 баров, буфеты и зоны отдыха.

Архитектурная концепция концертного зала «Крокус Сити Холл» заключается в устремленной ввысь линейности форм и лаконичном репрезентативном облике современных фасадов. Это пре-

красный пример высокотехнологичной архитектуры в стиле хай-тек с акцентом на стекло и металл в экстерьере. Силовая основа здания — стальной каркас из колонн, ферм, балок и других элементов, к которым крепятся ограждающие конструкции (рис. 10).

Результаты исследования показывают, что формирование архитектуры современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов в первые годы XXI в. осуществлялось в различных зарубежных странах, таких как Китай, Тайвань, Сингапур, Италия, Франция, Исландия, а также в России (табл.).

Характеристика многофункциональных многозальных культурно-зрелищных комплексов

Characteristics of multifunctional multiplex cultural and entertainment complexes

Наименование, годы строительства Name, years of construction	Место- нахождение Location	Число залов Number of halls	Число мест Number of seats	Общая площадь, м ² Total area, m ²	Число этажей Number of floors	Высота, м Height, m
Центр исполнительских искусств Wei-Wu-Ying, 2010–2018 Wei-Wu-Ying Center for Performing Arts, 2010–2018	Гаосюн, Тайвань Kaohsiung, Taiwan	4	5861	141 000	3	37,4
Национальный центр исполнительских искусств, 2001–2007 National Center for Performing Arts, 2001–2007	Пекин, Китай Beijing, China	3	5473	217 500	6	46,6
Эспланада — театр в заливе, 1996–2001 Esplanade — Theatre in the Bay, 1996–2001	Сингапур Singapore	6	5290	60 000	4	38,0
Центр La Seine Musicale, 2014–2017 La Seine Musicale Center, 2014–2017	Париж, Франция Paris, France	2	5150	36 500	9	72,5
Аудиториум Parco della Musica, 1996–2002 Parco della Musica Auditorium, 1996–2002	Рим, Италия Rome, Italy	4	4850	55 000	4	34,0

Наименование, годы строительства Name, years of construction	Место- нахождение Location	Число залов Number of halls	Число мест Number of seats	Общая площадь, м ² Total area, m ²	Число этажей Number of floors	Высота, м Height, m
Большой театр Цзинань, 2010–2013 Jinan Grand Theatre, 2010–2013	Цзинань, Китай Jinan, China	3	3900	72 000	4	38,0
Концертный зал «Харпа», 2007–2011 Harpa Concert Hall, 2007–2011	Рейкьявик, Исландия Reykjavík, Iceland	4	3285	28 000	8	43,0
Московский международный Дом музыки, 2000–2002 Moscow International House of Music, 2000–2002	Москва, Россия Moscow, Russia	4	3056	42 000	10	46,0
Концертный зал «Зарядье» 2015–2018 Zaryadye Concert Hall, 2015–2018	Москва, Россия Moscow, Russia	2	1950	25 600	4	34,0

Из таблицы видно, что многофункциональные культурно-зрелищные комплексы являются многозальными и могут включать: два зрительных зала (Центр La Seine Musicale, концертный зал «Зарядье»), три зала (Национальный центр исполнительских искусств в Пекине, Большой театр Цзинань), четыре зала (Аудиториум Parco della Musica, Центр исполнительских искусств Wei-Wu-Ying, концертный зал «Харпа», Московский международный Дом музыки), шесть залов (Эспланада — театр в заливе). Наибольшую вместимость (более 5000 мест) имеют Центры исполнительских искусств в Гаосюне, Пекине, Сингапуре и Париже. Самые крупные комплексы по общей площади — Центры исполнительских искусств в Пекине (217 500 м²) и Гаосюне (141 000 м²).

Выявлено, что современные культурно-зрелищные комплексы вобрали в себя множество общественных функций и сегодня являются одним из развитых типов многофункциональной архитектуры. Кроме основной зрелищной функции (концертные залы, театры) в состав всех исследуемых комплексов входят объекты сервисного обслуживания (предприятия питания и торговли), административно-бытовые помещения. Объекты культурно-просветительского назначения (музейные и выставочные пространства, библиотеки) входят в состав Центров исполнительских искусств в Гаосюне, Пекине, Сингапуре, Москве (ММДМ). В концертный зал и конференц-центр «Харпа» также включены объекты делового назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ показал, что современные многофункциональные культурно-зрелищные комплексы играют важную градообразующую роль в композиционной

структуре города. Выявлены следующие особенности градостроительного размещения:

- в качестве элемента для формирования комплекса общественного и культурного центра (Московский международный Дом музыки — ключевой элемент масштабного архитектурно-культурного ансамбля «Красные холмы»; концертный зал «Крокус Сити Холл» — в составе делового центра «Крокус-Сити»);

- в сочетании с общественным рекреационным пространством (концертный зал «Зарядье», расположенный в природно-ландшафтном парке; Центр исполнительских искусств Wei-Wu-Ying — в городском парке; Большой театр Цзинань — в Центральном парке);

- в границах прибрежной территории (концертный зал и конференц-центр «Харпа», расположенный в гавани Рейкьявика, Центр искусств «Эспланада» — на набережной залива Марина-Бэй, Культурный центр La Seine Musicale — на о-ве Сеген на р. Сена);

- в архитектурно-исторической городской среде (Национальный центр исполнительских искусств в Пекине, расположенный в историческом центре китайской столицы в непосредственной близости от площади Тяньаньмэнь и Дома народных собраний; Аудиториум Parco della Musica — в историческом центре Рима, между берегами р. Тибр) [18].

Анализ современного состояния культурно-зрелищных комплексов на основе наиболее выдающихся примеров зарубежной и отечественной практики проектирования и строительства продемонстрировал, что основными тенденциями развития комплексов такого типа являются проектирование и строительство масштабных многофункциональных центров с созданием нескольких

обособленных сцен и залов, разного размера, формата, технологий рассадки зрителей, асимметричных по композиции и с высокоразвитой инфраструктурой [19]. Исследуемые культурно-зрелищные здания делятся на многофункциональные многозальные комплексы и многофункциональные концертные залы. Многозальные комплексы включают от двух до шести зрительных залов; концертный зал «Крокус Сити Холл» имеет один зал-трансформер, в котором возможно пятнадцать вариантов размещения зрительских мест.

Уникальность многофункциональных культурно-зрелищных комплексов заключается в едином объемно-планировочном решении, ядром которого выступает зрительный зал; объединение всех частей комплекса в единое композиционное решение. Ключевая объемно-пространственная задача — найти наиболее подходящую связь между ядром (зрительным залом и сценой) и остальными частями здания [20]. Эта задача может решаться несколькими путями — размещение зрительных залов и остальных частей здания в одном объеме (концертные залы «Харпа», «Зарядье»), в нескольких объемах на стилобате, который включает в себя все служебные помещения (Большой театр Цзинань, Аудиториум Parco della Musica).

Особенностью объемно-пространственной структуры современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов служит тип размещения в городе: горизонтальный и вертикальный [21]. Примерами горизонтального размещения могут служить Центры исполнительских искусств Wei-Wu-Ying и «Эспланада». При вертикальной пространственной структуре зрительные залы могут размещаться на разных уровнях (концертный зал Auditorium и многофункциональный зал Grande Seine в Культурном центре La Seine Musicale, Большой концертный зал над Камерным в Московском Доме музыки), что обусловлено стесненными земельными участками.

При проектировании и строительстве многофункциональных культурно-зрелищных комплек-

сов, рассмотренных в качестве примеров, выявлена тенденция совершенствования конструктивных решений зданий за счет применения металлических перекрестно-стержневых пространственных конструкций, светопрозрачных большепролетных конструкций, оболочек различных типов в качестве покрытий и перекрытий сооружений, панорамного остекления, ультрасовременных материалов конструктивных элементов.

Повышены требования как к внешнему облику зданий, так и к их интерьеру. Комплексы отличаются ультрасовременными формами, доминирующими являются переливающиеся изгибы здания, которые соединяются с естественным или искусственно созданным ландшафтом, гармонируя с окружающей местностью. Важно применение светового дизайна для создания динамического архитектурного эффекта. В отдельных странах прослеживается тенденция по использованию мотивов национальной архитектуры (Китай, Исландия), что может стать перспективным направлением в проектировании.

В ходе исследования выявлено, что в настоящее время в современной архитектурной практике проектирования и строительства многофункциональных культурно-зрелищных зданий особую актуальность приобретает экологическое проектирование с максимальным использованием всего спектра технологий, приемов, направленных на формирование здоровой, комфортной и безопасной среды для жизнедеятельности человека, рациональное и безотходное применение энергоресурсов в здании, равновесное взаимодействие архитектурно-строительных элементов здания и природной среды. Примерами экопозитивных культурно-зрелищных комплексов являются Центр исполнительских искусств в Гаосюне с многоуровневой зеленой кровлей; Культурный центр La Seine Musicale с 45-метровым «парусом» из фотоэлектрических панелей и зеленой кровлей, концертный зал «Зарядье», эксплуатируемая озелененная кровля которого покрыта структурным светопрозрачным покрытием — стеклянной «корой» с солнечными батареями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Макарова Е.Е., Анисимов А.В. Экспериментальный театральный центр — театральное здание будущего // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2019. № 1 (46). С. 160–174. URL: http://marhi.ru/AMIT/2019/1kvart19/12_makarova_anisimov/index.php
2. Gerigk M. Multi-criteria approach in multifunctional building design process // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 245. P. 052085. DOI: 10.1088/1757-899X/245/5/052085
3. Gerigk M. Multi-functional as a factor of rational use of urban space // *Zeszyty Naukowe Politechniki. Inżynieria Lądowa i Wodna*. 2015. Vol. 3 (637). Pp. 51–58.
4. Дуцев М.В. Концепция архитектуры современного Центра искусств. История. Теория. Практика : монография. Saarbrücken, Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. 192 с.
5. Ермакова Е.В., Рынкoвская М.И. Формирование пластики оболочек в концертном зале // *Известия КГАСУ*. 2019. № 3 (49). С. 53–61.
6. Van Uffelen C. *Performance Architecture + Design*. Salenstein : Braun, 2010. 301 p.

7. Xue C.Q., Sun C., Zhang L. Grand theatres in China: a Mosaic analysis of database // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2020. Vol. 19. Issue 6. Pp. 700–713. DOI: 10.1080/13467581.2020.1773272
8. Staples D. *Modern theatres 1950–2020*. New York : Routledge Publ., 2021. 594 p.
9. Avlar E. Bir Adada Dönüşüm Pratiği: La Seine Musicale // *Yapı*. 2022. Vol. 478. Pp. 22–26.
10. Hofmann M. La Seine Musicale — Das neue Musikzentrum an der Seine // *23 Internationales Holzbau-Forum*. 2017.
11. Колодников И.В. Дерево в современных проектах оперных театров и концертных залов: основные направления развития архитектуры и дизайна // *Terra artis. Искусство и дизайн*. 2021. № 3. С. 6–19. DOI: 10.53273/27128768_2021_3_06
12. Andreu P. *Archi Memories*. Beijing : CITIC Press, 2015. 302 p.
13. Петрушихина С.В. Сенсорная природа архитектурной образности в творчестве Олафура Элиассона // *Художественные миры XXI века. Пути интеграции архитектуры и арт-практик : коллективная монография*. М. : Общество с ограниченной ответственностью «БуксМАрт», 2019. С. 368–381.
14. Анисимов А.В. *Театральные здания Москвы. История и архитектура : монография*. М. : КУРС, 2017. 384 с.
15. Баталов А.Л., Беляев Л.А., Нащокина М.В. *Зарядье : монография*. М., 2017. 344 с.
16. Илевская М.М. Interrelation of architectural concepts and principles of artificial lighting in the Moscow concert hall Zaryadye // *Light & Engineering*. 2019. Pp. 4–13. DOI: 10.33383/2018-117
17. Грачев Р.В. Уникальность концертного зала «Крокус Сити Холл» // *Образование. Наука. Научные кадры*. 2015. № 3. С. 114–116.
18. Кузнецов П.Э., Диденко С.В. Особенности формирования культурно-зрелищного комплекса в пространственной городской среде // *Научный Лидер*. 2022. № 6 (51). URL: <https://scilead.ru/article/1723-osobennosti-formirovaniya-kulturno-zrelischn>
19. Beranek L.L. Concert hall design: new findings // *Proceedings of the Institute of Acoustics*. 2014. Vol. 3 (36). Pp. 1–21.
20. Кузнецов П.Э. Анализ архитектуры современных многофункциональных культурно-зрелищных комплексов и тенденции их развития // *Безопасный и комфортный город : сб. науч. тр. по мат. V Междунар. науч.-практ. конф.* 2022. С. 47–54.
21. Ануфриева П.С. Современные тенденции развития многофункциональных театральнo-зрелищных комплексов // *Наука, образование и экспериментальное проектирование*. 2021. № 1. С. 198–200. DOI: 10.24412/cl-35672-2021-1-0043

Поступила в редакцию 22 декабря 2022 г.

Принята в доработанном виде 2 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Татьяна Николаевна Колесникова** — доктор архитектуры, доцент, заведующая кафедрой архитектуры; **Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева)**; 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95; kolesnikovoj@yandex.ru;

Павел Эдуардович Кузнецов — магистрант; **Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева)**; 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95; pavel19980915@gmail.ru.

Вклад авторов:

Колесникова Т.Н. — научное руководство, концепция исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Кузнецов П.Э. — методология, сбор и обработка данных, написание научной статьи, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Makarova E., Anisimov A. Experimental theater center — theatre building of the future. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2019; 1(46):160–174. URL: http://marhi.ru/AMIT/2019/1kvart19/12_makarova_anisimov/index.php (rus.).
2. Gerigk M. Multi-criteria approach in multifunctional building design process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 245:052085. DOI: 10.1088/1757-899X/245/5/052085
3. Gerigk M. Multi-functional as a factor of rational use of urban space. *Zeszyty Naukowe Politechniki. Inżynieria Lądowa i Wodna*. 2015; 3(637):51–58.
4. Ducev M.V. *The concept of the architecture of the modern Art Center. Story. Theory. Practice : monograph*. Saarbrücken, Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012; 192. (rus.).
5. Ermakova E.V., Rynkovskaya M.I. Formation of shell's plasticity in the concert hall. *News of the Ka-*

zan State University of Architecture and Engineering. 2019; 3(49):53-61. (rus.).

6. Van Uffelen C. *Performance Architecture + Design*. Salenstein, Braun, 2010; 301.

7. Xue C.Q., Sun C., Zhang L. Grand theatres in China: a Mosaic analysis of database. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2020; 19(6):700-713. DOI: 10.1080/13467581.2020.1773272

8. Staples D. *Modern Theatres 1950-2020*. New York, Routledge Publ., 2021; 594.

9. Avlar E. Bir Adada Dönüşüm Pratiği: La Senie Musicale. *Yapi*. 2022; 478:22-26.

10. Hofmann M. La Seine Musicale — Das neue Musikzentrum an der Seine. *23 Internationales Holzbau-Forum*. 2017.

11. Kolodnikov I.V. Wood in modern construction projects of opera houses and concert halls: major developmental trajectories of architecture and design. *Terra Artis. Art and Design*. 2021; 3:6-19. DOI: 10.53273/27128768_2021_3_06 (rus.).

12. Andreu P. *Archi Memories*. Beijing, CITIC Press. 2015; 302.

13. Petrushikhina S.V. The sensory essence of architectural imagery in Olafur Eliasson's artworks. *Art Worlds of the 21st Century. Ways of Integrating Architecture and Art Practices: collective monograph*. Moscow, Limited Liability Company "BooksMArt", 2019; 368-381. (rus.).

14. Anisimov A.V. *Theatrical buildings in Moscow. History and architecture: monograph*. Moscow, KURS, 2019; 384. (rus.).

15. Batalov A.L., Belyaev L.A., Nashchokina M.V. *Zaryadye : monograph*. Moscow, 2017; 344. (rus.).

16. Ilyevskaya M.M. Interrelation of architectural concepts and principles of artificial lighting in the Moscow concert Hall Zaryadye. *Light & Engineering*. 2019; 4-13. DOI: 10.33383/2018-117

17. Grachev R.V. The Uniqueness of the concert hall "Crocus City Hall". *Education. The science. Scientific personnel*. 2015; 3:114-116. (rus.).

18. Kuznetsov P.E., Didenko S.V. Features of the formation of a cultural and entertainment complex in a spatial urban environment. *Scientific Leader*. 2022; 6(51). URL: <https://scilead.ru/article/1723-osobennosti-formirovaniya-kulturno-zrelischn> (rus.).

19. Beranek L.L. Concert hall design: new findings. *Proceedings of the Institute of Acoustics*. 2014; 3(36):1-21.

20. Kuznetsov P.E. Analysis of the architecture of modern multifunctional cultural and entertainment complexes and trends in their development. *Safe and comfortable city: collection of scientific papers based on the materials of the V international scientific and practical conference*. 2022; 47-54. (rus.).

21. Anufrieva P.S. Modern trends in the development of multifunctional entertainment facilities. *Science, Education and Experimental Design*. 2021; 1:198-200. DOI: 10.24412/cl-35672-2021-1-0043 (rus.).

Received December 22, 2022.

Adopted in revised form on March 2, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

B I O N O T E S : **Tatyana N. Kolesnikova** — Doctor of Architecture, Associate Professor, Head of the Department of Architecture; **Orel State University named after I.S. Turgenev**; 95 Komsomolskaya st., Orel, 302026, Russian Federation; kolesnikovoj@yandex.ru;

Pavel E. Kuznetsov — master; **Orel State University named after I.S. Turgenev**; 95 Komsomolskaya st., Orel, 302026, Russian Federation; pavel19980915@gmail.ru.

Contribution of the authors:

Tatyana N. Kolesnikova — scientific management, research concept, scientific editing of the text, final conclusions.

Pavel E. Kuznetsov — methodology, data collection and processing, writing a scientific article, final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

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

RESEARCH PAPER / НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.07

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.358-366

Assessment on the structural impact of the slabs with joists used in the reinforced concrete structures in Burundi

Emmanuel Mikerego¹, Trésor Akimana², Jean Pierre Gatore²

¹ University of Burundi; Bujumbura, Burundi;

² High Normal School (ENS); Bujumbura, Burundi

ABSTRACT

Introduction. This paper addresses the effect of reinforced concrete slabs with joists on the behavior of reinforced concrete buildings.

Materials and methods. Firstly, models of 3-storey, 6-storey, 9-storey and 12-storey buildings were used to determine internal longitudinal forces in the most heavily loaded column on the ground floor and to identify the unloading action of slabs with joists. Secondly, natural periods of the structures were identified by solving the modal equation of vibration in reinforced concrete building models to identify the effect of the unloading action on the flexibility of a reinforced concrete building. Tables and diagrams were used to analyze and interpret the results.

Results. For the ratio of 4.72 between the weight of one square meter of a reinforced concrete slab and the weight of joists used in one square meter of the slab, the unloading effect varies from 15.18 to 16.78 % and from 15.74 to 16.10 % in the columns, respectively, for the ultimate limit state and the serviceability limit state of a reinforced concrete building. The unloading action, induced by the slabs with joists, reduces the flexibility of a reinforced concrete building. Flexibility reductions are illustrated by reductions of the values of the natural periods from 6.74 to 6.98 % for the 3-storey building, from 5.77 to 6.74 % for the 6-storey building, from 5.36 to 6.56 % for the 9-storey building and from 4.26 to 7.84 % for the 12-storey building.

Conclusions. The use of slabs with joists reduces the mass by 15 % and has an unloading effect on a reinforced concrete structure; it also boosts the building flexibility by 6 % and deteriorates the deformability due to the non-linear behaviour of concrete.

KEYWORDS: slabs with joists, concrete, unloading effect, natural periods of the structure, reinforced concrete buildings, flexibility of a building, deformability of a reinforced concrete building

FOR CITATION: Mikerego E., Akimana T., Gatore J.P. Assessment on the structural impact of the slabs with joists used in the reinforced concrete structures in Burundi. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):358-366. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.358-366 (rus.).

Corresponding author: Emmanuel Mikerego, mikeregoemmanuel@hotmail.com.

Оценка влияния плит перекрытия со встроенными пустотелыми кирпичами, используемыми в железобетонных зданиях в Бурунди

Эммануэль Микерего¹, Трезор Акимана², Жан Пьер Гаторе²

¹ Университет Бурунди; г. Бужумбура, Бурунди;

² Высшая педагогическая школа; г. Бужумбура, Бурунди

АННОТАЦИЯ

Введение. Показано влияние железобетонных плит перекрытия со встроенными пустотелыми кирпичами на работу железобетонных зданий.

Материалы и методы. На первом этапе на основе 3-этажной, 6-этажной, 9-этажной и 12-этажной моделей железобетонных конструкций определялись продольные внутренние силы в наиболее нагруженной колонне первого этажа с целью выявления разгрузочного воздействия от плит перекрытий со встроенными пустотелыми кирпичами. На втором этапе собственные периоды колебания устанавливались путем решения модального уравнения колебания моделей исследуемых железобетонных зданий для выявления влияния плит перекрытий со встроенными

пустотелыми кирпичами на гибкость железобетонных зданий. Таблицы и диаграммы использовались для анализа и интерпретации полученных результатов исследования.

Результаты. При отношении, равном 4,72 массы квадратного метра железобетонной плиты к массе пустотелых кирпичей, используемых в квадратном метре плиты перекрытия, установлено разгружающее воздействие от применения плит перекрытий со встроенными пустотелыми кирпичами. Плиты перекрытий со встроенными пустотелыми кирпичами приводят к снижению в пределах 15,18–16,78 % и 15,74–16,10 % продольных сил в более нагруженной колонне первого этажа, соответственно при первом и втором расчетных предельных состояниях. Установленное разгружающее воздействие влечет увеличение гибкости железобетонных зданий, что подтверждается периодами собственных колебаний исследованных моделей зданий. Собственные периоды колебания уменьшаются в пределах 6,74–6,98 % для 3-этажного здания, от 5,77–6,74 % для 6-этажного здания, 5,36–6,56 % для 9-этажного здания и 4,26–7,84 % для 12-этажного здания.

Выводы. Использование железобетонных плит перекрытия со встроенными пустотелыми кирпичами приводит к облегчению и разгрузению железобетонного здания с одной стороны, а с другой — к увеличению его гибкости, что вызывает ухудшение его деформативности из-за нелинейного поведения бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: плиты перекрытия со встроенными пустотелыми кирпичами, бетон, разгружающий эффект, собственные периоды колебания здания, железобетонные здания, гибкость здания, деформативность железобетонного здания

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Микерего Э., Акимана Т., Гаморе Ж.П. Assessment on the structural impact of the slabs with joists used in the reinforced concrete structures in Burundi // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 358–366. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.358-366

Автор, ответственный за переписку: Эммануэль Микерего, mikeregoemmanuel@hotmail.com.

INTRODUCTION

The use of slabs with joists in reinforced concrete buildings is becoming increasingly popular in Burundi. In these slabs, some of the concrete volume of slabs is replaced by locally produced joists. This practice raises the issue of the effect of such slabs on the static and dynamic behavior of reinforced concrete structures.

Generally, slabs used to make reinforced concrete structures are conventional slabs, flat slabs, hollow core slabs and composite slabs. Foreign researchers assume that different types of slabs, used in reinforced concrete structures, affect the engineering and economic parameters of the buildings in question [1–4]. The evaluation of effects of different slab types encompasses the effect of slab types on the static and dynamic behaviour of reinforced concrete buildings [5–7]. Studies address the effect of different slab types on the building behaviour, especially on the seismic behaviour of reinforced concrete buildings [8–11]. Comparative studies, including numerical simulation studies, also confirm the effect of different slab types on the seismic response of reinforced concrete buildings [12–16]. Research literature highlights that the structural performance of reinforced concrete buildings depends on different slab types used in these structures [17–20].

Even though research works show that slab types have an effect on the static and dynamic behaviour of reinforced concrete buildings, there are few studies on

the effect of slabs with joists on the structural behaviour of reinforced concrete structures. Some studies address the design of slab with joists, but they fail to analyze their effect on the structural behaviour [21] of reinforced concrete buildings. Therefore, the problem of the use of slabs with joists is still relevant. Therefore, the authors analyze variations of normal forces in columns to identify the unloading action induced by the presence of slabs with joists. Besides, variations of natural vibrations are identified to find the effect of the slabs with joists on the flexibility and stability of reinforced concrete buildings.

MATERIALS AND METHODS

In Burundi, the use of slabs with joists is an increasingly widespread practice. The geometrical and physical characteristics of the most widely used joists are provided in the Table 1.

In the slabs with joists, some concrete is replaced with joists, placed under the concrete (Fig. 1).

In this study, four models (Fig. 2) were considered to investigate the effect of slabs with joists on the longitudinal forces in the columns and on natural periods of reinforced concrete structures.

Geometrical characteristics of structural elements of the studied models were determined using pre-dimensioning (Table 2).

Table 1. Geometrical characteristics and weight of widely used joists in reinforced concrete building in Burundi

Used joists in the slab	Length, cm	Wide, cm	Height, cm	Weight, kg	Quantity in the slab, joists/m ²	Weights ratio by 1 m ² of the slab
	30	30	13	10	9	$\left(\frac{\text{Weight}_{\text{concrete}}}{\text{Weight}_{\text{joists}}} \right) = 4.72$



Fig. 1. Photo illustrating a slab with joists in a reinforced concrete building under construction in Burundi

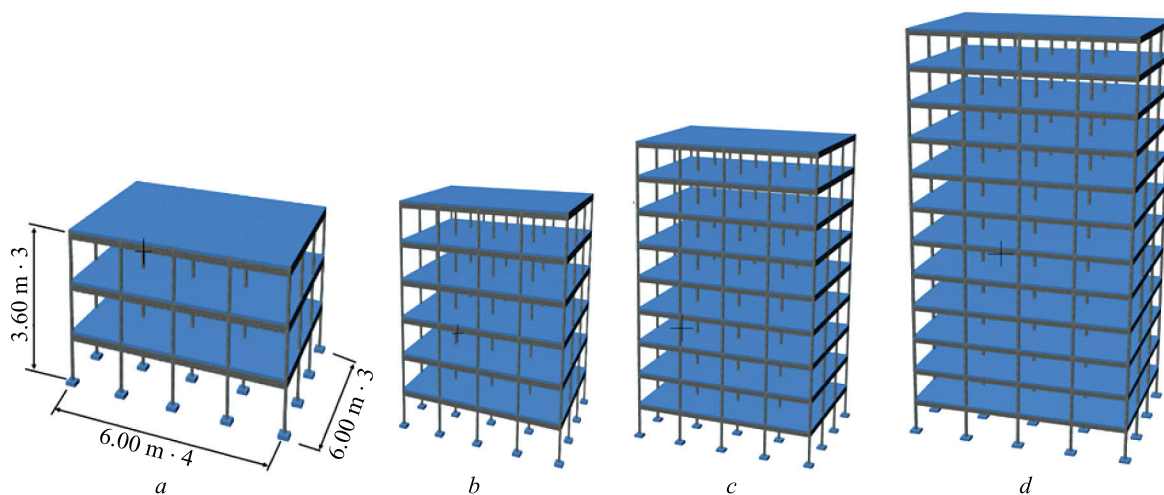


Fig. 2. Case of 3-storey (a), 6-storey (b), 9-storey (c) and 12-storey (d) building models used to evaluate the effect of slabs with joists on reinforced concrete buildings

Table 2. Geometrical characteristics of structural elements of the studied building models

Structural element	Model (a) with 3 storey, cm	Model (b) with 6 storey, cm	Model (c) with 9 storey, cm	Model (d) with 12 storey, cm
Compression table	4	4	4	4
Slab without joists	17	17	17	17
Height of joists	13	13	13	13
Main beams	30 × 50	30 × 50	30 × 50	30 × 50
Columns	30 × 30	45 × 45	55 × 55	60 × 60

The main component of compression rigidity EA and flexural rigidity EI of structural elements of the studied models were determined on the basis of the cross-sections and the longitudinal deformation modulus E of standard concrete with compressive strength f_{c28} equal to 25 MPa (1):

$$E = 11,000 \sqrt[3]{f_{c28}} = 32,164 \text{ MPa.} \quad (1)$$

Longitudinal forces N in the most heavily loaded column on the ground floor were used as the static parameter studied in accordance with the design limit state considered according to Eurocode 1 (EN 1991-1-1(2002)). In case of the ultimate limit state, the vertical load N_u , acting on a given column, was constituted by dead loads G and exploitation load Q for residential buildings acting in the loading area on the above n levels (2):

$$N_u = \sum_n (\gamma_g \cdot G + \gamma_Q \cdot Q), \quad (2)$$

where G is the global dead load from constructive elements loading columns on a given floor: $G = 8.27 \text{ kN/m}^2$ and $G = 6.54 \text{ kN/m}^2$ for slabs without joists and for slabs with joists, respectively; Q is the exploitation load for residential buildings $Q = 1.5 \text{ kN/m}^2$; γ_g, γ_Q are security coefficients for the ultimate state limit: $\gamma_g = 1.35$; $\gamma_Q = 1.50$.

For the serviceability limit state, the vertical load N_{ser} , acting on a given column, was constituted by dead loads G and exploitation load Q for residential buildings 1.5 kN/m^2 , acting in the loading area on the above n levels (3):

$$N_{ser} = \sum_n (\gamma_g \cdot G + \gamma_Q \cdot Q), \quad (3)$$

with γ_g, γ_Q as security coefficients in the serviceability limit state: $\gamma_g = 1, \gamma_Q = 1$.

To determine the dynamic parameters, inertial masses m were determined for a given floor using (4):

$$m = G + \beta Q, \quad (4)$$

where G are dead loads of constructive elements; Q is the exploitation load on a given floor for residential buildings; β is part of the exploitation load taken in analysis $\beta = 0.25$.

Natural pulsations of vibration ω of the studied building models are obtained each time by solving the modal equation or the characteristic equation (4) using Mathcad 14 (5):

$$[K] - \omega^2 [M] \{U\} = 0, \quad (5)$$

where $[K]$ is the structure stiffness matrix; ω are the own pulsations of the structure, $[M]$ is the structural mass matrix; $\{U\}$ are the displacement matrices for floors.

The elementary stiffness k for embedded columns was calculated using expression (6):

$$k = 12EI/h^3, \quad (6)$$

where E is the longitudinal deformation modulus of concrete; I is the bending inertia of the cross-section of the column; h is the height of the column.

Natural periods of vibration T were obtained for each case of the model of the reinforced concrete building using (7):

$$T = 2\pi/\omega. \quad (7)$$

To make the analysis and interpret the results, diagrams of longitudinal forces in the most heavily loaded column of the ground floor and periods of natural vibrations were drawn using the tables that contain the research findings.

RESULTS OF THE RESEARCH

In this study, models of 3, 6, 9 and 12-storey reinforced concrete buildings were analysed. The results

were presented in tables. Below is Table 3, showing internal forces in the most loaded column of the ground floor and Tables 4 showing natural periods of the structures. The diagrams (Fig. 3–5) allow conducting the analysis and interpret its results.

Table 3. Longitudinal forces in the most loaded column of the ground floor for ultimate limit and serviceability limit states

Building model, storey	Longitudinal forces N at ultimate limit state, kN		Longitudinal forces N at serviceability limit state, kN	
	Slab without joists	Slab with joists	Slab without joists	Slab with joists
3	1665.83	1412.87	1210.90	1023.57
6	3250.80	2744.87	2364.00	1989.24
9	4811.71	4052.82	3505.23	2943.09
12	6381.69	5369.84	4653.18	3903.66

Table 4. Natural periods values in the 3, 6, 9 and 12 storey model of a reinforced concrete building with slabs with or without joists

Building model, storey	Natural periods, s	Slab without joists	Slab with joists
3	T_1	0.76	0.71
	T_2	0.27	0.26
	T_3	0.19	0.18
6	T_1	0.64	0.60
	T_2	0.22	0.20
	T_3	0.14	0.13
	T_4	0.10	0.10
	T_5	0.09	0.08
	T_6	0.08	0.08
9	T_1	0.64	0.60
	T_2	0.22	0.20
	T_3	0.13	0.12
	T_4	0.10	0.09
	T_5	0.08	0.07
	T_6	0.07	0.06
	T_7	0.06	0.06
	T_8	0.06	0.05
	T_9	0.05	0.05
12	T_1	1.10	1.03
	T_2	0.27	0.25
	T_3	0.14	0.14
	T_4	0.13	0.12
	T_5	0.10	0.09
	T_6	0.08	0.07
	T_7	0.06	0.06
	T_8	0.06	0.05
	T_9	0.06	0.05
	T_{10}	0.05	0.05
	T_{11}	0.05	0.05
	T_{12}	0.05	0.04

The findings (Table 3) show that the presence of joists leads to a reduction in longitudinal forces N transmitted in the columns. The reduction in longitudinal forces in the range of 15.18 to 15.85 % in the most loaded ground floor column is identified for the ultimate limit state of the studied building models. The diagram (Fig. 3, *a, b*) shows how slabs with joists generate an unloading action in the columns of a reinforced concrete structure.

Similarly, there is a reduction in longitudinal forces N in the range of 15.74 to 16.10 % in the most loaded column on the ground floor for the case of the serviceability limit state of all studied building models (Fig. 4, *a, b*).

The unloading action, triggered by the presence of slabs with joists, leads to a reduction in natural periods values of all studied building models. Consequently, it can be said that reinforced concrete structures, that

have slabs with joists, become more flexible. Slabs with joists add flexibility to reinforced concrete structures.

Dynamic characteristics (Table 4) show that natural periods values are reduced in the range of 6.74 to 6.98 % for the 3-storey building model (Fig. 5, *a*).

Additional flexibility of structures, induced by the presence of slabs with joists, is manifested by a reduction in natural periods of vibration in the range from 5.77 to 6.74 % for the 6-storey building model (Fig. 5, *b*).

Also, additional flexibility of a reinforced concrete building, having slabs with joists, is identified by a reduction in natural periods values in the range from 5.36 to 6.56 % in a 9-storey building model (Fig. 5, *c*).

For the 12-storey building model, additional flexibility, generated by the unloading effect of the presence of slabs with joists, is illustrated by a reduction in natural periods values in the range from 4.26 to 7.84 % (Fig. 5, *d*).

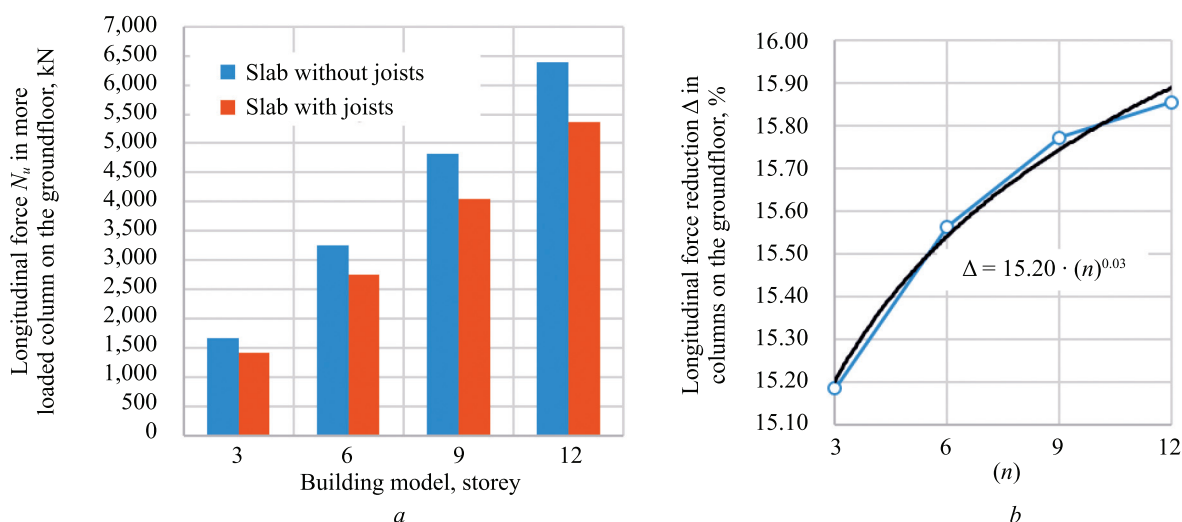


Fig. 3. Longitudinal forces in the case of the ultimate state limit (*a*) in the most loaded column and the function describing the variation of longitudinal forces (*b*)

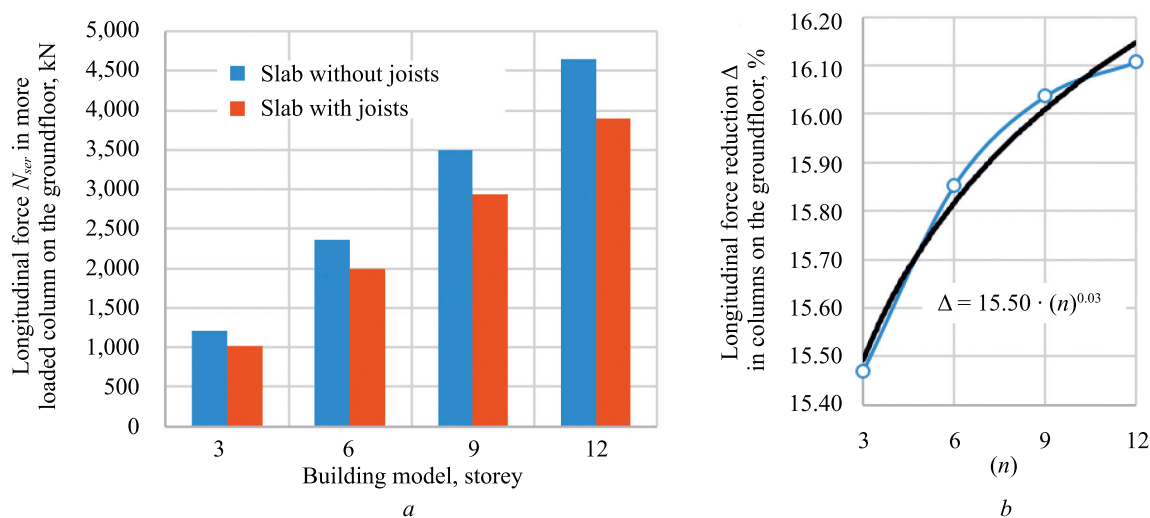


Fig. 4. Longitudinal forces in the case of the service state limit (*a*) in the most loaded column and the function describing the effect of slabs with joists on longitudinal forces (*b*) in columns

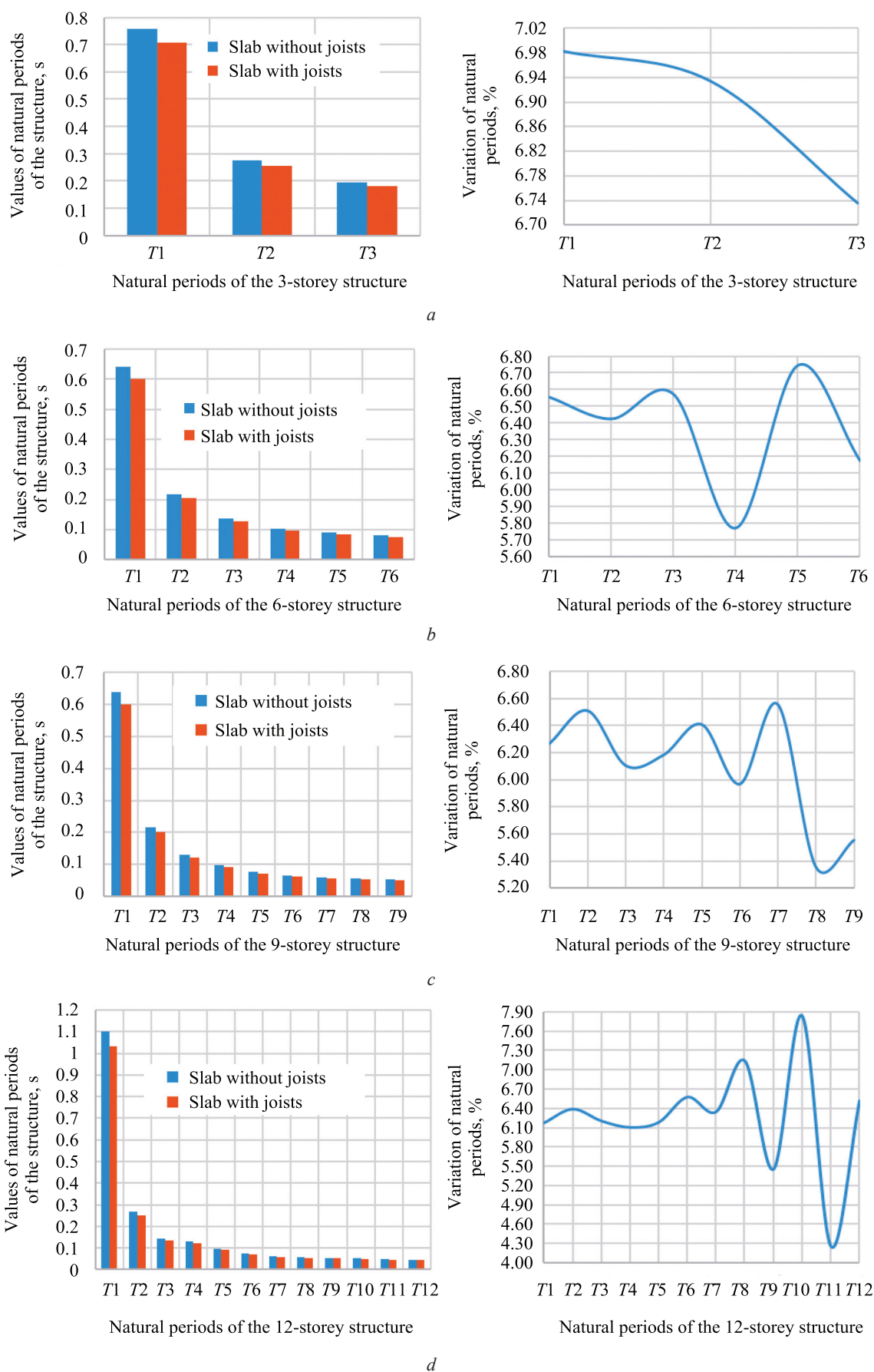


Fig. 5. Natural periods values and their variation in a building model: *a* — 3-storey; *b* — 6-storey; *c* — 9-storey; *d* — 12-storey

CONCLUSION AND DISCUSSION

The use of slabs with joists in a reinforced concrete structure has an effect on its static and dynamic behaviours. Statically, the unloading effect of (15 %) is identified in structures, having slabs with joists. A reduction in natural periods values in a reinforced concrete structure, having slabs with joists, leads to the additional flexibility of (6 %). The additional flexibility aggravates the deformability of the reinforced concrete structure due to the non-elastic behaviour of concrete. Therefore,

slabs with joists make the structure less heavy and have a negative effect on the deformability of a reinforced concrete structure. Consequently, non-structural filling elements will be more subjected to damages in reinforced concrete structures that have slabs with joists. Therefore, structural solutions are needed to ensure the physical integrity and continued serviceability of non-structural fillings in reinforced concrete buildings that have slabs with joists, that are built on compressible soils and or in seismic zones.

REFERENCES

1. Pawar A.V., Patil A.C., Ghutukade K.B., Sherkar S.S., Gidd M.M. Techno-economic study of different type of slab. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2018; 05(03):1577-1582.
2. Tunç G., Azizi A.B., Tanfener T. Effects of slab types on the seismic behavior and construction cost of RC Buildings. *Journal of Polytechnic*. 2021. DOI: 10.2339/politeknik.971343
3. Gürsoy Ş., Uludağ Ö. Investigation of the effects on earthquake behavior and rough construction costs of the slab type in reinforced concrete buildings. *Advances in Concrete Construction*. 2020; 10(4):333-343. DOI: 10.12989/acc.2020.10.4.333
4. Bhaduria S.S., Chhugani N. Comparative analysis and design of flat and grid slab system with conventional slab system. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017; 04(08):2314-2329.
5. Keles Y., Kasap H., Yaman Z. Evaluating the effects of different slab types on static and dynamic characteristics of structures. *Challenge Journal of Structural Mechanics*. 2021; 7(2):71. DOI: 10.20528/cjsmec.2021.02.003
6. Ozturk T., Ozturk Z. The effects of the type of slab on structural system in the multi-storey reinforced concrete buildings. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. 2008.
7. Eşki H., University-Cerrahpaşa İ., Sayın B., Güneş B. The effect on structural behavior of different slab types for RC buildings. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*. 2020; 3(1):41-48. DOI: 10.31462/jseam.2020.01041048
8. Gupta U., Ratnaparkhe S., Gome P. Seismic behaviour of buildings having flat slabs with drops. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012; 2(10).
9. Bakale M., Viswanathan T.S. Seismic behavior of multi-story structure with different types of slabs. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017; 8(4):507-517.
10. Uzun D., Guler K. Seismic behavior of a high rise RC building with different types of slabs. *16th European Conference on Earthquake Engineering*. 2018.
11. Prakasam M.L., Raju V.S.R. Effect of soil structure interaction on seismic behavior of multi-storey [G+5] building with different types of slabs. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2018; 05(05):3497-3502.
12. Sawwalakhe A.K., Pachpor P.D. Comparative study of conventional slab, flat slab and grid slab using ETABS. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021; 1197(1):012020. DOI: 10.1088/1757-899X/1197/1/012020
13. Malviya S., Tiwar V.K. Comparative study of seismic behaviour of multi — storey buildings with flat slab, waffle slab, ribbed slab & slab with secondary beam. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*. 2021; 13(3):77-90.
14. Borkar S., Dabhekar K., Khedikar I., Jaju S. Analysis of flat slab structures in comparison with conventional slab structures. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. 2021; 822(1):012049. DOI: 10.1088/1755-1315/822/1/012049
15. Pethe M.D., Khedikar A. Comparative study of conventional slab, flat slab and waffle slab by using finite element method. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2022; 10(6):15-25. DOI: 10.22214/ijraset.2022.43714
16. Bedre Y.G., Shaikh S. Comparative study of flat slab and conventional slab structure based on seismic behaviour: A review. *Gradiva Review Journal*. 2022; 8(6):242-245.
17. Pradhana R.A., Pratama M.M.A., Santoso E., Karjanto A. Structural performance of multi-storey building using flat slab and conventional slab to seismic loads (Case study: Faculty building of Sport Science in Universitas Negeri Malang, Indonesia). *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 669(1):012053. DOI: 10.1088/1757-899X/669/1/012053
18. Khalaf M., El-Shihy A., Shehab H., Mustafa S. Structural behavior analysis of two-ways (Waffle) com-

posite slabs. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*. 2013; 2(12):47-54.

19. Starosta N.A. Justification of the application of lightweight monolithic reinforced concrete floors. *Young Scientist*. 2019; 6(244):22-28. (rus.).

20. Mahmoud S., Alqarni A., Saliba J., Ibrahim A.H., Magdy genidy, Diab H. Influence of floor sys-

tem on seismic behavior of RC buildings to forward directivity and fling-step in the near-fault region. *Structures*. 2021; 30:803-817. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.01.052

21. Shuraim A.B., Al-Negheimish A.I. Design considerations for joist floors with wide-shallow beams. *ACI Structural Journal*. 2011; 108(2). DOI: 10.14359/51664254

Received September 6, 2022.

Adopted in revised form on February 9, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

Bionotes: **Emmanuel Mikerego** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Faculty of Engineering Sciences; **University of Burundi**; B.P 2700, Bujumbura, Burundi; ORCID: 0000-0002-5743-6476; mikerego-emmanuel@hotmail.com;

Trésor Akimana — student; **High Normal School (ENS)**; Bujumbura, Burundi; akimanatresora@gmail.com;

Jean Pierre Gatore — master assistant; **High Normal School (ENS)**; Bujumbura, Burundi; gatorejeanpierre@yahoo.fr.

Contribution of the authors:

Emmanuel Mikerego — conceptualization, methodology, data processing, writing of the article, scientific editing of the text.

Trésor Akimana — conceptualization, methodology, data gathering and processing.

Jean Pierre Gatore — conceptualization, methodology, data processing.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pawar A.V., Patil A.C., Ghutukade K.B., Sherkar S.S., Gidd M.M. Techno-economic study of different type of slab // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2018. Vol. 05. Issue 03. Pp. 1577–1582.

2. Tunç G., Azizi A.B., Tanfener T. Effects of slab types on the seismic behavior and construction cost of RC buildings // *Journal of Polytechnic*. 2021. DOI: 10.2339/politeknik.971343

3. Gürsoy Ş., Uludağ Ö. Investigation of the effects on earthquake behavior and rough construction costs of the slab type in reinforced concrete buildings // *Advances in Concrete Construction*. 2020. Vol. 10. Issue 4. Pp. 333–343. DOI: 10.12989/acc.2020.10.4.333

4. Bhaduria S.S., Chhugani N. Comparative analysis and design of flat and grid slab system with conventional slab system // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 04. Issue 08. Pp. 2314–2329.

5. Keles Y., Kasap H., Yaman Z. Evaluating the effects of different slab types on static and dynamic characteristics of structures // *Challenge Journal of Structural Mechanics*. 2021. Vol. 7. Issue 2. P. 71. DOI: 10.20528/cjsmec.2021.02.003

6. Ozturk T., Ozturk Z. The effects of the type of slab on structural system in the multi-storey reinforced concrete buildings // *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. 2008.

7. Eşki H., University-Cerrahpaşa İ., Sayın B., Güneş B. The effect on structural behavior of different slab types for RC buildings // *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*. 2020. Vol. 3. Issue 1. Pp. 41–48. DOI: 10.31462/jseam.2020.01041048

8. Gupta U., Ratnaparkhe S., Gome P. Seismic Behaviour of Buildings Having Flat Slabs with Drops // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012. Vol. 2. Issue 10.

9. Bakale M., Viswanathan T.S. Seismic Behavior of Multi-Storey Structure with Different Types of Slabs // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8. Issue 4. Pp. 507–517.

10. Uzun D., Guler K. Seismic behavior of a high rise RC building with different types of slabs // *16th European Conference on Earthquake Engineering*. 2018.

11. Prakasam M.L., Raju V.S.R. Effect of Soil Structure Interaction on Seismic Behavior of Multi-Storey [G+5] Building with Different Types of Slabs // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2018. Vol. 05. Issue 05. Pp. 3497–3502.

12. Sawwalakhe A.K., Pachpor P.D. Comparative Study of Conventional Slab, Flat Slab and Grid Slab Using ETABS // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1197. Issue 1. P. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/1197/1/012020

13. Malviya S., Tiwar V.K. Comparative Study of Seismic Behaviour of Multi-Storey Buildings with Flat

Slab, Waffle Slab, Ribbed Slab & Slab with Secondary Beam // Journal of Xi'an University of Architecture & Technology. 2021. Vol. 13. Issue 3. Pp. 77–90.

14. Borkar S., Dabhekar K., Khedikar I., Jaju S. Analysis of flat slab structures in comparison with conventional slab structures // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 822. Issue 1. P. 012049. DOI: 10.1088/1755-1315/822/1/012049

15. Pethe M.D., Khedikar A. Comparative study of conventional slab, flat slab and waffle slab by using finite element method // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2022. Vol. 10. Issue 6. Pp. 15–25. DOI: 10.22214/ijraset.2022.43714

16. Bedre Y.G., Shaikh S. Comparative study of flat slab and conventional slab structure based on seismic behaviour: A review // Gradiva Review Journal. 2022. Vol. 8. Issue 6. Pp. 242–245.

17. Pradhana R.A., Pratama M.M.A., Santoso E., Karjanto A. Structural performance of multi-storey building using flat slab and conventional slab to seismic loads (Case study: Faculty building of Sport Science in Universitas Negeri Malang, Indonesia) // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 669. Issue 1. P. 012053. DOI: 10.1088/1757-899X/669/1/012053

18. Khalaf M., El-Shihy A., Shehab H., Mustafa S. Structural behavior analysis of two-ways (Waffle) composite slabs // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). 2013. Vol. 2. Issue 12. Pp. 47–54.

19. Староста Н.А. Обоснование применения облегченных монолитных железобетонных перекрытий // Молодой ученый. 2019. № 6 (244). С. 22–28.

20. Mahmoud S., Alqarni A., Saliba J., Ibrahim A.H., Magdy genidy, Diab H. Influence of floor system on seismic behavior of RC buildings to forward directivity and fling-step in the near-fault region // Structures. 2021. Vol. 30. Pp. 803–817. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.01.052

21. Shuraim A.B., Al-Negheimish A.I. Design considerations for joist floors with wide-shallow beams // ACI Structural Journal. 2011. Vol. 108. Issue 2. DOI: 10.14359/51664254

Поступила в редакцию 6 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 9 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Эммануэль Микерего** — кандидат технических наук, доцент факультета инженерных наук; **Университет Бурунди**; а.я. 2700, г. Бужумбура, Бурунди; ORCID: 0000-0002-5743-6476; mikeregoemmanuel@hotmail.com;

Трезор Акимана — студент; **Высшая педагогическая школа**; г. Бужумбура, Бурунди; akimanatresora@gmail.com;

Жан Пьер Гаторе — магистр-ассистент; **Высшая педагогическая школа**; г. Бужумбура, Бурунди; gatorejeanpierre@yahoo.fr.

Вклад авторов:

Микерего Э. — концептуализация, методология, обработка данных, написание статьи, научное редактирование текста.

Акимана Т. — концептуализация, методология, сбор и обработка данных.

Гаторе Ж.П. — концептуализация, методология, обработка данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.046:624.014

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378

Оценка расчетного значения несущей способности стальных элементов, проектируемых на основе численных моделей

Виталий Валерьевич Надольский

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Все более популярным становится применение численных моделей (ЧМ) для анализа поведения сложных или новых конструктивных решений. Появилось программное обеспечение, которое с легкостью позволяет создавать ЧМ конструкций даже новичку, что с одной стороны является неоспоримым плюсом, но с другой — вызывает опасения в отношении достоверности и надежности получаемых результатов. Нормативно-техническая база обходит стороной это направление; к тому же в научном и проектном сообществах отсутствует единообразие подходов к созданию моделей и, что более важно, к интерпретации результатов и обеспечению конструкционной надежности принятых решений.

Материалы и методы. Предложен метод оценки расчетных значений несущей способности для целевых уровней надежности с учетом изменчивости базисных переменных и погрешности моделирования, развитый с использованием байесовского подхода прогнозирования квантилей при ограниченном количестве результатов валидации.

Результаты. Представлена реализация предложенного метода оценки расчетного значения несущей способности на примере результатов моделирования несущей способности стальных гофрированных балок посредством метода конечных элементов. Выполнен анализ влияния предпосылки об известности стандартного отклонения погрешности моделирования.

Выводы. Приведен метод определения расчетных значений несущей способности для целевых уровней надежности с учетом изменчивости базисных переменных и погрешности моделирования. Обоснованы факторы, оказывающие существенное влияние на оценивание расчетного значения несущей способности и заслуживающие дальнейших исследований. Необходимо обратить внимание на обоснование и регламентацию в нормативных документах целевых уровней конструкционной надежности; на исследование статистических характеристик погрешности моделирования с выработкой рекомендаций по назначению априорных статистических данных и максимальных оценок для стандартного отклонения погрешности моделирования; на развитие критериев и форматов проверки предельных состояний при проектировании на основе ЧМ несущей способности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод конечных элементов, численная модель, дискретизация, погрешность модели, расчетное значение, коэффициент надежности

Благодарности. Автор выражает благодарность своим наставникам: профессорам Юрию Семеновичу Мартынову и Виктору Владимировичу Туру, а также анонимным рецензентам за конструктивные замечания и предложения.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Надольский В.В. Оценка расчетного значения несущей способности стальных элементов, проектируемых на основе численных моделей // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 367–378. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378

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

Evaluating the design value of the bearing capacity of steel elements designed using numerical models

Vitali V. Nadolski

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

ABSTRACT

Introduction. Using numerical models to analyze the behavior of complex or new structural solutions becomes increasingly popular. New software can be used by a beginner to easily create numerical models of structures, and this is, on the one hand, an undeniable advantage, which, on the other hand, raises concerns about the accuracy and reliability of the results to be obtained. It is noteworthy that the regulatory engineering framework ignores this area. Moreover, research and design communities lack any uniform approaches to modeling, and, more importantly, to interpreting results and ensuring the structural reliability of solutions.

Materials and methods. The article proposes a method for analyzing design values of the bearing capacity designated for target reliability levels, taking into account the changeability of basic variables and the modeling error. This method was developed using the Bayesian approach to quantile prediction provided that the number of validation results was limited.

Results. The article presents the implementation of the proposed method of analyzing the design value of the bearing capacity using the results of FEM (finite element method) modeling of the bearing capacity of corrugated steel beams. The influence of the assumption about the standard deviation of the modeling error is analyzed.

Conclusions. The work presents a method for determining the design values of the bearing capacity for the target levels of reliability, taking into account the changeability of basic variables and the modeling error. The factors, having a great impact on evaluating the design value of the bearing capacity and deserving further research, are substantiated. First, it is necessary to draw attention to the justification and regulation of target levels of structural reliability in regulations. Second, it is necessary to draw attention to studying statistical parameters of the modeling error and developing recommendations about the designation of apriori statistical data and maximum evaluations in respect of the standard deviation of the modeling error. Thirdly, attention must be drawn to development of criteria and formats for checking limit states in the course of design based on numerical models of the bearing capacity.

KEYWORDS: finite element method (FEM), numerical model, discretization, model error, design value, reliability coefficient

Acknowledgements. The author would like to thank his mentors, Professors Yuri Semenovich Martynov and Viktor Vladimirovich Tur, as well as anonymous reviewers for their constructive feedbacks and suggestions.

FOR CITATION: Nadolski V.V. Evaluating the design value of the bearing capacity of steel elements designed using numerical models. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):367-378. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Все более популярным становится применение численных моделей (ЧМ) для анализа поведения сложных или новых конструктивных решений [1–14]. На первоначальных этапах развития данного направления ЧМ в основном использовали в научных исследованиях для более детального моделирования поведения исследуемой конструкции. С течением времени ЧМ начали внедрять в повседневное проектирование, и сегодня можно отметить их интенсивное применение. Появились программные комплексы, которые с легкостью позволяют создавать модели конструкций даже новичку, что с одной стороны является неоспоримым плюсом, но с другой — вызывает опасения в отношении достоверности и надежности получаемых результатов. Стоит констатировать тот факт, что нормативно-техническая база обходит стороной это направление, к тому же в научном и проектном сообществах отсутствуют единообразие подходов создания моделей и, что более важно, интерпретации результатов и обеспечения конструкционной надежности принятых решений.

Процесс проектирования конструкций на основе ЧМ включает несколько этапов, которые должны быть понятны научному и проектному сообществу с позиции требований и правил их обеспечения. Первым этапом следует определить выбор параметров ЧМ. В качестве параметров ЧМ выступают тип и размер конечного элемента (КЭ), модели материала, формы и значения несовершенств и т.д. Общие инструкции по разработке ЧМ можно найти в источниках [1–16], указания со спецификой на стальные конструкции представлены в работах [17–20].

Следующий ключевой этап — проверка ЧМ. Для него рекомендуется выработать единую структуру процесса проверки ЧМ с минимально необходимыми требованиями. В данной статье представлены предложения по процедуре проверки ЧМ.

Финальным этапом станет обеспечение надежности проектируемых конструкций. В большинстве

случаев погрешностью (неопределенностью) ЧМ пренебрегают, считая численную модель абсолютно точной. Эта предпосылка в определенной степени справедлива для хорошо подогнанных по экспериментальным данным моделям, так как погрешность моделирования по сравнению с неопределенностями, вносимыми другими переменными, мала. Также ранее ЧМ в основном применялись для расширения базы экспериментальных данных, и в дальнейшем на их основе разрабатывали упрощенные формульные модели несущей способности, в которых погрешность ЧМ нивелировалась за счет консерватизма упрощенной модели. Однако при использовании ЧМ для прямого оценивания несущей способности погрешность моделирования может оказывать существенное влияние на надежность конструкции [21]. Применение тех же самых значений коэффициентов надежности, что и для классических моделей, в большинстве случаев будет приводить к занижению проектной надежности [22, 23]. Для железобетонных конструкций в этом направлении можно отметить появление в последнее десятилетие интересных предложений по применению полув вероятностных методов обеспечения надежности, которые представлены в работе [24].

Основываясь на вышеотмеченном, цель настоящей статьи — развитие единообразного методологического подхода по обеспечению надежности стальных конструкций с учетом погрешности моделирования и изменчивости базисных переменных, входящих в модель несущей способности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предложения по процедуре проверки численной модели и оценке статистических характеристик погрешности численного моделирования

Проверку ЧМ можно рекомендовать выполнять в два шага: сначала осуществить верификацию, а затем — валидацию модели [17–19].

Верификация представляет собой проверку точности численного решения и должна продемонстрировать, что численное решение является хорошей аппроксимацией точного математического решения и ЧМ правильно реализована, понята и корректно используется пользователем. Надлежащая верификация гарантирует, что неопределенность в результатах моделирования связана с идеализацией материала, геометрии, нагрузок и граничных условий. Процесс верификации может включать следующие этапы.

1. Анализ плотности сетки направлен на подтверждение того, что выбранный размер сетки и тип КЭ подходящие для анализируемой задачи, и степень дискретизации не оказывает существенного влияния на поведение элемента и значение несущей способности. Анализ сетки выполняется в качественном и количественном плане. При количественной оценке качества сетки следует выполнить исследование сходимости, чтобы проверить, сходится ли соответствующий выходной параметр при уменьшении размера КЭ. Исследование сходимости может быть получено путем построения графика значения выходного параметра от размера сетки. Результирующая кривая или ее экстраполяция дают представление о значении, к которому сходится решение (конвергентное значение). С целью дальнейшего анализа допускается принимать размер КЭ для значения выходного параметра, отличающегося на 5–10 % от конвергентного значения, при этом поведение элемента должно оставаться неизменным в качественном плане. Для предварительного анализа сходимости можно использовать разные выходные параметры (напряжения, деформации, критические силы потери устойчивости и т.д.), однако окончательные выводы рекомендуется делать на основе анализа сходимости значения несущей способности.

2. Анализ чувствительности к входным параметрам включает незначительные изменения входных параметров и определяет, какие входные параметры имеют решающее значение, и должен ли этот параметр быть определен с более высокой степенью детализации или назначен консервативно.

3. Анализ чувствительности к несовершенствам. Поскольку в большинстве случаев поведение идеально «ровных» стальных конструкций отличается от поведения конструкций с несовершенствами, анализ чувствительности к несовершенствам показывает, является ли результат численного решения чувствительным к выбранному типу, форме и величине несовершенства.

4. Инженерная оценка результатов расчетов. К результатам расчета должно быть применено инженерное суждение (критический анализ полученных результатов). Следует проверить основные выходные параметры (деформации, напряжения, зависимость «нагрузка–перемещение», формы де-

формирования и т.д.). При таких проверках могут использоваться простые механические модели или предыдущий опыт.

Валидация представляет собой проверку применимости численного решения. Она осуществляется на основе сравнения численных и эталонных результатов для демонстрации того, что модель правильно (точно) или консервативно отражает поведение моделируемого элемента. В качестве основы для сравнения должны быть использованы эталонные данные (экспериментальные данные или известные точные решения). Эталонные данные должны соответствовать по способу отказа и по управляющим параметрам (относительная гибкость, поведение после потери устойчивости, геометрическая нелинейность, характеристики материала, чувствительность к несовершенствам и т.д.). Эталонные данные должны, как минимум, охватывать структурно значимые подмножества рассматриваемой проблемы, демонстрируя аналогичный тип поведения и процесса отказа. Характер поведения и вид отказа, охватываемые эталонными данными, сужают область применения ЧМ. Если эталонные данные недоступны, необходимо использовать наиболее близкие к анализируемой проблеме. В рамках валидации должна быть разработана ЧМ, имеющая параметры, идентичные эталонному случаю. Если для проверки применяются экспериментальные данные, то параметры модели (материал и геометрические входные данные) должны быть назначены на основе измеренных значений.

Базово валидацию рекомендуется выполнять на основе экспериментальных данных. Смещение результатов моделирования относительно экспериментальных данных обычно не значительно, при этом очень трудно целенаправленно создать ЧМ, которая консервативно будет отражать экспериментальные данные и при этом сохранять похожий вид деформирования и отказа.

Валидация может быть выполнена на основе сравнения численного расчета с несущей способностью, полученной общепринятыми методами расчета (формульные модели несущей способности). Формульные модели, как правило, позволяют получить значение несущей способности только для определенного состояния конструкции и не дают возможности получить график деформирования. По этой причине они могут только подтвердить или опровергнуть некоторое значение несущей способности на графике деформирования, но не дают никакой информации правильности решения на всех этапах деформирования. Следует также учитывать, что большинство формульных моделей несущей способности получены при допущениях, позволяющих получить упрощения и консервативные значения несущей способности, поэтому валидация на основе общепринятых формульных моделей несущей способности не может быть рассмотрена как

универсальная стратегия и должна быть рассмотрена как дополнительная информация для принятия решения о погрешности ЧМ.

На основании результатов валидации можно установить статистические характеристики погрешности ЧМ. Для численного описания погрешности моделирования θ можно предложить следующий способ количественной оценки. Погрешность моделирования представим в виде отношения значения несущей способности вычисленного посредством ЧМ $R_{fea,i}$ к эталонному значению несущей способности $R_{exp,i}$:

$$\theta_i = \frac{R_{exp,i}}{R_{fea,i}}. \quad (1)$$

Распределение погрешности моделирования θ может быть представлено логнормальным законом¹, тогда случайная величина $y = \ln(\theta)$ будет распределена нормально. Предположим, что на основе валидации сформирована выборка из n результатов $y_i = \ln(\theta_i)$, тогда выборочное среднее значение и дисперсия могут быть рассчитаны из следующих выражений.

Выборочное среднее m_y может быть определено следующим образом:

$$m_y = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i). \quad (2)$$

При этом выборочное стандартное отклонение s_y определяют исходя из формулы:

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - m_y)^2. \quad (3)$$

Тогда среднее значение μ_θ и коэффициент вариации V_θ для вектора погрешности θ рассчитают по формулам:

$$\mu_\theta = \exp(m_y); \quad (4)$$

$$V_\theta = \left[\exp(s_y^2) - 1 \right]^{0.5}. \quad (5)$$

Достоверность валидации и определения статистических характеристик погрешности моделирования повышается, если эталонные данные приняты из разных источников. Выбранный набор эталонных данных должен содержать достаточное количество результатов, чтобы ограничить статистическую неопределенность в оценке.

Рекомендуется верификацию и валидацию проводить независимо друг от друга. Требуется избегать необоснованной подгонки моделей на этапе валидации. Основная цель процесса валидации — подтвердить соответствие поведения ЧМ и исследуемого элемента, а оценка точности выступает сопутствующей задачей. Применимость численного решения должна быть подтверждена для каждого анализируемого случая на основании непосред-

ственной валидации или на основании предыдущего опыта применения ЧМ.

Предложение по обеспечению надежности строительной конструкции, проектируемой на основе численной модели несущей способности

Надежность строительной конструкции, проектируемой на основе ЧМ, может быть проверена в рамках полувероятностного метода (метода коэффициентов надежности) с помощью условия:

$$F_{E,d} \leq F_{R,d} \quad (6)$$

где $F_{E,d}$ — расчетное значение воздействий для рассматриваемого варианта нагружения (при необходимости с учетом комбинации воздействий); $F_{R,d}$ — расчетное значение несущей способности, определенное на основе численной модели.

Для выполнения этого базового условия необходимо установить расчетные значения воздействий и несущей способности. В общем случае расчетные значения обосновывают с помощью вероятностных методов с учетом изменчивости базисных переменных, целевого уровня надежности и рассматриваемого периода отнесения [25, 26]. Однако с некоторой степенью упрощения расчетное значение несущей способности может быть установлено на основании метода надежности первого порядка, в рамках которого расчетное значение может быть определено как квантиль заданной вероятности. Вероятность p того, что значения несущей способности будут меньше расчетного значения, связана с индексом надежности посредством формулы:

$$p = P(R \leq R_d) = \Phi(-\alpha_R \beta), \quad (7)$$

где α_R — коэффициент чувствительности для несущей способности в соответствии с методом теории надежности первого порядка; β — целевое значение индекса надежности для рассматриваемого предельного состояния и расчетной ситуации.

Соответственно, основная проблема в установлении расчетного значения сводится к задаче определения квантиля распределения. Эта задача осложняется тем, что ЧМ не формализована и формируется каждый раз перед анализом рассматриваемой задачи. Как следствие, гарантировать стабильность и точность результатов можно посредством процедуры валидации, однако при этом надо учитывать ограниченность результатов валидации, т.е. статистическую неопределенность. Для реализации этой задачи можно вычислить квантиль случайной величины по доступной выборке ограниченного размера n . Согласно ГОСТ Р ИСО 2394²

¹ JCSS Probabilistic model code. ISBN 978-3-909386-79-6. URL: <https://www.jcss-lc.org/jcss-probabilistic-model-code/>

² ГОСТ Р ИСО 2394–2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности.

и ГОСТ Р ИСО 12491³ нижний p -квантиль⁴ x_p оценивают с помощью так называемого предела прогнозирования $x_{p,pr}$, для которого считается, что новое значение x_{n+1} , случайно выбранное из совокупности, будет ниже оценки $x_{p,pr}$ с вероятностью p , т.е. считается, что:

$$P(x_{n+1} < x_{p,pr}) = p. \quad (8)$$

При возрастании n оценка $x_{p,pr}$, определенная таким образом, асимптотически приближается к неизвестному квантилю x_p . Для оценки квантиля рассматривают два основных случая в зависимости от наличия априорной информации о стандартном отклонении случайной величины. Базовым случаем для оценивания расчетного значения несущей способности по ограниченной выборке результатов валидации необходимо считать, что стандартное отклонение совокупности σ неизвестно, тогда оценка p -квантиля примет вид:

$$x_{p,pr} = m + t_p(1/n + 1)^{1/2}s = m + k_{n,p}s, \quad (9)$$

где m — выборочное среднее; $t_p = t(p, n)$ — квантиль t -распределения (распределение Стьюдента) для степени свободы $\nu = n - 1$, соответствующий вероятности p , более подробную информацию о применении распределения Стьюдента можно найти в работе [27]; s — выборочное стандартное отклонение.

Значения коэффициента $k_{n,p}$ при неизвестном стандартном отклонении совокупности для квантилей уровня 0,1, 1 и 5 % представлены в табл. 1. Следует обратить внимание, что при количестве валидаций меньше 4 статистическая неопределенность в оценивании стандартного отклонения очень высокая, поэтому значения $k_{n,p}$ для $n \leq 3$ не приведены.

Табл. 1. Значения $k_{n,p}$ для случая «стандартное отклонение неизвестно»

Table 1. Values of $k_{n,p}$ for the case “standard deviation unknown”

n	4	5	6	8	10	20	30	∞
$p = 5 \%$	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64
$p = 1 \%$	5,08	4,10	3,63	3,18	2,96	2,60	2,50	2,33
$p = 0,1 \%$	11,40	7,85	6,36	5,07	4,51	3,64	3,44	3,04

Во многих практических задачах на основании теоретических предпосылок или предыдущего опыта можно сделать предположения о максимальном значении стандартного отклонения σ совокупности. В этом случае расчетное значение может быть оценено в предположении известного стандартного отклонения в соответствии с выражением:

$$x_{p,pr} = m + u_p(1/n + 1)^{1/2}\sigma = m + k_{n,p}\sigma, \quad (10)$$

где $u_p = u(p)$ — квантиль стандартизированного нормального распределения, соответствующий вероятности p .

Значения коэффициента $k_{n,p}$ для предпосылки известного (консервативного, максимального) значения стандартного отклонения для квантилей уровня 0,1, 1 и 5 % представлены в табл. 2. В теоретическом плане значения коэффициента $k_{n,p}$ могут быть вычислены при n , равном 1, однако, учитывая малую достоверность валидации на основе одного результата и высокую неопределенность в оценивании среднего значения, применение предложенной процедуры не рекомендуется при n , равном 1.

В большинстве случаев предполагается, что несущая способность R подчиняется логнормальному распределению^{2, 5} (для получения более подробной информации см. [28]). Используя замену $z = \ln(R)$, в этом случае z является нормально распределенной со средним значением $\mu_z = \mu_{\ln R} = \mu(\ln R)$ и стандартным отклонением $\sigma_z = \sigma_{\ln R}$, квантиль уровня p для $\ln(R)$ может быть записан:

$$\ln(R)_p = \mu_{\ln R} - k_{n,p}\sigma_{\ln R}, \quad (11)$$

или

$$R_p = \exp(\mu_{\ln R} - k_{n,p}\sigma_{\ln R}). \quad (12)$$

Среднее значение $\mu(R)$ величины R может быть выражено с помощью среднего $\mu_{\ln R}$ и стандартного отклонения $\sigma_{\ln R}$ величины $\ln(R)$ согласно соотношению:

$$\mu(R) = \exp\left(\mu_{\ln R} + \frac{\sigma_{\ln R}^2}{2}\right). \quad (13)$$

После алгебраических преобразований расчетное значение несущей способности может быть выражено в следующем виде:

$$R_p = \mu(R) \exp\left(\frac{-k_{n,p}\sigma_{\ln R} - \sigma_{\ln R}^2}{2}\right). \quad (14)$$

Далее рассмотрим несущую способность как случайную величину R , представленную произведением двух случайных величин r (несущей способности, определенной на основе численной модели) и θ (погрешности моделирования):

$$R = r\theta, \quad (15)$$

тогда

$$\ln(R) = \ln(r) + \ln(\theta), \quad (16)$$

при этом среднее значение будет равно:

$$\mu_{\ln R} = \mu(\ln(r)) + \mu(\ln(\theta)). \quad (17)$$

Стандартное отклонение $\sigma_{\ln R}$ может быть выражено с использованием весовых коэффициентов α_r и α_θ как:

⁵ СН 2.01.01–2019. Основы проектирования строительных конструкций.

³ ГОСТ Р ИСО 12491–2011. Материалы и изделия строительные. Статистические методы контроля качества.

⁴ Прогнозирование квантилей при использовании байесовского подхода.

Табл. 2. Значения $k_{n,p}$ для случая «стандартное отклонение известно»Table 2. Values of $k_{n,p}$ for the case “standard deviation known”

n	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
$p = 5 \%$	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
$p = 1 \%$	2,85	2,69	2,60	2,55	2,51	2,47	2,44	2,38	2,36	2,33
$p = 0,1 \%$	3,77	3,56	3,44	3,37	3,33	3,27	3,23	3,16	3,13	3,04

$$\sigma_{\ln R} = \alpha_r \sigma_{\ln r} + \alpha_\theta \sigma_{\ln \theta}, \quad (18)$$

при этом весовые коэффициенты α_r и α_θ вычислим по формулам:

$$\alpha_r = \frac{\sigma_{\ln r}}{\sigma_{\ln R}}; \quad (19)$$

$$\alpha_\theta = \frac{\sigma_{\ln \theta}}{\sigma_{\ln R}}. \quad (20)$$

Объединив уравнения (14) и (18), можно получить общее выражение для оценки квантиля распределения несущей способности:

$$R_p = \mu(R) \exp\left(\frac{-k_{n,p} \alpha_r \sigma_{\ln r} - k_{n,p} \alpha_\theta \sigma_{\ln \theta} - \sigma_{\ln R}^2}{2}\right). \quad (21)$$

Учитывая то, что неопределенность (изменчивость), вносимая в модель несущей способности посредством базисных переменных, не зависит от объема валидации n , в выражении (21) коэффициент $k_{n,p}$ для стандартного отклонения $\sigma_{\ln r}$ можно заменить на k_∞ . Тогда окончательный вид записи выражения для определения расчетного значения несущей способности R_d примет вид:

$$R_d = \mu_\theta \mu_r \exp(-k_{\infty,p} \alpha_r \sigma_{\ln(r)} - k_{n,p} \alpha_\theta \sigma_{\ln(\theta)} - 0,5 \sigma_{\ln(R)}^2), \quad (22)$$

где μ_θ — среднее значение погрешности моделирования; $\mu_r \approx r_{\text{num}}(\bar{X}_m)$ — значение несущей способности, вычисленное на основе численной модели при средних значениях базисных переменных; k_∞ — коэффициент $k_{n,p}$ при $n \rightarrow \infty$; α_r — весовой коэффициент для $\sigma_{\ln(r)}$; $\sigma_{\ln(r)}$ — стандартное отклонение несущей способности без учета погрешности моделирования; $k_{n,p}$ — коэффициент, учитывающий уровень надежности, статистическую неопределенность и наличие предварительной информации о значении стандартного отклонения генеральной совокупности; α_θ — весовой коэффициент для $\sigma_{\ln(\theta)}$; $\sigma_{\ln(\theta)}$ — стандартное отклонение погрешности моделирования; $\sigma_{\ln(R)}$ — стандартное отклонение несущей способности с учетом погрешности моделирования.

Стандартные отклонения логнормальных величин $\ln(r)$, $\ln(\theta)$, $\ln(R)$ могут быть рассчитаны через коэффициенты вариации согласно следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \sigma_{\ln(r)} &= [\ln(V_r^2 + 1)]^{0,5}; \\ \sigma_{\ln(\theta)} &= [\ln(V_\theta^2 + 1)]^{0,5}; \\ \sigma_{\ln(R)} &= [\ln(V_R^2 + 1)]^{0,5}; \\ V_R &= [(V_r^2 + 1)(V_\theta^2 + 1) - 1]^{0,5}. \end{aligned} \quad (23)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Иллюстрацию предложенного метода выполним на основании данных результатов моделирования несущей способности стальных гофрированных балок, представленных в работе [19]. Значения несущей способности, полученные в процессе эксперимента F_{exp} и по численной модели F_{fea} , приведены в табл. 3 [19].

Табл. 3. Оценка погрешности моделирования [19]

Table 3. Modeling error evaluation [19]

Образец Specimen	F_{exp} , кН kN	F_{fea} , кН kN	$\theta_i = F_{\text{exp}}/F_{\text{fea}}$	$y_i = \ln(\theta_i)$
SP1	753,5	762,0	0,99	-0,0101
SP2	953,4	929,1	1,03	0,0296
SP3	763,7	691,5	1,10	0,0953
SP4	948,1	914,7	1,04	0,0392
SP5	1196,4	1152,3	1,04	0,0392
SP6	1121,1	1067,4	1,05	0,0488
SP7	1078,2	1005,5	1,07	0,0677
SP8	1264,0	1180,8	1,07	0,0677
SP9	1220,8	1199,0	1,02	0,0198
SP11	1284,6	1277,7	1,01	0,0100
SP12	773,7	753,9	1,03	0,0296
A1	219,0	237,0	0,92	-0,0834
A2	217,0	228,6	0,95	-0,0513
A3	181,0	190,5	0,95	-0,0513
B1	188,0	190,5	0,99	-0,0101
B2	213,0	228,6	0,93	-0,0726
B3	218,0	237,0	0,92	-0,0834

Оценка статистических характеристик погрешности моделирования осуществлена в соответствии с выражениями (2)–(5). Выборочное среднее m_y и стандартное отклонение s_y логарифма погрешности моделирования $y = \ln(\theta)$ равны 0,0050 и 0,0560 соответственно. Тогда среднее значение μ_θ и коэф-

коэффициент вариации V_θ погрешности моделирования равны 1,00 и 5,6 % соответственно. Значения статистик свидетельствуют о высокой точности ЧМ и ее применимости для решения рассматриваемой проблемы.

Для целей данного анализа определим значение коэффициента надежности в следующем виде:

$$\gamma_{R,\mu \rightarrow d} = \frac{\mu_r}{R_d}, \quad (24)$$

где $\gamma_{R,\mu \rightarrow d}$ — коэффициент надежности для ЧМ несущей способности при переходе от средних значений базисных переменных к расчетному значению несущей способности, учитывающий изменчивость (неопределенность) базисных переменных, входящих в ЧМ, и погрешность (неопределенность) ЧМ.

Сначала необходимо задаться вероятностью обеспечения расчетного значения несущей способности. Обоснование и выбор целевого уровня надежности представляют собой довольно сложное направление в теории надежности. Существует несколько способов определения минимально допустимой и целевой вероятности отказа сооружения, обзор и предложения по назначению можно найти в труде [29]. К сожалению, в нормативно-технических документах Российской Федерации не представлены нормативно закреплённые минимальные или целевые значения индексов надежности. Как правило, в исследованиях надежности ссылаются на европейский стандарт EN 1990⁶, в котором представлены значения целевого уровня надежности. Для среднего класса последствий разрушения зданий и периода отнесения 50 лет индекс надежности принимают равным 3,8. Анализ значений индекса надежности на основании предыдущего опыта нормирования [26, 30] показывает, что текущие нормы обеспечивают индекс надежности в пределах 2,5–3,0. Данные значения значительно ниже рекомендаций европейского стандарта EN 1990, однако хорошо согласуются с международным стандартом ISO 2394:1998². Для более корректной оценки значения индексов надежности должны быть определены с учетом территориальных, социальных и экономических особенностей РФ и в дальнейшем закреплёны в нормах проектирования, что является темой отдельного научного исследования. Для рассматриваемого примера в качестве консервативного значения примем значение индекса надежности 3,8.

Далее необходимо назначить коэффициент чувствительности α_R для несущей способности. Наиболее правильным является установление коэффициентов чувствительности непосредственно на основании вероятностного метода (методом теории надежности первого порядка). В качестве консервативного допущения при преобладающей изменчивости базисных переменных воздействий

(что характерно для большинства стальных конструкций) коэффициенты чувствительности для несущей способности можно принять равными $\alpha_R = 0,6$. Тогда, согласно формуле (7), целевая вероятность обеспечения расчетного значения будет составлять порядка 1 %.

Коэффициент $k_{n,p}$ вычисляется в предположении неизвестного стандартного отклонения (см. формулу (9)). Для 17 результатов валидаций коэффициент $k_{n,p}$ равен 2,65. Стандартное отклонение несущей способности без учета погрешности моделирования, т.е. изменчивость, вносимая базисными переменными, для ЧМ не может быть определена классическими аналитическими методами, так как модель представлена в неявном виде. Наиболее точно стандартное отклонение можно получить на основании симуляционных методов, например посредством прямого метода Монте – Карло; однако этот метод требует больших вычислительных мощностей и, вероятнее всего, может быть использован для единичных случаев в исследовательских целях. В данном исследовании для отображения только качественной стороны проблемы и иллюстрации предложенного метода принята грубая предпосылка о зависимости несущей способности от одной базисной переменной. Примем, что базисной переменной является предел текучести стали. Коэффициент вариации для предела текучести стали примем 8 % [28].

Тогда, основываясь на описанных выше предпосылках, значение коэффициента надежности будет $\gamma_{R,\mu \rightarrow d} = 1,27$, т.е., применив это значение к среднему значению несущей способности, получим расчетное значение для обеспеченности 1 % с учетом изменчивости (неопределенности) базисных переменных и погрешности моделирования.

Продemonстрируем применение предпосылки «стандартное отклонение известно». При наличии априорной информации о максимальном значении стандартного отклонения допускается применение предпосылки «стандартное отклонение известно». С практической точки зрения известное стандартное отклонение с максимальным оценочным значением может оказаться целесообразным при малом количестве результатов. Применим для рассматриваемого случая предпосылку об известном стандартном отклонении. Предположим, что максимальное значение коэффициента вариации погрешности моделирования может быть 8 и 10 % (данные значения требуют обоснования в дальнейших исследованиях). В этом случае коэффициент $k_{n,p}$ будет равен 2,39, а значение коэффициента надежности $\gamma_{R,\mu \rightarrow d}$ равно 1,31 и 1,36 соответственно для V_θ равного 8 и 10 %. Как видно, если количество валидации значительно, то выигрыша в оценивании коэффициента надежности не возникает. Однако, если предположить количество валидаций, равное 4 (статистические характеристики приняты

⁶ EN 1990: Eurocode — Basis of structural design // European Committee for Standardization (CEN).

без изменения), тогда коэффициент надежности при предпосылке о «неизвестном стандартном отклонении генеральной совокупности» равен $\gamma_{R,\mu \rightarrow d} = 1,37$, а при предпосылке об «известном стандартном отклонении генеральной совокупности» — 1,32 и 1,38 соответственно для V_0 8 и 10 %.

В сочетании с предложенным методом можно применить байесовский метод уточнения статистических характеристик. Результаты предыдущих валидаций на похожих моделях могут быть использованы в качестве предварительных данных для уточнения (обновления) статистических параметров погрешности моделирования посредством байесовского метода [31]. Основные выражения для байесовского обновления приведены в уравнениях (25)–(28). В уравнениях (25)–(28) использованы следующие обозначения: n', v', m_y', s_y' , которые являются предварительными (априорными) значениями для статистических характеристик; n, v, m_y, s_y — статистические характеристики, полученные в процессе валидации; n'', v'', m_y'', s_y'' — обновленные статистические характеристики, которые следует вводить в выражения (9), (10), (22), (23):

$$n'' = n' + n; \quad (25)$$

$$v'' = v' + v + 1; \quad (26)$$

$$m_y'' = \frac{m_y' n' + m_y n}{n''}; \quad (27)$$

$$(s_y'')^2 = \frac{(s_y')^2 n' + s_y'^2 n + (m_y')^2 n' + m_y'^2 n - n'' (m_y'')^2}{v''}. \quad (28)$$

Для иллюстрации применения байесовского метода уточнения статистических характеристик разделим результаты валидации, представленные в табл. 4, на две выборки. Первые 11 результатов рассмотрим как информацию, полученную в итоге первоначальной валидации модели, а оставшиеся 6 — как результаты дополнительной валидации модели.

Табл. 4. Пример применения байесовского метода к уточнению статистических характеристик

Table 4. Using the Bayesian method to refine statistical characteristics

n	11	6	17
m_y	0,0397	−0,0587	0,0046
s_y	0,0295	0,0279	0,0576
μ_0	1,040	0,943	1,005
$V_0, \%$	2,95	2,79	5,80
$k_{n,p}$	2,89	3,64	2,68
$\gamma_{R,\mu \rightarrow d}$	1,18	1,31	1,27

Из представленных результатов видно, что необходимо обратить внимание на опасность валидации на основании только одного источника эталон-

ных данных. Как указано в работе [19], первые 11 результатов были выполнены для одного источника экспериментальных данных, а 6 последующих — для другого. Очевидно, что для каждой из подвыборок статистические характеристики более благоприятные, чем для всей выборки результатов. С одной стороны, это может быть связано с изменчивостью свойств в пределах одной подвыборки (разные несовершенства, разные виды фактических диаграмм деформирования и т.д.); с другой — на экспериментальные значения может оказывать влияние неопределенность (погрешность, идеализация) самого эксперимента [21, 28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На оценивание расчетного значения несущей способности оказывают влияние следующие, заслуживающие дальнейших исследований, факторы:

1. Обоснование и регламентация в нормативных документах целевых уровней конструкционной надежности и рекомендуемых значений коэффициентов чувствительности. Коэффициент надежности должен учитывать соответствующую дифференциацию надежности для новых и существующих конструкций, однако нормативно закреплённые вероятности отказа отсутствуют в нормативных документах, и автор не нашел исследований обоснования целевых значений вероятностей отказа для условий РФ, что не позволяет проектировать конструкции с едиными унифицированными параметрами надежности. Этот факт отмечал один из основных разработчиков ГОСТ 27751⁷, профессор В.Д. Райзер в работе [32]: «Невозможно найти сколь-нибудь разумного объяснения тому, что надежность сооружений одного и того же назначения, выполненных из различных материалов, запроектированных по действующим нормам, оказывается различной».

2. Исследование статистических характеристик погрешности моделирования с выработкой рекомендаций по назначению априорных статистических данных и максимальных оценок для стандартного отклонения или коэффициента вариации погрешности моделирования.

3. Разработка методов оценки коэффициента вариации несущей способности, вычисленной на основе ЧМ. Применение классических методов оценки коэффициентов вариации ограничено или практически невозможно, потому что аналитические решения не могут быть использованы по причине непредставленности модели в явном виде, а симуляционные методы очень трудозатратны. Положительный результат могут дать разложение в ряд Тейлора и численные способы интегрирования.

4. Анализ минимально необходимого количества валидаций представляет большой инте-

⁷ ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

рес в теоретическом и практическом плане. Ответ на данный вопрос может быть найден в анализе влияния количества валидаций на статистическую неопределенность погрешности моделирования и расчетное значение несущей способности. Поскольку статистическая неопределенность является значительной, если оценка основана на небольшом количестве наблюдений (при n меньше 4), рекомендуется выполнять валидации на основании не менее 4 эталонных результатов. Допускается проводить валидацию на основании более 2 результатов испытания, если можно сделать предположение о максимальном значении коэффициента вариации погрешности моделирования. Не рекомендуется использовать данные из одного источника.

5. Анализ влияния неопределенности (погрешности) эталонного значения. Прямое сравнение экспериментальных и численных результатов приводит к оценке случайной величины погрешности модели, которая включает неопределенности экспериментального значения. Как правило, погрешностью экспериментального значения пренебрегают, считая, что хорошо продуманный эксперимент точно отражает поведение исследуемой физической конструкции. Однако в случае существенных отличий (выбросов) в экспериментальных данных для отдельных результатов следует осуществить подробный анализ причин возможных отклонений.

6. Развитие критериев и форматов проверки предельных состояний для ЧМ несущей способности [33, 34]. Для разработки форматов проверки безопасности необходимо отдать предпочтение расчетам с использованием средних характеристик базисных переменных. Для классических формульных выражений, как правило, используются расчеты с применением характеристических (нормативных) или номинальных значений базисных переменных, например предела текучести, и далее используется значение коэффициента надежности, который позволяет перейти от нормативного значения несущей способности к расчетному. Однако для ЧМ, которые в большинстве случаев нелинейные, прослеживается нелинейная взаимосвязь между входными параметрами (базисными переменными) и выходными параметрами, и дополнительно влияние каждой из базисных переменных различно. Второй довод: для описания поведения генеральной совокупности следует использовать наиболее вероятные значения свойств элемента, а уже потом оценивать расчетные значения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 80. Pp. 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018
2. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Mirambell E., Braun B., Kuhlmann U. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. Pp. 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018
3. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Mirambell E., Braun B., Kuhlmann U. Interaction behaviour of steel I-girders; part II: Longitudinally stiffened girders // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. Pp. 344–353. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.017
4. Kövesdi B., Kuhlmann U., Dunai L. Combined shear and patch loading of girders with corrugated webs // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2010. Vol. 54. Issue 2. Pp. 79. DOI: 10.3311/pp.ci.2010-2.02
5. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sykora M. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading // *Proceedings of conference Modelling in Mechanics* 2022. 2022. Pp. 21–29.
6. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research // *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 158. Pp. 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025

7. Pavlovčič L., Detzel A., Kuhlmann U., Beg D. Shear resistance of longitudinally stiffened panels — Part 1: Tests and numerical analysis of imperfections // *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63. Issue 3. Pp. 337–350. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.05.008
8. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders — Tests and numerical model verification // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 85. Pp. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007
9. Афенченко Д.С., Петрова Ю.Н., Устинова М.Э., Олейникова Р.Е. Верификация аналитического расчета несущей способности перфорированного стержня средствами конечно-элементного комплекса ANSYS // *Вестник Керченского государственного морского технологического университета*. 2019. № 4. С. 118–129.
10. Estrada I., Real E., Mirambell E. General behaviour and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear. Part II: Extended numerical study and design proposal // *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63. Issue 7. Pp. 985–996. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.08.010
11. Ботян С.С., Жамойдик С.М., Кудряшов В.А., Олесиук Н.М., Писченков И.А. Оценка огнестойкости стальных строительных конструкций с учетом влияния теплообмена с примыкающими смежными конструкциями // *Вестник Университе-*

та гражданской защиты МЧС Беларуси. 2021. № 3. С. 278–288. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-3.278

12. Надольский В.В. Расчет и конструирование фланцевого соединения элементов прямоугольного сечения, подверженных центральному растяжению // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2018. № 8. С. 121–130.

13. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 6. С. 676–687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687

14. Мартынов Ю.С., Надольский В.В., Верева Ф.А. Стеновые панели на основе кассетных профилей. Часть 1. Теоретические исследования // Строительство и реконструкция. 2019. № 4 (84). С. 26–37. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-84-4-26-37

15. Chacon R., Mirambell E., Real E. Influence of designer-assumed initial conditions on the numerical modelling of steel plate girders subjected to patch loading // Thin-Walled Struct. 2009. Vol. 47. Issue 4. Pp. 391–402. DOI: 10.1016/j.tws.2008.09.001

16. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: Издательство СКАД Софт, 2011. 709 с.

17. Kövesdi B. Finite element model-based design of stiffened welded plated structures subjected to combined loading // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2021. DOI: 10.3311/ppci.17229

18. Надольский В.В., Подымако В.И. Оценка несущей способности стальной балки методом конечных элементов при совместном действии локальных и сдвиговых усилий // Строительство и реконструкция. 2022. № 2. С. 26–43. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-26-43

19. Надольский В.В., Вихляев А.И. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 6. С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706

20. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading // Thin-Walled Structures. 2012. Vol. 53. Pp. 15–25. DOI: 10.1016/j.tws.2011.12.003

21. Надольский В.В. Надежность стального элемента при потере местной устойчивости стенки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 5. С. 569–579. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.569-579

22. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Hidden safety in structural design codes // Engineering Structures. 2022. Vol. 257. P. 114017. DOI: 10.1016/j.eng-struct.2022.114017

23. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Über den Umgang mit versteckten Sicherheiten — Eine Fallstudie

am Windlastmodell des Eurocode // Baustatik – Baupraxis 14. 2021.

24. Sykora M., Nadolski V., Novak L., Novak D., Diamantidis D. Pilot comparison of semi-probabilistic methods applied to RC structures with multiple failure modes // Proceedings of fib International Congress 2022. 2022. Pp. 1890–1899.

25. Грановский А.В., Райзер В.Д. К оценке коэффициента надежности каменной кладки при различных вариантах ее напряженного состояния (в порядке обсуждения) // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2021. № 5 (54). С. 25–30.

26. Надольский В.В., Голицы М., Сикора М., Тур В.В. Сопоставление уровней надежности, обеспечиваемых нормами Российской Федерации и Евросоюза // Вестник МГСУ. 2013. № 6. С. 7–20. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.6.7-20

27. Бенинг В.Е., Королев В.Ю. Об использовании распределения Стюдента в задачах теории вероятностей и математической статистики // Теория вероятностей и ее применения. 2004. Т. 49. № 3. С. 417–435. DOI: 10.4213/tvp201

28. Nadolski V., Rózsás Á., Sykora M. Calibrating Partial Factors — Methodology, Input Data and Case Study of Steel Structures // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2019. Vol. 63. Issue 1. Pp. 222–242. DOI: 10.3311/PPci.12822

29. Надольский В.В., Мартынов Ю.С. Оценка требуемого (целевого) уровня надежности на основании предыдущего опыта нормирования // Вестник Полоцкого государственного университета. 2014. № 8. С. 27–34.

30. Мартынов Ю.С., Надольский В.В. Введение Еврокодов в практику проектирования стальных конструкций с позиции материалоемкости и надежности // Вестник Брестского государственного технического университета. 2015. № 1 (91). С. 106–111.

31. Соловьева А.А., Соловьев С.А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 5. С. 587–607. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607

32. Райзер В.Д. Развитие теории надежности и совершенствование норм проектирования // Строительная механика и расчет сооружений. 1983. № 5. С. 1–4.

33. Перельмутер А.В. Использование критерия отпорности для оценки предельного состояния конструкции // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 12. С. 1559–1566. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1559-1566

34. Тур В.В., Тур А.В., Лизогуб А.А. Проверка живучести конструктивных систем из сборного железобетона по методу энергетического баланса // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 8. С. 1015–1033. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1015-1033

Поступила в редакцию 9 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 8 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

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

REFERENCES

1. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013; 80:202-212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018
2. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Mirambell E., Braun B., Kuhlmann U. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 103:327-343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018
3. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Mirambell E., Braun B., Kuhlmann U. Interaction behaviour of steel I-girders; part II: Longitudinally stiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 103:344-353. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.017
4. Kövesdi B., Kuhlmann U., Dunai L. Combined shear and patch loading of girders with corrugated webs. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2010; 54(2):79. DOI: 10.3311/pp.ci.2010-2.02
5. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sykora M. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading. *Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022*. 2022; 21-29.
6. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 158:213-229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025
7. Pavlovčič L., Detzel A., Kuhlmann U., Beg D. Shear resistance of longitudinally stiffened panels — Part 1: Tests and numerical analysis of imperfections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007; 63(3):337-350. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.05.008
8. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders — Tests and numerical model verification. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013; 85:116-129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007
9. Afenchenko D.S., Petrova Yu.N., Ustinova M.E., Aleynikova R.E. Verification of analytical calculation of perforated rod bearing capacity by means of ANSYS finite element complex. *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University*. 2019; 4:118-129. (rus.).
10. Estrada I., Real E., Mirambell E. General behaviour and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear. Part II: Extended numerical study and design proposal. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007; 63(7):985-996. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.08.010
11. Botyan S.S., Zhmodik S.M., Kudryashov V.A., Olesiyuk N.M., Pischenkov I.A. Assessment of fire resistance of steel building structures taking into account the influence of heat exchange with adjacent adjacent structures. *Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus*. 2021; 3:278-288. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-3.278 (rus.).
12. Nadolski V.V. Calculation and construction of the flange connection of rectangular elements subjected to the axial tension. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2018; 8:121-130. (rus.).
13. Saiyan S.G., Paushkin A.G. The numerical parametric study of the stress-strain state of I-beams having versatile corrugated webs. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(6):676-687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687 (rus.).
14. Martynov Y.S., Nadolski V.V., Viarouka F.A. Wall panels based on cassette profiles. Part 1. Theoretical researches. *Building and Reconstruction*. 2019; 4(84):26-37. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-84-4-26-37 (rus.).
15. Chacon R., Mirambell E., Real E. Influence of designer-assumed initial conditions on the numerical modelling of steel plate girders subjected to patch loading. *Thin-Walled Struct.* 2009; 47(4):391-402. DOI: 10.1016/j.tws.2008.09.001
16. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Design models of structures and the possibility of their analysis*. Moscow, SCUD Soft Publishing House, 2011; 709. (rus.).
17. Kövesdi B. Finite Element Model-based Design of Stiffened Welded Plated Structures Subjected to Combined Loading. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2021. DOI: 10.3311/ppci.17229
18. Nadolski V.V., Podymako V.I. The evaluation of ultimate resistance of steel beams to combined shear and patch loading by finite element method. *Building and Reconstruction*. 2022; 2:26-43. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-26-43 (rus.).

19. Nadolski V.V., Vikhlyaev A.I. Using the finite element method to evaluate the load-bearing capacity of beams with a corrugated web subjected to local loading. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(6):693-706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706 (rus.).
20. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading. *Thin-Walled Structures*. 2012; 53:15-25. DOI: 10.1016/j.tws.2011.12.003
21. Nadolski V.V. Reliability of a steel member in case of loss of local stability of a web. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):569-579. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.569-579 (rus.).
22. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Hidden safety in structural design codes. *Engineering Structures*. 2022; 257:114017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114017
23. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Über den Umgang mit versteckten Sicherheiten — Eine Fallstudie am Windlastmodell des Eurocode. *Baustatik – Baupraxis* 14. 2021.
24. Sykora M., Nadolski V., Novak L., Novak D., Diamantidis D. Pilot comparison of semi-probabilistic methods applied to RC structures with multiple failure modes. *Proceedings of fib International Congress 2022*. 2022; 1890-1899
25. Granovsky A.V., Raiser V.D. On the assessment of the reliability coefficient of masonry under various variants of its stressed state (in the order of discussion). *Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures*. 2021; 5(54):25-30. (rus.).
26. Nadolski V.V., Holicky M., Sykora M., Tur V.V. Comparison of Reliability Levels Provided by the Eurocodes and Standards of the Russian Federation. *Vestnik of MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 6:7-20. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.6.7-20 (rus.).
27. Bening V.E., Korolev V.Yu. On the use of Student distribution in problems of probability theory and mathematical statistics. *Theory of Probability and its Applications*. 2004; 49(3):417-435. DOI: 10.4213/tvp201 (rus.).
28. Nadolski V., Rózsás Á., Sykora M. Calibrating partial factors — methodology, input data and case study of steel structures. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019; 63(1):222-242. DOI: 10.3311/PPci.12822
29. Nadolski V.V., Martynov Yu.S. Assessment of the required (target) level of reliability based on previous rationing experience. *Bulletin of Polotsk State University*. 2014; 8:27-34. (rus.).
30. Martynov Yu.S., Nadolski V.V. The introduction of Eurocodes in design practice from the standpoint economy and reliability of steel construction. *Bulletin of the Brest State Technical University*. 2015; 1(91):106-111. (rus.).
31. Soloveva A.A., Solovev S.A. A research into the development of models of random variables as part of the structural reliability analysis performed in the absence of some statistical information. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5):587-607. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607 (rus.).
32. Raiser V.D. Development of reliability theory and improvement of design standards. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 1983; 5:1-4. (rus.).
33. Perelmutter A.V. Using the criterion of resistibility to assess of a structural limit state. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(12):1559-1566. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1559-1566 (rus.).
34. Tur V.V., Tur A.V., Lizahub A.A. Checking of the robustness of precast structural systems based on the energy balance method. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(8):1015-1033. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.8.1015-1033 (rus.).

Received November 9, 2022.

Adopted in revised form on February 8, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.379-390

Определение коэффициента закручивания высокопрочного болтокомплекта для предварительного натяжения

Андрей Александрович Василькин, Роман Маратович Ахметзянов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Использование высокопрочных болтокомплектов для предварительного натяжения, работающих во фрикционных соединениях, распространено при проектировании ответственных стальных конструкций и применяется как эффективный способ передачи усилия в условиях динамического воздействия. Предельное состояние соединения наступает, когда достигается расчетное усилие сдвига, которое зависит от коэффициента трения контактных плоскостей и величины усилия зажима, равного усилию натяжения болта. Для обеспечения требуемого усилия натяжения болта следует знать коэффициент закручивания болта, поскольку согласно действующим представлениям о фрикционной схеме работы соединения проектная работа болтового соединения обеспечена при достижении усилия натяжения болта, возникающем при необходимой величине крутящего момента. В противном случае фактическая работа соединения будет отличаться от расчетной, потому что только заданное усилие натяжения обеспечивает расчетную несущую способность болтового соединения с плоскостями трения. Проведены испытания болта на растяжение, определен коэффициент закручивания болтокомплекта из высокопрочной стали марки 10.9 M14.

Материалы и методы. Исследуемые болтокомплекты выполнены по немецкому стандарту DIN 931 прочностью 10.9 размера M14 × 220, гайки по немецкому стандарту DIN 934 прочностью 10 размера M14. Для построения диаграммы работы стали болтов использовалась разрывная машина Instron 1000HDX. Определение контроля натяжения гайки осуществлялось с помощью динамометрического ключа NOGRAU NTW24-034R, контроль удлинения болта — с применением тензодатчиков FLA-5-11 и системы сбора данных National Instruments.

Результаты. На основе проведенных исследований проверен и предложен способ определения коэффициента закручивания болтокомплекта для предварительного натяжения.

Выводы. Предложенный способ установления коэффициента закручивания болтокомплекта может быть использован в исследовательской работе и позволяет определить коэффициент в случае отсутствия соответствующего сертификата или необходимости уточнения (проверки) заявленной величины коэффициента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фрикционное соединение, коэффициент закручивания, болтокомплект для предварительного натяжения, контролируемое натяжение, коэффициент трения

Благодарности. Авторы выражают благодарность главному региональному центру коллективного пользования научным оборудованием и установками НИУ МГСУ, ЛИСМИИК НИИ ЭМ, главному механику НИУ МГСУ В.В. Смелому.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Василькин А.А., Ахметзянов Р.М. Определение коэффициента закручивания высокопрочного болтокомплекта для предварительного натяжения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 379–390. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.379-390

Автор, ответственный за переписку: Андрей Александрович Василькин, vasilkinaa@mgsu.ru.

Identification of the torsion coefficient of bolts in slip-critical connections

Andrey A. Vasilkin, Roman M. Akhmetzyanov

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

ABSTRACT

Introduction. The article proposes a method for identifying the coefficient of torsion of a high-strength bolt in the laboratory environment. The coefficient is found by determining the relative deformation of a drawn bolt using load cells. This method requires specialized equipment and a test bench, and it can be used to study the behavior of bolts. The value of the torsion coefficient is necessary to ensure the appropriate bolt tension force, since according to current friction concepts of bolted connections involving high-strength bolts, the design behavior of a bolted connection is ensured by the appropriate bolt tension force, determined using the required torque. Otherwise, the actual behavior of a bolt differs from its design behavior, since only a pre-set tension force ensures the necessary bearing capacity of a bolted connection in the friction planes.

Materials and methods. Specimens of bolts under study are made according to the German standard DIN931 with a strength of 10.9, and the size M14 × 220; their nuts comply with the German standard DIN934 with a strength of 10 and the size M14. Instron 1000HDX tension testing machine was used to make a diagram describing the performance of steel

bolts. Nut tension was determined using NOGRAU NTW24-034R torque control key, and bolt elongation was controlled using FLA 5-11 strain gauges and the National Instruments data collection system.

Results. A new method for monitoring the measurement of the torsion coefficient of high-strength bolts was tested and proposed in furtherance of the research conducted by the authors.

Conclusions. As a result of testing, a change in the torsion coefficient can be evaluated depending on the torque value.

KEYWORDS: torsion coefficient of bolts in slip-critical connections, pretension, coefficient of friction

Acknowledgment. The authors express their gratitude to the head regional center for the collective use of scientific equipment and installations of the NRU MGSU, Laboratory for testing building materials, products and structures EM, the chief mechanic of the NRU MGSU V.V. Smelomu.

FOR CITATION: Vasilkin A.A., Akhmetzyanov R.M. Identification of the torsion coefficient of bolts in slip-critical connections. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):379-390. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.379-390 (rus.).

Corresponding author: Andrey A. Vasilkin, vasilkinaa@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, несущая способность фрикционного соединения с помощью болтокомплектов для предварительного натяжения обеспечивается за счет сил трения между соединяемыми поверхностями [1]. Для увеличения силы сцепления между соединяемыми пластинами болт затягивается на усилие, равное несущей способности. Первые отечественные исследования фрикционной работы выполнены в НИИ мостов при ЛИИЖТ в 1957 г. [2]. Болт из стали 40Х затягивался на усилие, близкое к несущей способности болта (20 т для болта М22), после чего определялся коэффициент трения, равный отношению сдвигающего усилия к усилию натяжения болта. Далее после многочисленных испытаний и статистической обработки коэффициенты трения нормировались и использовались для установления несущей способности фрикционного соединения на болтах с одной плоскостью трения Qbh.

В настоящее время исследование действительной работы высокопрочного болтокомплекта для предварительного натяжения направлено в основном на выявление влияния различных факторов на несущую способность соединения.

Так, в работе [3] авторы экспериментально определяют усилие, при котором обеспечена несущая способность соединения, и сравнивают его с расчетным.

В публикации [4] показано, что при изменении временного сопротивления болта наблюдается пропорциональное изменение коэффициента закручивания, что позволяет на основании вероятностной оценки зависимости уменьшить количество болтов при испытаниях болтокомплектов различной прочности.

Оценка влияния коррозионного износа соединяемых поверхностей на несущую способность соединения выполнена в труде [5]. Также различными исследователями установлено влияние температуры [6], повторной нагрузки [7, 8], сейсмических колебаний [9], способа обработки соединяемых поверхностей [10–12] на несущую способность соединения.

Рядом авторов проведены испытания действительной работы фрикционных соединений на физической [13–17] и математической моделях [18].

Имеется несколько работ по исследованию коэффициента закручивания высокопрочного болтокомплекта. Определяются коэффициенты закручивания при различных видах смазки [19] и при ударной затяжке болтовых соединений [20]. Кроме того, предпринимаются попытки разработки аналитической модели трения соединяемых элементов с учетом микроструктуры поверхностей [21].

Поскольку усилие натяжения болтокомплекта зависит от несущей способности болта, которая в свою очередь зависит от диаметра, то в Нормах¹ приведено требуемое усилие натяжения болтокомплекта для каждого диаметра. В современных нормах для болта М22 указано усилие натяжения 22 т, что сопоставимо с усилием, при котором исследовалась работа высокопрочных болтов в 1957 г. Очевидно, что при меньших усилиях натяжения коэффициент трения между соединяемыми поверхностями будет иметь другое значение.

Для обеспечения требуемой величины натяжения болта необходимо обеспечить его контроль. Традиционно применяются следующие способы контроля натяжения болта — по углу поворота ключа, моменту закручивания, величине удлинения болта^{2, 3}.

¹ СП 006–97. Устройство соединений на высокопрочных болтах в стальных конструкциях мостов : введен в действие Корпорацией «Трансстрой» распоряжением от 09.10.1997 № МО-233. М. : Трансстрой, 1998.

² ГОСТ 22356–77. Болты и гайки высокопрочные и шайбы. Общие технические условия : введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 07.02.1977 № 309.

³ ГОСТ Р 52644–2006. Болты высокопрочные с шестигранной головкой с увеличенным размером под ключ для металлических конструкций. Технические условия : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27.12.2006 № 409-ст.

Сегодня единственным способом контроля натяжения болта, допустимым к применению отечественными нормативными документами, является контроль момента закручивания⁴. Хотя в СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» допускается контроль натяжения болтов по углу поворота гайки для болтов М24 класса прочности 10.9. Учитывая широкое распространение в настоящее время динамометрических ключей, данный способ может использоваться на монтаже, однако при этом следует ежедневно тарировать ключ, что служит дополнительной технологической операций, т.е. повышает трудоемкость.

Крутящий момент, который необходимо приложить, чтобы обеспечить натяжение болта, определяют по выражению:

$$M_{кр} = kd_b P_{bh}, \quad (1)$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент, Н·м; k — коэффициент закручивания болта; d — диаметр болта, мм; P_{bh} — усилие растяжения, кН, указано в нормах.

Величина требуемого крутящего момента также приведена в нормативной литературе [19], это значение важно, поскольку от него зависит, будет ли фрикционное соединение работать в соответствии с теорией, и, кроме того, момент закручивания является единственным параметром, который можно контролировать в монтажных условиях без привлечения дополнительного оборудования и высококвалифицированного персонала.

Как следует из формулы (1), крутящий момент $M_{кр}$ прямо пропорционально зависит от коэффициента закручивания болта k . Соответственно, от точности и правильности определения его значения зависит точность получения усилия растяжения P_{bh} и в конечном итоге несущая способность соединения Q_{bh} .

В каждой партии болтокомплекта для предварительного натяжения производитель указывает значение коэффициента закручивания k . Болтокомплект должен иметь коэффициент закручивания в пределах не более 0,20 и не менее 0,14 и определяется с помощью динамометра по методике ГОСТ 22356–77 «Болты и гайки высокопрочные и шайбы. Общие технические условия» [20].

В настоящей статье предложен и испытан альтернативный метод определения коэффициента закручивания болта с помощью тензодатчиков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На первом этапе исследования определим несущую способность болтокомплекта на растяжение для выявления резерва несущей способности и возможности превышения требуемого значения.

⁴ СТО НОСТРОЙ 2.10.76–2012. Болтовые соединения. Правила и контроль монтажа, требования к результатам работ. М. : ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», Изд-во БСТ, 2013. 48 с.

Для установления коэффициента закручивания k использованы высокопрочные болтокомплекты, состоящие из болта М14 класса прочности 10.9 из стали по немецкому стандарту DIN 931, и высокопрочные шайбы и гайки из стали по немецкому стандарту DIN 934. В соответствии с требованиями СТП 006–97, ГОСТ 1759.4–87 и ГОСТ Р 52643–2006 для исследования было использовано 5 болтокомплектов. Исследование проводилось в лаборатории испытаний строительных материалов, изделий и конструкций НИУ МГСУ головного регионального центра коллективного пользования.

Испытуемые болтокомплекты устанавливались в разрывную машину Instron 1000HDX (рис. 1) и доводились до разрушения с построением соответствующих диаграмм работы материала. С целью избежания среза резьбы при растяжении на каждый болт было накручено 3 гайки. Как и ожидалось, при одноосном растяжении разрушение болтов произошло по нарезанной части болта (рис. 2).



Рис. 1. Установка высокопрочного болта в разрывной машине

Fig. 1. Fixing a high-strength bolt in a testing machine



Рис. 2. Разрушение болта по нарезанной части

Fig. 2. Bolt failure along the threaded part

Выявление фактической несущей способности болта необходимо для установления максимального крутящего момента, который можно приложить при закручивании гайки. На втором этапе исследования определялся коэффициент закручивания болтокомплекта.

Предварительно каждый болтокомплект был подготовлен в соответствии с требованиями нормативного документа и на него наклеен тензодатчик базой 5 мм (FLA-5-11).

Высокопрочный болтокомплект размещался в силовой раме с установкой по одной высокопрочной шайбе под головку и гайку и подключался (рис. 3) к системе сбора данных National Instruments, которая снимала данные по относительному удлинению болта. Натяжение болта осуществлялось путем закручивания гайки тарированным динамометрическим ключом ($\max M_{кр} = 360 \text{ Н}\cdot\text{м}$) с возможным шагом увеличения момента в $2 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Закручивание болта осуществлялось с постоянной скоростью, без рывков, для эксперимента принят шаг изменения крутящего момента $20 \text{ Н}\cdot\text{м}$.



Рис. 3. Испытание болта в силовой раме

Fig. 3. Testing the bolt in the load frame

При испытании первого болта произошло продавливание (прорезание) шайбы гайкой, видимо, из-за значительной разницы между диаметром отверстия и диаметром болта, которая составила 5 мм (рис. 4). Поэтому для релевантности проведено испытание болта в комплекте пластин с вырезом для обеспечения целостности тензодатчиков (рис. 5).



Рис. 4. Продавливание шайбы

Fig. 4. Pushing the washer

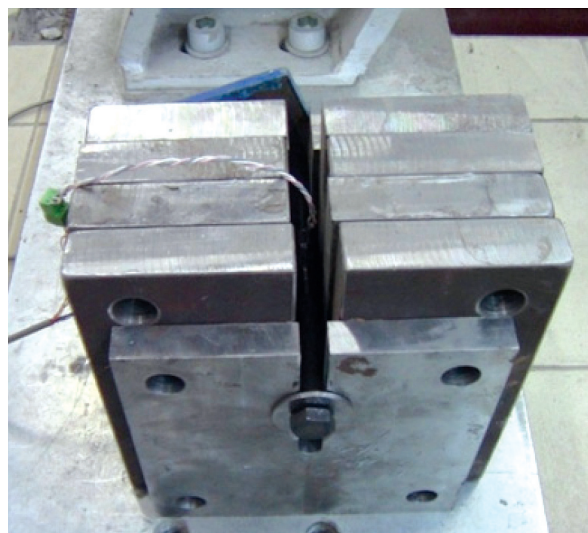


Рис. 5. Испытание болта в пакете пластин

Fig. 5. Testing the bolt in a package of plates

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате эксперимента на осевое растяжение болтокомплекта аналитическим модулем испытательного комплекса построена условная диаграмма работы стали болтов (рис. 6, а-с). В табл. 1 указаны предел прочности исследованных болтов, соответствующее относительное удлинение и номинальная несущая способность болта по сертификату.

В результате испытания болтокомплекта определяются данные по удлинению болта в мм и напряжению в МПа. Относительная деформация рассчитывалась по выражению:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} 100 \%,$$

где Δl — это удлинение в мм, которое выдает испытательный стенд; l — длина болта от головки до места разрушения, которая определяется приближенно, поскольку не понятно, какое именно сечение болта считать местом разрушения, потому что единой плоскости не наблюдается.

Ошибка в измерении места разрушения болта составляет 10 мм, что дает разницу в определяемой относительной деформации 0,25 % (180 и 190 мм).

Кроме того, на начальном этапе испытания на растяжение происходит перемещение (обмятие/посадка) болтокомплекта в зажимах, о чем свидетельствует фрагмент таблицы с числовыми данными, приведенными в табл. 2, и горизонтальный участок на графиках образцов № 1 и 2 (точки 1, 2).

Маловероятно, что при напряжении 1,6 МПа (0,16 кН/см²) болт удлинился на 1 мм. Буквально через 0,02 МПа (1,7 МПа) образец удлинился еще на 1 мм, и при напряжении 11,7 МПа (1,17 кН/см²) имеет удлинение 3 мм. Более существенный рост напряжений от 40 до 100 МПа соответствует уд-

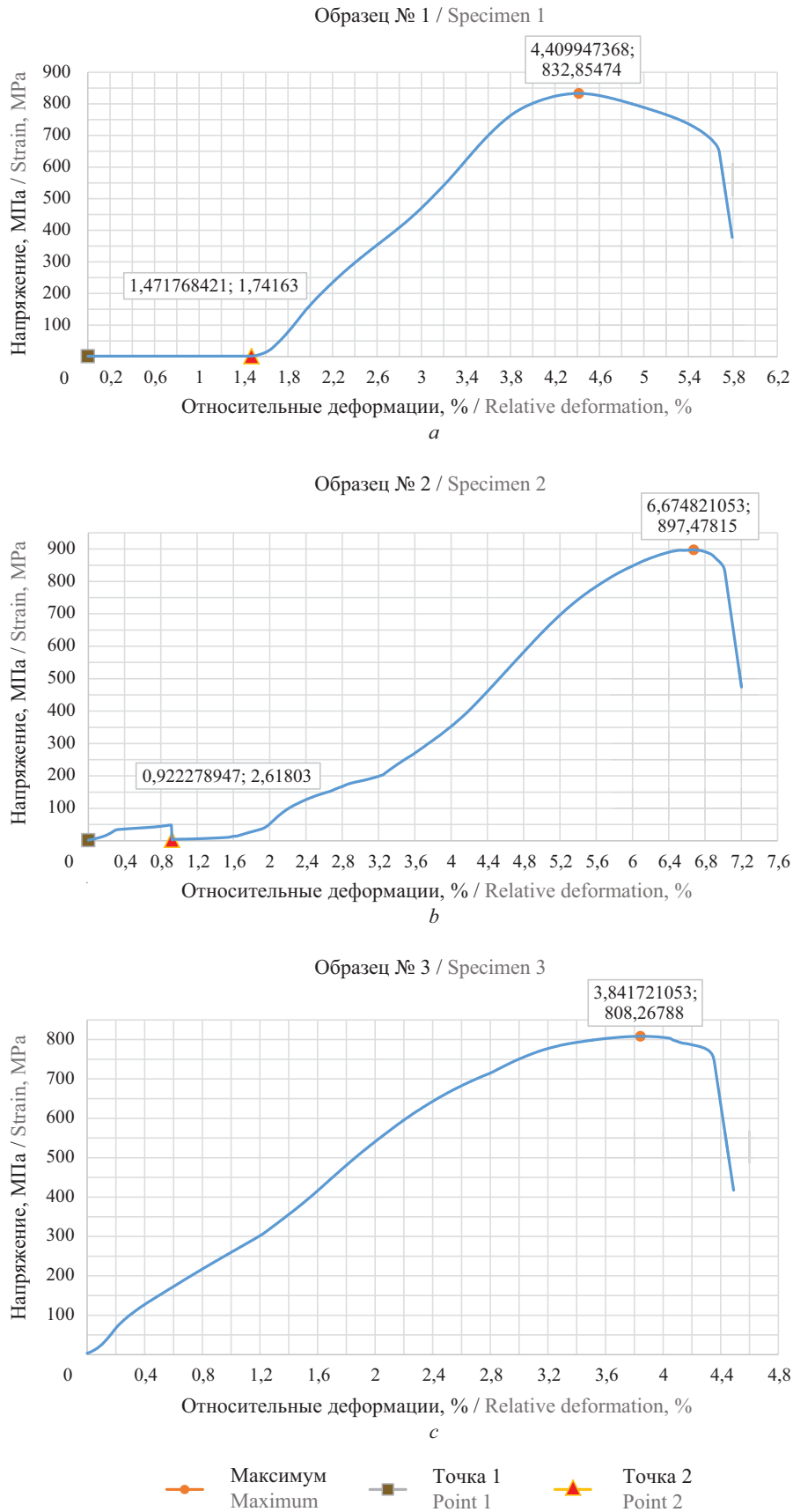


Рис. 6. Условная диаграмма работы стали болтов

Fig. 6. Conventional diagram showing the behavior of steel bolts

Табл. 1. Значения прочностных величин при испытании

Table 1. The values of strength during testing

Удлинение болта, мм Bolt elongation, mm	Усилие натяжения, кН Tensile strength, kN	Напряжение, МПа Strain, MPa	Относительная деформация, % Relative deformation, %
1,007	0,259	1,687	0,53
2,013	0,263	1,709	1,05
3,013	1,815	11,796	1,58
3,229	6,278	40,787	1,69
3,296	8,141	52,888	1,73
3,413	11,779	76,520	1,79
3,429	12,334	80,127	1,80
3,479	13,991	90,888	1,83
3,521	15,445	100,33	1,85

Табл. 2. Значения фактических и номинальных прочностных характеристик болта

Table 2. Values of actual and nominal bolt strength

Образец Specimen	Несущая способность болта, МПа Bolt bearing capacity, MPa	Соответствующее значение относительной деформации ε , % Corresponding value of relative deformation ε , %	Несущая способность болта по сертификату, МПа Bolt bearing strength according to the certificate, MPa
1	832,9	~ 3,0	780
2	897,5	~ 5,7	780
3	808,3	~ 3,8	780

линению болта с 3,01 до 3,52 мм. Таким образом, 3 мм деформации можно отнести на посадку болта в зажимах, что дает разброс относительной деформации более 60 %:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 \% = \frac{8,37}{180} \cdot 100 = 4,65 \%;$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 \% = \frac{8,37 - 3,0}{180} \cdot 100 = 2,98 \%;$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 \% = \frac{8,37}{190} \cdot 100 = 4,4 \%;$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 \% = \frac{8,37 - 3,0}{190} \cdot 100 = 2,82 \%.$$

Во второй части эксперимента при определении коэффициента закручивания практически все образцы достигают пика растяжения при моменте 200 Н·м, а при достижении 220 Н·м происходит срез резьбы.

После обработки полученных данных были построены графики зависимости $M - \varepsilon$ (рис. 7).

Из анализа графика можно сделать вывод, что болт работает в упругой стадии и достижение предельного состояния происходит за счет среза резьбы, т.е. материал болта не доходит до пластической стадии работы.

Следовательно, можно использовать закон Гука для определения нормальных напряжений в болте:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где E — 20 600 кН/см² — модуль Юнга; ε — относительные деформации.

Построим графики в координатах: напряжение $\sigma - M_{кр}$ (рис. 8).

Далее по формуле определения напряжений в растянутых элементах $\delta = P/A$, вычислим осевое усилие натяжения болта P и построим график зависимости усилия натяжения болта $P - M_{кр}$ (рис. 9).

На заключительном этапе рассчитан коэффициент закручивания болта по формуле:

$$k = \frac{M_{кр}}{Pd}.$$

Хотя по нормам коэффициент закручивания k определяется для одного значения крутящего момента, был построен график изменения коэффициента от момента закручивания, из которого видно, что значение коэффициента увеличивается в зависимости от момента закручивания (рис. 10).

В табл. 3 представлены результаты испытаний одного из болтокомплектов и вычисленные значения коэффициента закручивания k .

Расчетная площадь сечения болта — 1,15 см², $E = 20\,600$ кН/см².

Из представленных данных следует, что при различной величине крутящего момента коэффициент также имеет разные значения. Это означает, что если поставить цель затянуть болт на усилие,

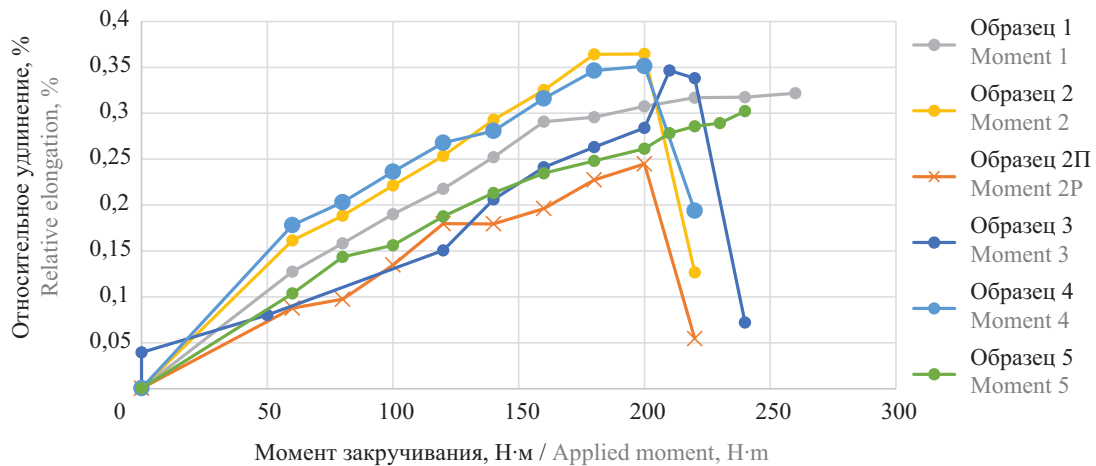


Рис. 7. Зависимость относительного удлинения от приложенного момента

Fig. 7. Dependence of relative elongation on the applied moment

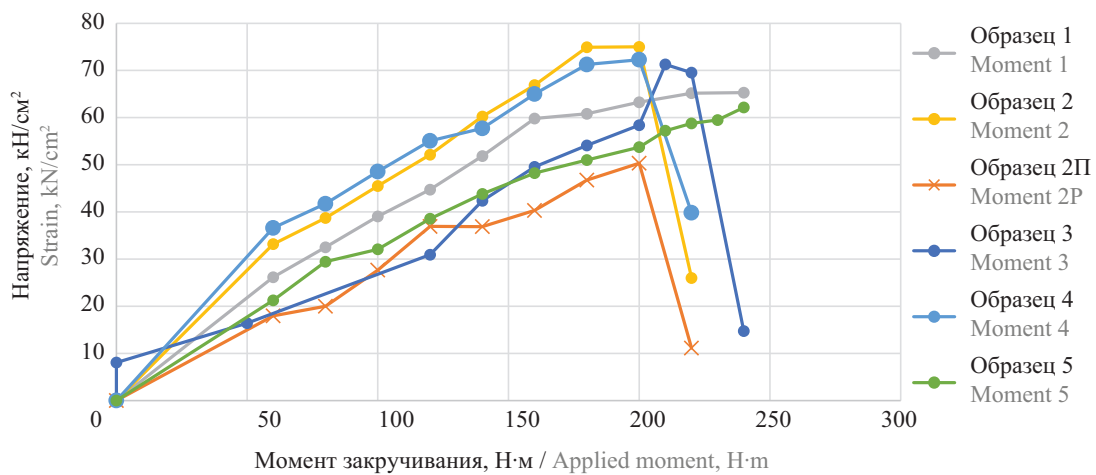


Рис. 8. Изменение напряжения от приложенного момента

Fig. 8. A change in strain from the applied moment

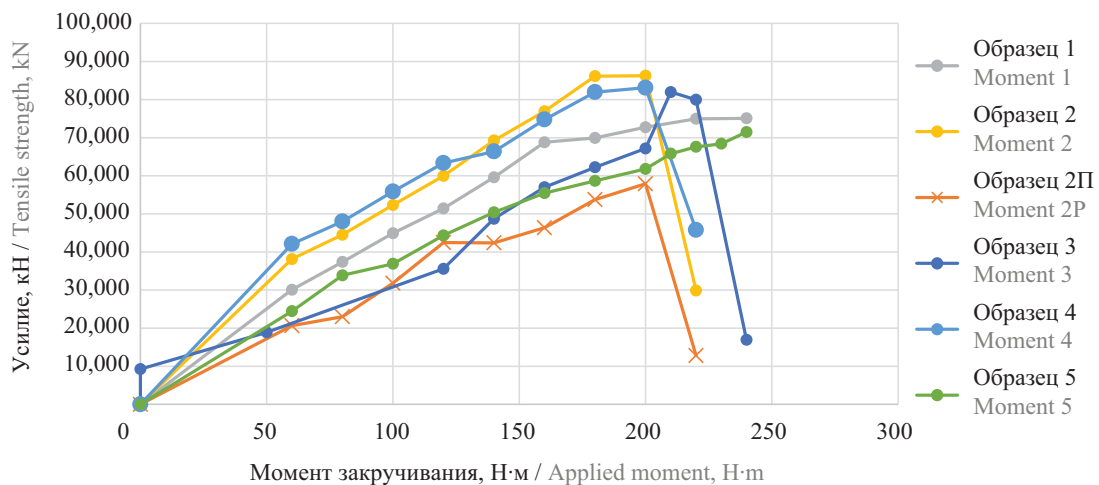


Рис. 9. Изменение натяжения болта от приложенного момента

Fig. 9. A change in tensile strength from the applied moment

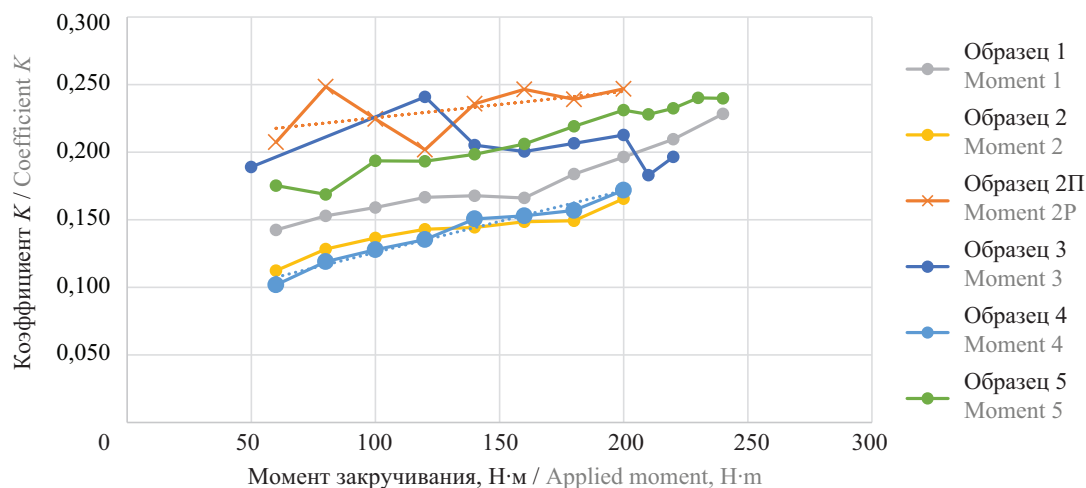


Рис. 10. Зависимость коэффициента закручивания от приложенного момента

Fig. 10. A change in torsion coefficient from the applied moment

Табл. 3. Полученные значения прочностных характеристик

Table 3. Resulting values of strength characteristics

Болт 4 / Bolt 4				
Момент закручивания, Н·м Applied moment, Н·м	Относительные деформации, % Relative deformation, %	Напряжение, кН/см ² Strain, kN/cm ²	Усиление натяжения, кН Tensile strength, kN	Коэффициент закручивания K Torsion coefficient K
60	0,178	36,60	42,095	0,102
80	0,203	41,73	47,994	0,119
100	0,236	48,56	55,847	0,128
120	0,267	55,07	63,340	0,135
140	0,280	57,71	66,368	0,151
160	0,316	65,011	74,763	0,153
180	0,346	71,259	81,948	0,157
200	0,351	72,27	83,112	0,172
220	0,193	39,809	45,781	0,343

несколько меньшее, чем указано в нормативных документах, то необходимо не только уменьшать крутящий момент, но и учитывать другое значение коэффициента закручивания, которое будет отличаться от значения в сертификате.

В Приложении ДА ГОСТ 32484.3–2013 приведены рекомендуемые усилия натяжения болтокомплектов для определения коэффициента закручивания. Значение коэффициента устанавливают в момент достижения заданного нормативного усилия натяжения болта, при котором фиксируют значение крутящего момента. Для болта М14 класса прочности 10,9 нормативное усилие натяжения составляет 80,5 кН и возникающее напряжение 700 Н/мм².

Болт 1 не достиг нормативного усилия натяжения, поскольку стал обминать силовую раму, и произошло продавливание шайбы.

Для болта 2 приведены два смежных значения при моменте закручивания 160 и 180 Н·м, откуда

видно, что требуемые значения находятся в промежутке между снятыми показаниями, коэффициент закручивания в обоих случаях имеет значение $k = 0,149$.

Для статистической обработки полученных результатов определим коэффициент вариации коэффициента закручивания, который должен быть не больше 0,10. Так что значение коэффициента закручивания $k = 0,240$ для болта 5 не следует учитывать.

Установленные индивидуальные значения коэффициента закручивания приведены в табл. 4. Среднее значение коэффициента закручивания испытуемой партии болтокомплектов $k_m = 0,163$ находится в пределах ГОСТ 32484.3–2013: 0,11–0,20, что свидетельствует о возможности применения представленного способа определения коэффициента закручивания высокопрочного болта.

Табл. 4. Значения коэффициента закручивания

Table 4. Values of the torsion coefficient

Номер болта Bolt Number	Момент закручивания, Н·м Applied moment, Н·м	Относительная деформация, % Relative deformation, %	Напряжение, кН/см ² Strain, kN/cm ²	Усилие натяжения, кН Tensile strength, kN	Коэффициент закручивания <i>K</i> Torsion coefficient <i>K</i>
Требуемые значения по ГОСТ Values required according to GOST			70	80,5	0,11–0,20
2	160	0,32473	66,894	76,929	0,149
	180	0,36365	74,911	86,149	0,149
3	210	0,34604	71,284	81,977	0,183
4	180	0,346	71,259	81,948	0,157
5	270	0,33976	69,990	80,489	0,240
Среднее значение коэффициента закручивания The average value of the torsion coefficient					0,163
Стандартное отклонение Standard deviation					0,01777
Коэффициент вариации коэффициента закручивания Coefficient of variation of the torsion coefficient					0,10905

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В проведенных исследованиях сделаны выводы об оценке прочности высокопрочных болтокомплектов немецкого стандарта DIN 931, указаны способы и приемы, которые позволяют определить прочность болтов и коэффициент закручивания. Получены экспериментальные данные, которые дают возможность оценить усилие, при котором будет достигаться требуемый коэффициент закручивания,

и установлена зависимость коэффициента закручивания от момента закручивания.

В статье предложена и описана методика определения коэффициента закручивания высокопрочного болтокомплекта для предварительного натяжения. Требуются дополнительные экспериментальные исследования, подтверждающие полученные данные, для оценки представленного метода и применения его с болтами других диаметров и прочностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тихонов С.М., Алехин В.Н., Беляева З.В. и др. Проектирование металлических конструкций. Часть 1: Металлические конструкции. Материалы и основы проектирования : учебник. М. : Перо, 2020. 468 с.
2. Богданов Т.М. Соединения металлических конструкций на высокопрочных болтах. М. : Трансжелдориздат, 1963. 112 с.
3. Клюкин А.Ю., Фимкин А.И., Шейкин А.А. Экспериментальное определение жесткости фрикционных соединений на высокопрочных болтах в стадии предварительного сдвига // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 3 (28). С. 222–227.
4. Герасимов В.Я., Парышев Н.Д., Герасимова О.В. Сравнение временного сопротивления и коэффициента закручивания при механических испытаниях высокопрочных болтов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. № 2 (38). С. 53–54.

5. Jiang C., Xiong W., Cai C.S., Zhu Y., Liu Z. Experimental study on the shear behavior of friction connections with corrosion damage // Journal of Constructional Steel Research. 2022. Vol. 197. P. 107449. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107449
6. Xie R., Golondrino J.C., MacRae G.A., Clifton G.C. Braced frame symmetrical and asymmetrical friction connection performance // Key Engineering Materials. 2018. Vol. 763. Pp. 216–223. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.763.216
7. Aloisio A., Contento A., Boggian F., Tomasi R. Probabilistic friction model for aluminium–steel Asymmetric Friction Connections (AFC) // Engineering Structures. 2023. Vol. 274. P. 115159. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115159
8. Ferjaoui A., Yue T., Wahab M.A., Hojjati-Talemi R. Prediction of fretting fatigue crack initiation in double lap bolted joint using continuum damage mechanics // International Journal of Fatigue. 2015. Vol. 73. Pp. 66–76. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.11.012

9. Yan Z., Bagheri H., Ramhormozian S., Clifton G.C., Rangwani K., Dhakal R.P. et al. Three-storey configurable steel framed building incorporating friction based energy dissipaters: Structural configuration and instrumentation // New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Technical. 2021.

10. Мартынов Г.В., Монастырева Д.Е., Макаров А.И., Морина Е.А. Напряженно-деформированное состояние фрикционных соединений с лазерной обработкой контактных поверхностей // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 1. С. 72–82. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.72-82

11. Коваленко А.И., Конин Д.В., Нахвальнов П.В., Соловьев Д.В. Экспериментальное исследование коэффициента трения фрикционных болтовых соединений // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 4 (303). С. 61–67. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.4.61.67

12. Ведяков И.И., Конин Д.В., Нахвальнов П.В. Экспериментальное исследование фрикционных болтовых соединений из высокопрочных сталей // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 7. С. 24–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.07.24-33

13. Семенов А.А., Маляренко А.А., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н. Напряженно-деформированное состояние высокопрочных болтов фланцевых соединений в укрупнительных стыках стропильных ферм // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5 (49). С. 54–62. DOI: 10.5862/МСЕ.49.6

14. Солодов Н.В. Прочность и деформативность при смятии в болтовом соединении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 82–87. DOI: 10.12737/23889

15. Ramhormozian S., Clifton G.C., Bergen B., White M., Macrae G.A. An experimental study on the Asymmetric Friction Connection (AFC) optimum installed bolt tension // NZSEE Annual Technical Conference and 15th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures. 2017.

16. Cui Y., Yan Z., Wang X., Wang T. Experimental studies on slip friction device using symmetric friction connections // Structures. 2022. Vol. 44. Pp. 1886–1897. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.09.005

17. Конин Д.В., Нахвальнов П.В., Олуромби А.Р. Исследование многоболтовых сдвигоустойчивых соединений элементов стальных конструкций из сталей с пределом текучести до 500 МПа // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 4 (291). С. 8–17. DOI: 10.37538/0039-2383.2020.4.8.17

18. Klyukin A.Yu. Mathematical model of a friction joint consisting of two sheets // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2014. № 3 (23). Pp. 84–99.

19. Mascenik J., Coranic T. Experimental determination of the coefficient of friction on a screw joint // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 23. P. 11987. DOI: 10.3390/app122311987

20. Wettstein A., Matthiesen S. Investigation of the thread coefficient of friction when impact tightening bolted joints // Forschung im Ingenieurwesen. 2020. Vol. 84. Issue 1. Pp. 55–63. DOI: 10.1007/s10010-019-00392-z

21. Hol J., Cid Alfaro M.V., de Rooij M.B., Meinders T. Advanced friction modeling for sheet metal forming // Wear. 2012. Vol. 286–287. Pp. 66–78. DOI: 10.1016/j.wear.2011.04.004

Поступила в редакцию 10 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 5 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Андрей Александрович Василькин — кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 636406, Scopus: 57192557109; vasilkinaa@mgsu.ru;

Роман Маратович Ахметзянов — магистр кафедры металлических и деревянных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; LevVol29@gmail.com.

Вклад авторов:

Василькин А.А. — научное руководство, научное редактирование текста статьи.

Ахметзянов Р.М. — подготовка моделей, проведение эксперимента, обработка результатов эксперимента.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tikhonov S.M., Alekhin V.N., Belyaeva Z.V. et al. *Design of steel structures. Part 1: Steel constructions. Materials and basic designing : handbook*. Moscow, Pero Publ., 2020; 468. (rus.).
2. Bogdanov T.M. *Connections of metal structures on high-strength bolts*. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1963; 112. (rus.).
3. Klyukin A.Y., Fimkin A.I., Sheikin A.A. The experimental definition of rigidity of frictional joints in high-strength bolts on the stage of prior-shearing. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta/Journal of Construction and Architecture*. 2010; 3(28):222-227. (rus.).
4. Gerasimov V.Y., Paryshev D.N., Gerasimova O.V. Comparison of temporary resistance and twisting coefficient at mechanical testing of high-strength bolts. *Vestnik of Novosibirsk State Technical University*. 2012; 2(38):53-54. (rus.).
5. Jiang C., Xiong W., Cai C.S., Zhu Y., Liu Z. Experimental study on the shear behavior of friction connections with corrosion damage. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022; 197:107449. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107449
6. Xie R., Golondrino J.C., MacRae G.A., Clifton G.C. Braced frame symmetrical and asymmetrical friction connection performance. *Key Engineering Materials*. 2018; 763:216-223. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.763.216
7. Aloisio A., Contento A., Boggian F., Tomasi R. Probabilistic friction model for aluminium–steel Asymmetric Friction Connections (AFC). *Engineering Structures*. 2023; 274:115159. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115159
8. Ferjaoui A., Yue T., Wahab M.A., Hojjati-Talemi R. Prediction of fretting fatigue crack initiation in double lap bolted joint using continuum damage mechanics. *International Journal of Fatigue*. 2015; 73:66-76. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.11.012
9. Yan Z., Bagheri H., Ramhormozian S., Clifton G.C., Rangwani K., Dhakal R.P. et al. Three-storey configurable steel framed building incorporating friction based energy dissipaters: Structural configuration and instrumentation. *New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Technical*. 2021.
10. Martynov G.V., Monastireva D.E., Markarov A.I., Morina E.A. Stress-strain state of friction joints with laser treatment of contact surfaces. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14:1:72-82. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.72-82 (rus.).
11. Kovalenko A.I., Konin D.V., Nahvalnov P.V., Solovov D.V. Experimental study of the coefficient of friction in slip critical bolt joints. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2022; 4(303):61-67. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.4.61.67 (rus.).
12. Vedyakov I.I., Konin D.V., Nahvalnov P.V. Experimental study of friction bolted joints made of high-strength steels. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 7:24-33. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.07.24-33 (rus.).
13. Semenov A.A., Malyarenko A.A., Porivaev I.A., Safiullin M.N. Stress-strain behavior investigation of friction grip bolts in flange joints of trusses. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 5(49):54-62. DOI: 10.5862/MCE.49.6 (rus.).
14. Solodov N.V. Strength and deformability when crumpled in a bolted joint. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017; 1(2):82-87. DOI: 10.12737/23889 (rus.).
15. Ramhormozian S., Clifton G.C., Bergen B., White M., Macrae G.A. An experimental study on the Asymmetric Friction Connection (AFC) optimum installed bolt tension. *NZSEE Annual Technical Conference and 15th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*. 2017.
16. Cui Y., Yan Z., Wang X., Wang T. Experimental studies on slip friction device using symmetric friction connections. *Structures*. 2022; 44:1886-1897. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.09.005
17. Konin D.V., Nakhvalnov P.V., Olurombi A.R. Engineering method for calculating a gable block made of membrane panels. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2020; 4(291):8-17. DOI: 10.37538/0039-2383.2020.4.8.17 (rus.).
18. Klyukin A.Yu. Mathematical model of a friction joint consisting of two sheets. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2014; 3(23):84-99.
19. Mascenik J., Coranic T. Experimental determination of the coefficient of friction on a screw joint. *Applied Sciences*. 2022; 12(23):11987. DOI: 10.3390/app122311987
20. Wettstein A., Matthiesen S. Investigation of the thread coefficient of friction when impact tightening bolted joints. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2020; 84(1):55-63. DOI: 10.1007/s10010-019-00392-z
21. Hol J., Cid Alfaro M.V., de Rooij M.B., Meinders T. Advanced friction modeling for sheet metal forming. *Wear*. 2012; 286-287:66-78. DOI: 10.1016/j.wear.2011.04.004

Received January 10, 2023.

Adopted in revised form on February 5, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

B I O N O T E S: **Andrey A. Vasilkin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 636406, Scopus: 57192557109; vasilkinaa@mgsu.ru;

Roman M. Akhmetzyanov — Master of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; LevVol29@gmail.com.

Contribution of the authors:

Andrey A. Vasilkin — scientific guidance, scientific editing of the text of the article.

Roman M. Akhmetzyanov — preparation of models, conducting an experiment, processing the results of the experiment.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400

Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной

Михаил Юрьевич Трошин, Андрей Викторович Турков

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева);
г. Орел, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Ключевой особенностью древесины, а также материалов из нее, является резко выраженная разница механических свойств в различных направлениях, именуемая анизотропией. Конструкция плиты из древесины перекрестно-клееной (ДПК) или CLT-панели позволяет достигнуть высокой прочности и жесткости за счет перекрестного расположения волокон во взаимно перпендикулярных слоях. Рассмотрено влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах ДПК. Актуальность работы обусловлена необходимостью получения расчетных данных для анализа изменения прочностных характеристик плит с целью выбора наиболее эффективной конфигурации плиты.

Материалы и методы. Ввиду отсутствия стандартизированной методики испытаний исследования были проведены численными методами при помощи программно-вычислительного комплекса SCAD+. Расчетная схема определена как система общего вида, деформации которой и ее основные неизвестные представлены линейными перемещениями узловых точек вдоль осей X , Y , Z и поворотами вокруг этих осей. В качестве расчетной конструкции выбрана трехслойная плита, наружные слои которой являются продольными, а внутренний — поперечным. Упрощенная расчетная схема представляет собой шарнирно опертую балку.

Результаты. По результатам исследования и произведенных расчетов в SCAD+ составлены таблицы, на основании которых построены графики, отражающие зависимость прогиба, распределения нормальных и тангенциальных напряжений от толщины поперечных и продольных слоев плиты.

Выводы. Полученные данные позволяют оценить влияние толщины на деформативность и распределение напряжений в трехслойных CLT-панелях для подбора эффективной конструкции. Изменение толщины не всегда дает большую разницу механических свойств, что позволяет произвести оптимизацию параметров плиты. Значимость выполненных исследований заключается в том числе в расширении научно-технической базы знаний в области деревянных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деревянные конструкции, CLT-панели, древесина, распределение напряжений, толщина, прогиб

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 391–400. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400

Автор, ответственный за переписку: Михаил Юрьевич Трошин, mtr997@mail.ru.

The effect of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in three-layer panels made of cross-laminated timber

Mikhail Yu. Troshin, Andrey V. Turkov

Orel State University named after I.S. Turgenev (OSU named after I.S. Turgenev); Orel, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The key feature of timber and materials, made from it, is anisotropy, or a pronounced difference between mechanical properties manifested in different directions. The construction of a cross-laminated timber plate, or a CLT panel, ensures its high strength and rigidity due to the perpendicular arrangement of fibers in mutually perpendicular layers. The article examines the effect of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in three-layer CLT panels. The relevance of the work lies in the need to obtain computational data for analyzing changes in strength characteristics of panels to select the most effective panel configuration.

Materials and methods. Due to the lack of a standardized testing methodology, SCAD+ software package was applied to conduct the studies using numerical methods. The design scheme is identified as a general system whose deformations and principal unknowns are represented by linear displacements of nodal points along the X , Y , Z axes and rotations around these axes. A three-layer plate was selected as the element to be analyzed, the outer layers of which are longitudinal, and the inner one is transverse. Its simplified design scheme is a hinged beam.

Results. The results of the study and calculations made using SCAD+ were applied to make tables and graphs showing dependence of deflection, distribution of normal and shear stresses on thickness of transverse and longitudinal layers of timber. **Conclusions.** The data, obtained by the authors, allow evaluating the effect of thickness on deformability and stress distribution in three-layer CLT panels to select the effective design. A change in thickness does not always bring a large difference between mechanical properties, which allows optimizing the panel parameters. The significance of the research lies, among other things, in expanding the scientific and engineering knowledge of timber structures.

KEYWORDS: timber structures, CLT panels, timber, stress distribution, thickness, deflection

FOR CITATION: Troshin M.Yu., Turkov A.V. The effect of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in three-layer panels made of cross-laminated timber. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):391-400. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400 (rus.).

Corresponding author: Mikhail Yu. Troshin, mtr997@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Древесина является уникальным природным материалом, используемым во многих отраслях промышленности и в различных сферах жизнедеятельности человека [1]. Особый интерес представляют конструкции из перекрестно-клееной древесины. Древесина перекрестно-клееная (ДПК, Cross-Laminated Timber — CLT) — это произведенная заводским способом деревянная массивная плита, состоящая не менее чем из трех ортогонально склеенных слоев из цельных или сращенных по длине на зубчатое соединение досок, предназначенная для использования в несущих и ограждающих строительных конструкциях, изготавливаемая в соответствии со стандартом¹. Преимущества данных конструкций подтверждены многими исследованиями, а также практическим опытом строительства в мире [2, 3].

ДПК, как правило, изготавливается из мягких пород древесины, но есть производители, которые используют и другие породы. CLT-панели обычно состоят из трех, пяти, семи или девяти чередующихся слоев досок или бруса толщиной 20–60 мм. Некоторые производители делают плиты с более чем девятью слоями. Это возможно благодаря анизотропии древесины и связанным с ней различными характеристиками прочности и жесткости древесины параллельно и перпендикулярно волокнам. Также немаловажно то, что, помимо анизотропии отдельно взятых CLT-панелей, имеются структурные анизотропные свойства ортогонально расположенных плит в поперечном сечении. Данное качество приводит к передаче нагрузки по двум осям и влияет на характеристики прочности и деформации CLT-панелей.

Исследованием механических свойств плит из древесины перекрестно-клееной (CLT-панелей) при разных условиях занимались как зарубежные [2–8], так и отечественные авторы [9–19]. Однако, несмотря на растущее количество публикаций [20], исследований таких конструкций недостаточно, и целью настоящего исследования является изуче-

ние влияния толщины продольных и поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах ДПК.

Цель данной статьи — исследование несущей способности и деформативности плит из ДПК при различной толщине продольных и поперечных слоев досок. Полученные результаты позволят расширить научно-техническую базу знаний в области деревянных конструкций.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбрать шаг изменения толщин продольных и поперечных слоев;
- смоделировать расчетную конструкцию в соответствии с выбранной расчетной схемой в программном комплексе (ПК) SCAD+;
- провести симуляции нагружения созданной модели и систематизировать полученные данные;
- выполнить анализ результатов расчетов и сделать выводы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования осуществлены численными методами при помощи программно-вычислительного комплекса SCAD+. Расчетная схема определена как система общего вида, деформации которой и ее основные неизвестные представлены линейными перемещениями узловых точек вдоль осей X , Y , Z и поворотами вокруг этих осей.

Расчетная конструкция — трехслойная плита из перекрестной древесины, шарнирно опертая на опорах. Пространственная модель показана на рис. 1.

Плиты закреплены по нижнему слою с двух противолежащих сторон пластин по направлению XZ и XYZ . Загружение плиты из перекрестной древесины задается равномерно распределенной нагрузкой на грани объемных элементов, равной $2,5 \text{ кН/м}^2$. Конструкция имеет длину 5890 мм и ширину 1140 мм. Остроганные по четырем сторонам доски в слоях имеют ширину 190 мм. Расчетная схема представлена на рис. 2.

¹ ГОСТ Р 56706–2022. Плиты из перекрестно-клееной древесины. Общие технические условия.

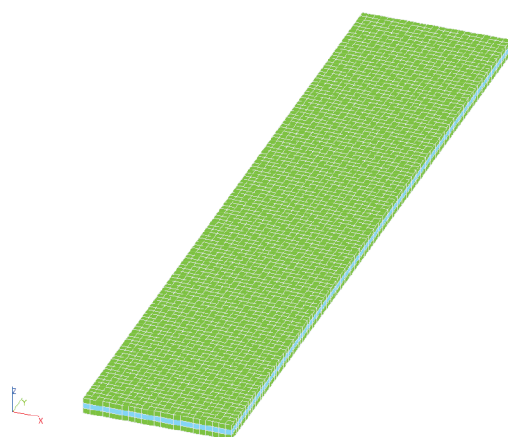


Рис. 1. Общий вид расчетной модели трехслойной плиты из перекрестной древесины

Fig. 1. General view of the design model of a three-layer CLT panel

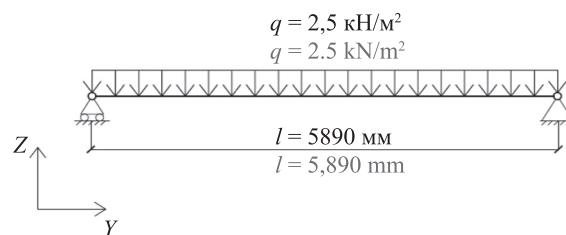


Рис. 2. Расчетная схема трехслойной плиты из перекрестной древесины

Fig. 2. Design scheme of a three-layer CLT panel

Программный комплекс SCAD+ позволяет определять механические свойства за счет присвоения расчетной модели параметров, соответствующих реальному материалу. Упругие характеристики, присвоенные конечным элементам для расчета в SCAD+, представлены на рис. 3, 4.

Модуль упругости, Т/м² / Modulus of elasticity, T/m²					
E_x	E_y	E_z			
30 592	1 172 674	30 592			

Модуль сдвига, Т/м² / Shear modulus, T/m²		
G_{xy}	G_{xz}	G_{yz}
66 282	66 282	66 282

Коэффициент Пуассона / Poisson's ratio					
ν_{xy}	ν_{yx}	ν_{xz}	ν_{zx}	ν_{yz}	ν_{zy}
0,45	0,018	0,45	0,018	0,018	0,018

Коэффициент линейного расширения, 1/°C / Coefficient of linear expansion, 1/°C		
α_x	α_y	α_z
5,е-006	5,е-006	5,е-006

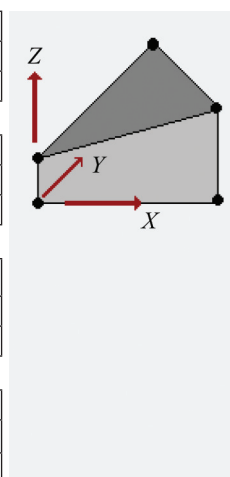


Рис. 3. Упругие характеристики ортотропных элементов в продольном направлении

Fig. 3. Elastic characteristics of orthotropic elements in the longitudinal direction

Модуль упругости, Т/м² / Modulus of elasticity, T/m²		
E_x	E_y	E_z
1 172 674	30 592	30 592

Модуль сдвига, Т/м² / Shear modulus, t/m²		
G_{xy}	G_{xz}	G_{yz}
66 282	66 282	66 282

Коэффициент Пуассона / Poisson's ratio					
ν_{xy}	ν_{yx}	ν_{xz}	ν_{zx}	ν_{yz}	ν_{zy}
0,018	0,45	0,018	0,018	0,45	0,018

Коэффициент линейного расширения, 1/°C / Coefficient of linear expansion, 1/°C		
α_x	α_y	α_z
5,е-006	5,е-006	5,е-006

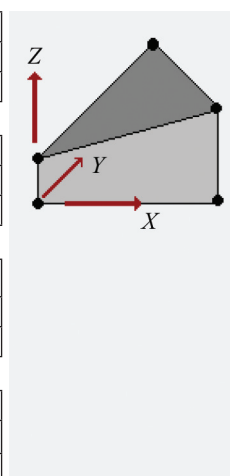


Рис. 4. Упругие характеристики ортотропных элементов в поперечном направлении

Fig. 4. Elastic characteristics of orthotropic elements in the transverse direction

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. С целью выявления основных зависимостей деформаций и напряжений от изменения толщины досок в продольном и поперечном направлениях были рассмотрены конструкции трехслойной плиты из перекрестной древесины с продольным расположением досок в наружных слоях при толщине поперечного слоя 9; 12; 18; 25; 32; 42 мм, а также при толщине продольного слоя 9; 12; 18; 25; 32; 42 мм.

2. По итогу симуляции нагружения модели с заданными характеристиками в ПК SCAD+ получен массив данных с результатами вычислений для каждого слоя при варьируемой толщине поперечных досок (табл. 1).

3. Для большей наглядности и информативности на основе полученных результатов построены линейные графики зависимости вычисляемых параметров от толщины поперечных слоев, отображенные на рис. 5–7.

 u , мм / mm


Рис. 5. Зависимость прогиба от толщины поперечных слоев

Fig. 5. Dependence of deflection on thickness of transverse layers

Табл. 1. Трехслойная CLT-панель с продольным расположением досок в наружных слоях с варьируемой толщиной поперечных слоев

Table 1. A three-layer CLT panel with longitudinal arrangement of boards in outer layers and variable thickness of transverse layers

Номер слоев Number layers	Толщина продольных слоев, мм Thickness of longitudinal layers, mm	Толщина поперечных слоев, мм Thickness of transverse layers, mm	q , кН/м ² kN/m ²	u , мм mm	N_x , кН/м ² kN/m ²	N_y , кН/м ² kN/m ²	N_z , кН/м ² kN/m ²	τ_{xy} , кН/м ² kN/m ²	τ_{xz} , кН/м ² kN/m ²	τ_{yz} , кН/м ² kN/m ²
1, 3	42	9	2,5	69,54	-44,50	-5708,60	-204,30	46,50	22,90	227,20
	42	12	2,5	63,38	-44,70	-5506,40	-204,50	44,30	20,60	221,10
	42	18	2,5	53,13	-44,50	-5126,30	-203,50	39,40	16,50	208,90
	42	25	2,5	43,89	-44,30	-4726,50	-201,00	32,80	12,40	195,10
	42	32	2,5	36,78	-43,90	-4372,60	-198,00	26,60	9,10	182,70
	42	42	2,5	29,21	-43,30	-3938,30	-194,30	19,40	9,60	168,40
2	42	9	2,5	69,54	113,60	-32,50	-128,50	7,90	30,80	233,80
	42	12	2,5	63,38	88,70	-32,10	-125,60	7,50	28,30	223,70
	42	18	2,5	53,13	60,40	-30,80	-119,20	6,50	23,50	204,50
	42	25	2,5	43,89	42,60	-29,00	-111,50	5,30	18,60	184,30
	42	32	2,5	36,78	32,00	-27,20	-104,30	4,20	19,80	166,60
	42	42	2,5	29,21	23,10	-25,00	-95,50	3,00	18,60	146,00

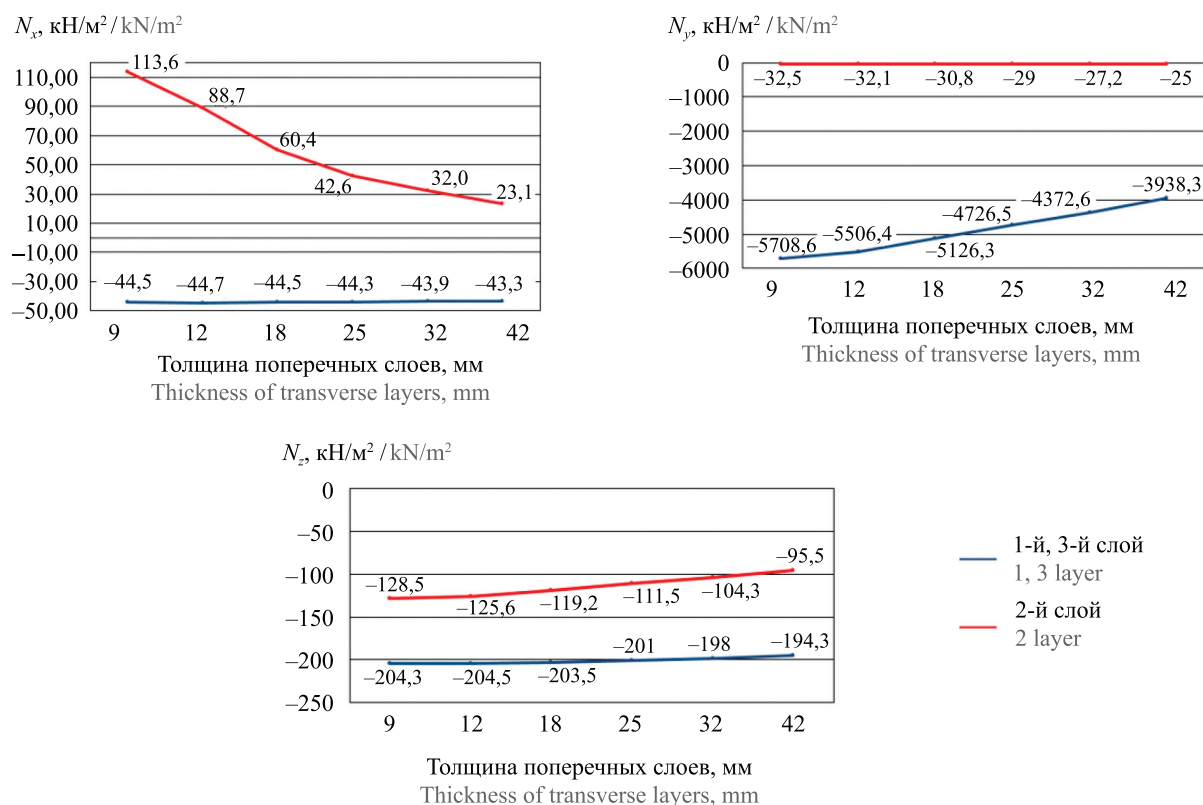


Рис. 6. Зависимость нормальных напряжений N_x , N_y , N_z от толщины поперечных слоев

Fig. 6. Dependence of normal stresses N_x , N_y , N_z on thickness of transverse layers

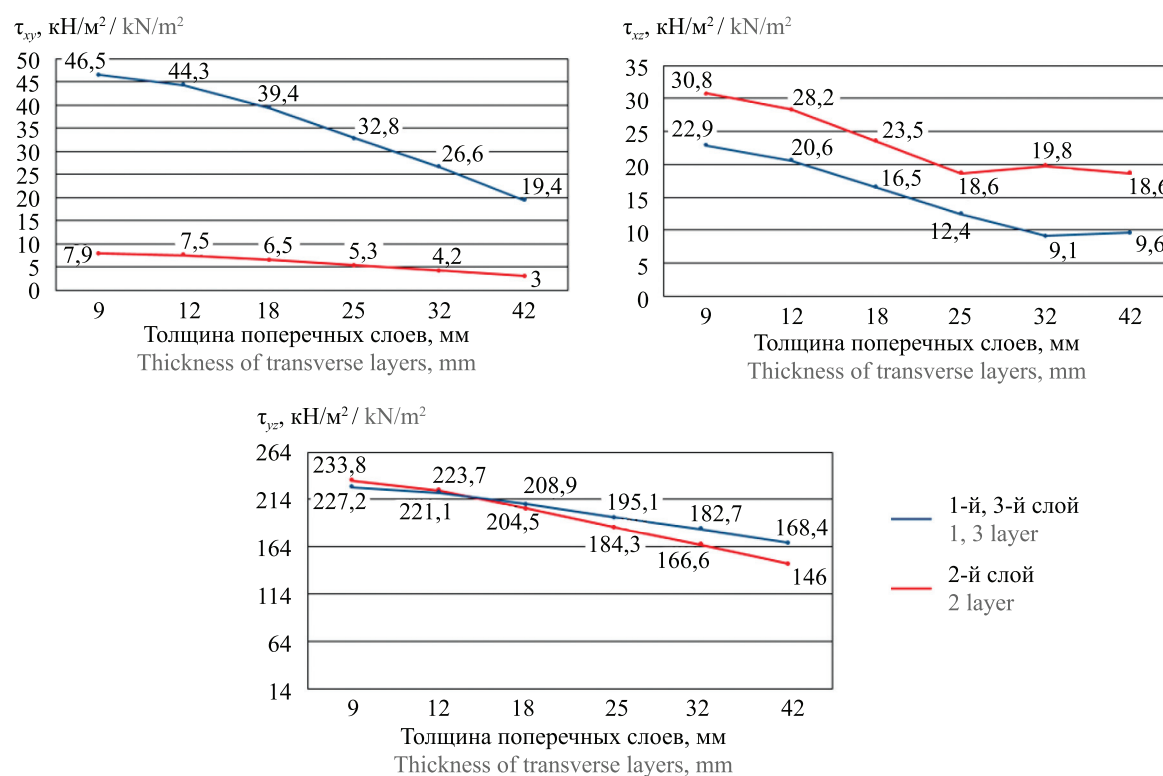


Рис. 7. Зависимость касательных напряжений τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} от толщины поперечных слоев

Fig. 7. Dependence of shear stresses τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} on thickness of transverse layers

4. Повторная симуляция выполнена для модели с варьируемой толщиной продольного слоя. Результаты занесены в табл. 2.

5. По полученным данным построены графики (рис. 8–10).

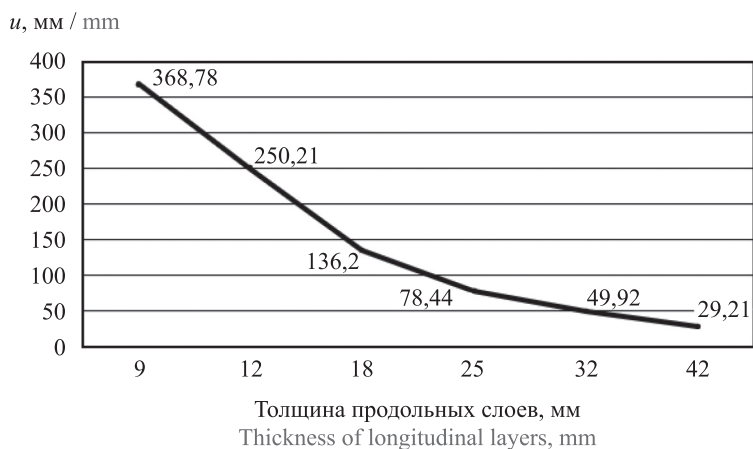


Рис. 8. Зависимость прогиба от толщины продольных слоев

Fig. 8. Dependence of deflection on thickness of longitudinal layers

Табл. 2. Трехслойная панель с продольным расположением досок в наружных слоях с варьируемой толщиной продольных слоев

Table 2. A three-layer CLT panel with longitudinal arrangement of boards in outer layers with variable thickness of longitudinal layers

Номер слоев Number layers	Толщина продольных слоев, мм Thickness of longitudinal layers, mm	Толщина поперечных слоев, мм Thickness of transverse layers, mm	q , кН/м ² kN/m ²	u , мм mm	N_x , кН/м ² kN/m ²	N_y , кН/м ² kN/m ²	N_z , кН/м ² kN/m ²	τ_{xy} , кН/м ² kN/m ²	τ_{xz} , кН/м ² kN/m ²	τ_{yz} , кН/м ² kN/m ²
1, 3	9	42	2,5	368,78	-345,10	30 513,60	-268,60	36,50	28,00	196,00
	12	42	2,5	250,21	-243,30	21 906,00	-261,50	32,30	26,80	197,20
	18	42	2,5	136,20	-140,60	13 229,20	-247,50	27,90	22,70	197,70
	25	42	2,5	78,44	-84,60	8489,80	-231,20	24,70	17,80	193,00
	32	42	2,5	49,92	-55,10	5952,10	-215,30	22,30	13,80	184,10
	42	42	2,5	29,21	-43,30	3938,10	-194,30	19,40	9,60	168,40
2	9	42	2,5	368,78	-38,70	-30,80	-116,80	5,60	12,50	213,50
	12	42	2,5	250,21	-37,40	-31,20	-115,90	5,00	15,10	205,70
	18	42	2,5	136,20	-32,40	-31,20	-113,40	4,40	19,20	193,00
	25	42	2,5	78,44	-24,90	-30,00	-109,20	3,90	20,90	179,20
	32	42	2,5	49,92	-17,00	-28,00	-103,90	3,50	20,60	165,30
	42	42	2,5	29,21	-7,10	-25,00	-95,50	3,00	18,60	146,00

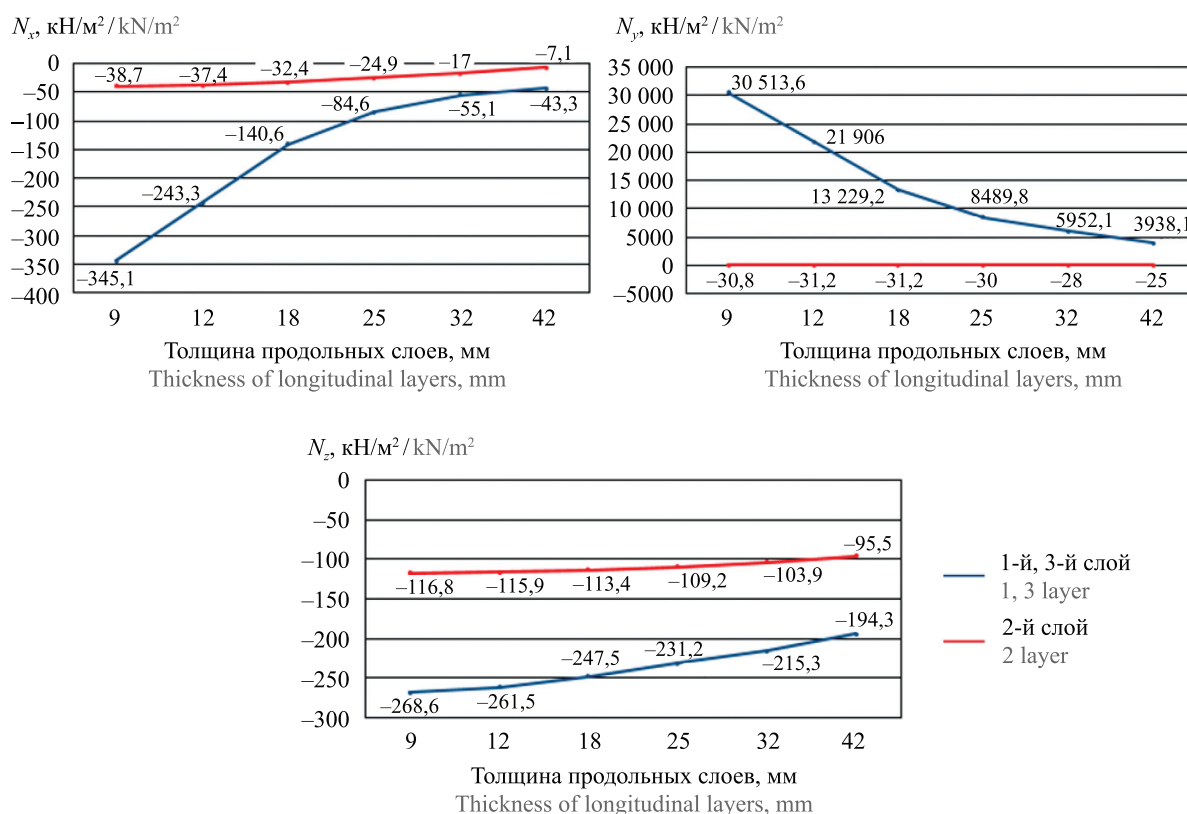


Рис. 9. Зависимость нормальных напряжений N_x , N_y , N_z от толщины продольных слоев

Fig. 9. Dependence of normal stresses N_x , N_y , N_z on thickness of longitudinal layers

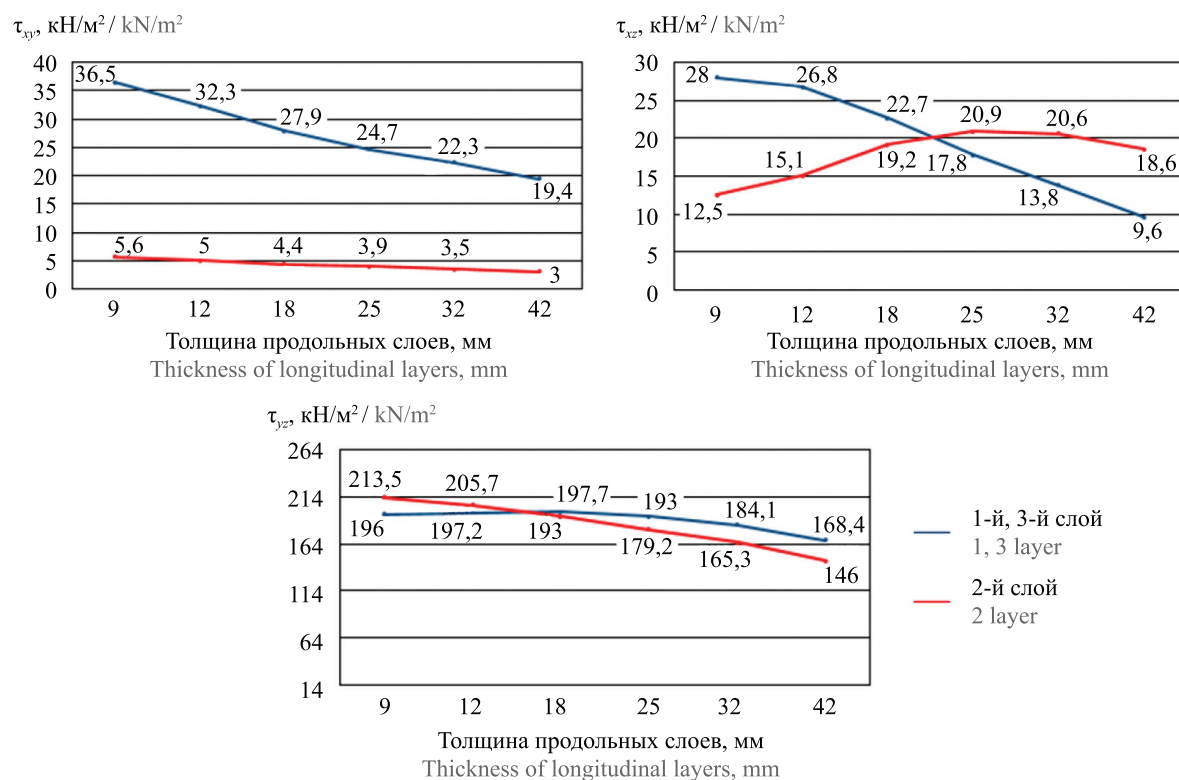


Рис. 10. Зависимость касательных напряжений τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} от толщины продольных слоев

Fig. 10. Dependence of shear stresses τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} on thickness of longitudinal layers

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам статического расчета при действии статических нагрузок выявлено, что при увеличении толщины:

- поперечных слоев от 9 до 42 мм увеличивается жесткость конструкции и прогибы снижаются от 69,54 до 29,21 мм;
- поперечных слоев происходит постепенное снижение нормальных и касательных напряжений во всех слоях;

• продольных слоев от 9 до 42 мм также наблюдается увеличение жесткости и прогибы снижаются от 368,78 до 29,21 мм;

• продольных слоев происходит значительное снижение нормальных напряжений во всех слоях. Касательные напряжения уменьшаются равномерно во всех слоях.

Изменение толщины продольных слоев значительно сказывается на увеличении прогибов, что может привести к излому плиты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крестьянникова А.Ю., Юминова М.О. Материалы и конструкции для строительства деревянных зданий // Наука через призму времени. 2017. № 9 (9). С. 42–51. URL: <http://naupri.ru/journal/465>
2. Shen Y., Schneider J., Stierner S.F., Ren X. Failure modes and mechanical properties of bracket anchor connections for cross-laminated-timber // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 275. P. 01011. DOI: 10.1051/mateconf/201927501011
3. Sebera V., Muszyński L., Tippner J., Noyel M., Pisaneschi T., Sundberg B. FE analysis of CLT panel subjected to torsion and verified by DIC // Materials and Structures. 2015. Vol. 48. Issue 1–2. Pp. 451–459. DOI: 10.1617/s11527-013-0195-1
4. Huang Z., Huang D., Chui Y.-H., Shen Y., Daneshvar H., Sheng B. et al. Modeling of Cross-Laminated Timber (CLT) panels loaded with combined out-of-plane bending and compression // Engineering Structures. 2022. Vol. 250. P. 113335. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113335
5. Christovasilis I.P., Brunetti M., Follesa M., Nocetti M., Vassallo D. Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 122. Pp. 202–213. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082
6. Lu W., Gu J., Wang B. Study on flexural behavior of cross-laminated timber based on different tree species // Advances in Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2019/1728258
7. Opazo-Vega A., Benedetti F., Nuñez-Decap M., Maureira-Carsalade N., Oyarzo-Vera C. Non-destructive assessment of the elastic properties of low-grade CLT panels // Forests. 2021. Vol. 12. Issue 12. P. 1734. DOI: 10.3390/f12121734
8. Gagnon S., Popovski M. Structural design of cross-laminated timber elements // Chapter 3, CLT Handbook. FPInnovations. Québec, Canada, 2011.
9. Смирнов П.Н., Филимонов М.А., Погорельцев А.А. Определение прочностных и упругих характеристик древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) и классификация по классам прочности. М. : Научно-исследовательский центр «Строительство», 2020. 175 с.
10. Филимонов М.А., Смирнов П.Н., Погорельцев А.А. Проведение исследований по определению несущей способности стеновых панелей и плит перекрытия из древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) и разработка методики расчета. М. : Научно-исследовательский центр «Строительство», 2020. 268 с.
11. Рогожина А.В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89__5_Rogozhina.pdf_10c4252bae.pdf
12. Филимонов М.А., Смирнов П.Н. Исследования прочностных и упругих характеристик плит из древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) российского производства // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 2. С. 81–97. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97
13. Мамедов Ш.М., Шабилова Е.Г., Нижегородцев Д.В., Казакевич Т.Н. Методика расчета панелей из перекрестно-клееной древесины // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 66–71. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71
14. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М. : Лесная промышленность, 1978. 224 с.
15. Бубис А.А., Гизятуллин И.Р., Хворова А.Н., Петров И.Ю. Особенности поведения древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) при статических и динамических нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 2. С. 62–80. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80
16. Чебыкин А.А., Фрицлер Ю.А., Кудрявцев С.В. Определение расчетных характеристик сечений древесных клееных плит из перекрестных досок // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. № 2. С. 83–85.
17. Змеев М.В. Определение толщины перекрытия из перекрестно-клееных досок на примере CLT-плит Binderholz (Austria) из условия жестко-

сти // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_35__10_Zmeev.pdf_91b8606af3.pdf

18. Щелокова Т.Н. Современные тенденции улучшения свойств древесины и деревянных строительных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 6. С. 39–45. DOI: 10.12737/article_5b115a65781d87.13857188

19. Мавлюбердинов А.Р., Хоцянн Д.Н. Технологические особенности возведения многоэтажных

жилых зданий из CLT-панелей // Известия КГАСУ. 2018. № 1 (43). С. 219–225. URL: https://izvestija.kgasu.ru/files/1_2018/219_225_Mavliuberdinov_Khot-sanian.pdf

20. Abejón R., Moya L. Cross-laminated timber: Perspectives from a bibliometric analysis (2006–2018) // Wood Material Science & Engineering. 2022. Vol. 17. Issue 6. Pp. 429–450. DOI: 10.1080/17480272.2021.1955295

Поступила в редакцию 16 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

О Б АВТОРАХ: Михаил Юрьевич Трошин — аспирант; Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева); 302030, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95; mtr997@mail.ru;

Андрей Викторович Турков — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и материалов; Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева); 302030, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95; РИНЦ ID: 543490, Scopus: 57193456012, ORCID: 0000-0003-1944-8529, aturkov@bk.ru.

Вклад авторов:

Трошин М.Ю. — сбор, анализ и обработка материала, написание статьи и оформление текста.

Турков А.В. — концепция, научное руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Krestyanikova A.Yu., Yuminova M.O. Materials and structures for the construction of wooden houses. *Science Through the Prism of Time*. 2017; 9(9):42-51. URL: <http://naupri.ru/journal/465> (rus.).

2. Shen Y., Schneider J., Stierner S.F., Ren X. Failure modes and mechanical properties of bracket anchor connections for cross-laminated-timber. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 275:01011. DOI: 10.1051/mateconf/201927501011

3. Sebera V., Muszyński L., Tippner J., Noyel M., Pisaneschi T., Sundberg B. FE analysis of CLT panel subjected to torsion and verified by DIC. *Materials and Structures*. 2015; 48(1-2):451-459. DOI: 10.1617/s11527-013-0195-1

4. Huang Z., Huang D., Chui Y.-H., Shen Y., Daneshvar H., Sheng B. et al. Modeling of Cross-Laminated Timber (CLT) panels loaded with combined out-of-plane bending and compression. *Engineering Structures*. 2022; 250:113335. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113335

5. Christovasilis I.P., Brunetti M., Follesa M., Nocetti M., Vassallo D. Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories. *Construction and Building Materials*. 2016; 122:202-213. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082

6. Lu W., Gu J., Wang B. Study on flexural behavior of cross-laminated timber based on different tree spe-

cies. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019; 2019:1-8. DOI: 10.1155/2019/1728258

7. Opazo-Vega A., Benedetti F., Nuñez-Decap M., Maureira-Carsalade N., Oyarzo-Vera C. Non-destructive assessment of the elastic properties of low-grade CLT panels. *Forests*. 2021; 12(12):1734. DOI: 10.3390/f12121734

8. Gagnon S., Popovski M. Structural design of cross-laminated timber elements. *Chapter 3, CLT Handbook. FPIInnovations*. Québec, Canada, 2011.

9. Smirnov P.N., Filimonov M.A., Pogorel'cev A.A. *Determination of strength and elastic characteristics of cross-glued wood (WPC/CLT) and classification by strength classes*. Moscow, Scientific Research Center "Construction", 2020; 175. (rus.).

10. Filimonov M.A., Smirnov P.N., Pogorel'cev A.A. *Conducting research to determine the bearing capacity of wall panels and floor slabs made of cross-glued wood (WPC/CLT) and developing a calculation methodology*. Moscow Scientific Research Center "Construction", 2020; 268. (rus.).

11. Rogozhina A.V. Calculation of the deformability of the CLT overlap panel. *Engineering Journal of Don*. 2022; 6. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89_5_Rogozhina.pdf_10c4252bae.pdf (rus.).

12. Filimonov M.A., Smirnov P.N. Research of strength and elastic characteristics of Russian-made cross laminated timber slabs. *Earthquake Engineering. Construction Safety*. 2022; 2:81-97. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97 (rus.).
13. Mamedov Sh.M., Shabikova E.G., Nizhegorodtsev D.V., Kazakevich T.N. Method for calculating cross laminated timber panels. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 5(82):66-71. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71 (rus.).
14. Ashkenazi E.K. *Anisotropy of wood and wood materials*. Moscow, Forest industry, 1978; 224. (rus.).
15. Bubis A.A., Giziatullin I.R., Petrov I.Yu., Khvorova A.N. Peculiarities of behavior of cross-laminated timber (CLT) under static and dynamic loads simulating seismic impacts. *Earthquake Engineering. Construction Safety*. 2022; 2:62-80. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80 (rus.).
16. Chebykin A.A., Fritzler U.A., Kudryavtsev S.V. Evaluation of cross section design properties for plates from cross laminated timber. *Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN*. 2017; 2:83-85. (rus.).
17. Zmeev M.V. Determination of the floor thickness of cross-glued boards on example of CLT-plates Binderholz (Austria). *Engineering Journal of Don*. 2020; 11. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_35_10_Zmeev.pdf_91b8606af3.pdf (rus.).
18. Shchelokova T.N. Modern trends of improvement of wood properties and wood constructions. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 6:39-45. DOI: 10.12737/article_5b115a65781d87.13857188 (rus.).
19. Mavlyuberdinov A.R., Hocanyan D.N. Technological features of erecting multi-storey residential buildings from CLT-panels. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018; 1(43):219-225. URL: https://izvestija.kgasu.ru/files/1_2018/219_225_Mavliuberdinov_Khotsanian.pdf (rus.).
20. Abejón R., Moya L. Cross-laminated timber: Perspectives from a bibliometric analysis (2006–2018). *Wood Material Science & Engineering*. 2022; 17(6):429-450. DOI: 10.1080/17480272.2021.1955295

Received January 16, 2023.

Adopted in revised form on February 6, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

BIONOTES: Mikhail Yu. Troshin — postgraduate student; Orel State University named after I.S. Turgenev (OSU named after I.S. Turgenev); 95 Komsomolskaya st., Orel, 302030, Russian Federation; mtr997@mail.ru;

Andrey V. Turkov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Building Structures and Materials; Orel State University named after I.S. Turgenev (OSU named after I.S. Turgenev); 95 Komsomolskaya st., Orel, 302030, Russian Federation; ID RSCI: 543490, Scopus: 57193456012, ORCID: 0000-0003-1944-8529; aturkov@bk.ru.

Contribution of the authors:

Mikhail Yu. Troshin — collection, analysis and processing of material, writing an article and text design.

Andrey V. Turkov — concept, scientific guidance.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.07:624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.401-415

Мембранные конструкции: опыт применения и перспективы развития

Александр Романович Туснин, Михаил Валерьевич Постарнак

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время актуальными являются исследования, позволяющие увеличить применимость стальных конструкций во всех областях строительства, в частности в жилом сегменте. Мембранные системы — это высокотехнологичные и экономичные конструкции. Работа большепролетных мембранных конструкций хорошо изучена и реализована на практике, использование при средних и малых пролетах изучено не в полной мере.

Материалы и методы. Сформулированы результаты основных теоретических, экспериментальных и численных исследований мембранных систем, используемых при расчете и проектировании. Описана перспективная конструкция мембранного перекрытия для применения в многоэтажных жилых зданиях на металлическом каркасе, которая состоит из прямоугольного в плане плоского опорного контура, мембраны и устроенной по мембране монолитной бетонной плиты.

Результаты. Проведены численные исследования мембранного перекрытия в программном комплексе Лира-САПР с учетом конструктивной, геометрической и физической нелинейности, результаты сопоставлены с экспериментальным исследованием. Распределение усилий в опорном контуре имеет вид, характерный для прямоугольных мембранных конструкций с оболочкой положительной кривизны.

Выводы. Численные расчеты натурной конструкции и испытания мембранной модели с размещенной на мембране монолитной железобетонной плитой подтвердили перспективность подобной конструкции. Полученные результаты численного расчета показали высокое качественное совпадение с экспериментальными данными. Для уменьшения количественного расхождения численных и экспериментальных результатов необходимо отработать вопросы учета переменной толщины плиты на мембране, совместной работы плиты, мембраны и опорного контура, учета физической нелинейности элементов системы и, прежде всего, железобетонной плиты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мембранные системы, мембранное перекрытие, стальной каркас, численное исследование, расчет

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Туснин А.Р., Постарнак М.В. Мембранные конструкции: опыт применения и перспективы развития // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 401–415. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.401-415

Автор, ответственный за переписку: Александр Романович Туснин, tusninar@mgsu.ru.

Membrane structures: application experience and development prospects

Alexander R. Tusnin, Mikhail V. Postarnak

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

ABSTRACT

Introduction. At present, studying an increase in the applicability of steel structures in all segments of the construction industry, particularly in residential construction, is relevant. Membrane systems are high-tech and economical structures. The behavior of large-span membrane structures is studied in great detail in practice. However, membranes, combined with medium and small spans, remain understudied.

Materials and methods. Findings of basic theoretical, experimental and numerical studies of membrane systems, used in structural analysis and design, are provided. An advanced membrane slab design, designated for metal-framed multistory residential buildings, is described. Its flat support contour is rectangular in plan; it has a membrane and a monolithic concrete slab over it.

Results. Lira-SAPR software package was used to conduct numerical studies of the membrane slab. The studies took account of its structural, geometrical and physical nonlinearity, and the results were compared with an experimental study. The distribution of forces in its support contour is typical for rectangular membrane structures with positive curvature shells.

Conclusions. Numerical analysis of a full-scale structure and a tested model having a monolithic reinforced concrete slab on the membrane proved the long-term benefits of this structure. The results of numerical analysis demonstrate the qualitative convergence with the experimental data. The variable thickness of the slab resting on the membrane, collaboration of the slab,

the membrane and the support contour, the physical nonlinearity of the system elements and, above all, the reinforced concrete slab must be taken into account to reduce the qualitative discrepancy between numerical and experimental results.

KEYWORDS: membrane systems, membrane slab, steel frame, numerical analysis, calculation

FOR CITATION: Tusnin A.R., Postarnak M.V. Membrane structures: application experience and development prospects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):401-415. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.401-415 (rus.).

Corresponding author: Alexander R. Tusnin, tusninar@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Минимальные сроки строительства, экономия материалов, технологичность изготовления и монтажа — основные факторы учитываемые при проектировании зданий и сооружений. В покрытиях зданий эффективно применяются мембранные конструкции. Мембранные конструкции — это висячие системы, которые состоят из тонколистовой пролетной оболочки (мембраны) и конструкции, воспринимающей распор. Распор мембраны может восприниматься оттяжками, контрфорсами, опорными контурами. Мембранная оболочка может быть нулевой (цилиндрическая оболочка), положительной (провисающая оболочка) или отрицательной (гауссовой кривизны). Форма мембранной оболочки зависит от очертания здания в плане, наличия внутренних опор, а также от конструкции опорного контура [1–3]. Мембранные покрытия с замкнутым опорным контуром не передают распорные усилия на колонны, что улучшает условия работы колонн. Мембрана в зависимости от пролета и действующей

нагрузки изготавливается из листовой стали толщиной 0,5–5 мм. Опорный контур может быть стальным или железобетонным [4–7]. Наиболее рациональной формой мембранного покрытия в плане является круглая или овальная. Кроме обычной стали, мембрана может выполняться из нержавеющей стали или алюминиевых сплавов, что повышает коррозионную стойкость мембраны. В качестве висячих покрытий также применяют гибкие мембраны [8–10].

Примеры крупных сооружений с мембранным покрытием:

- Харьковский плавательный бассейн пролетом 60 м с провисающей алюминиевой мембраной, прикрепленной продольно-поперечными ребрами жесткости (рис. 1);
- покрытие спортивного здания цилиндрической формы из нержавеющей стали в г. Фрунзе (рис. 2);
- стадион «Олимпийский», очертание мембранного покрытия в плане овальное с пролетами 224 м по большой оси и 183 м — по малой (рис. 3).



Рис. 1. Харьковский плавательный бассейн

Fig. 1. Kharkov swimming pool

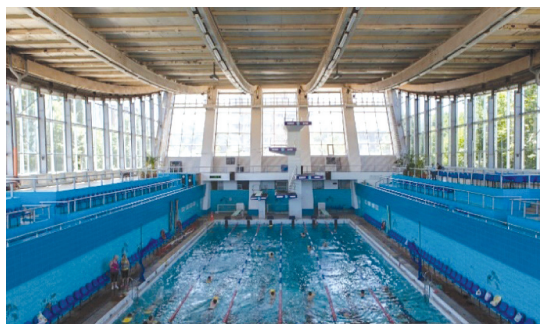


Рис. 2. Спортивный комплекс в г. Фрунзе

Fig. 2. Sports facility in Frunze





Рис. 3. Стадион «Олимпийский»

Fig. 3. Olympic Stadium

Покрытия малых пролетов. Для промышленных и сельскохозяйственных зданий с пролетами 12–36 м может быть также использована мембранная система. В работах П.Г. Еремеева и А.Р. Тусни-на рассмотрены покрытия промышленных зданий пролетом 24–36 м [11]. И.Г. Лютковский исследовал наличие железобетона на мембране, как железобетонные оболочки с внешним листовым армированием. М.И. Фарфель изучал конструкцию в форме двускатного блока, составленного из мембранных панелей, объединенных затяжкой или шпренгельной системой [12].

В связи с незначительной изгибной жесткостью мембраны необходимо предусмотреть мероприятия по их стабилизации, что позволяет уменьшить кинематические перемещения от неравномерных нагрузок и исключить «выхлоп» мембраны в сторону, противоположную провису.

Для стабилизации большепролетных мембранных покрытий используется формирование на мембране монолитной железобетонной плиты. Бетон укладывается на установленную в проектное положение мембранную конструкцию и после набора прочности образует совместно работающую с мембраной систему. Такие покрытия обладают высокой несущей способностью и жесткостью. Авторы таких систем называют их «железобетонная оболочка с внешним листовым армированием» [13].

Формообразование оболочки под нагрузкой, особенно в случае первоначально плоской системы, приводит к образованию в углах покрытия складок, направленных вдоль его диагоналей. Длина складок достигает 1/10 размера диагонали, а их высота зависит от степени первоначальной «рыхлости» системы и податливости опорного контура. Появление складок хотя и приводит к некоторому местному перераспределению усилий в мембране, однако не снижает общей несущей способности системы. В то же время наличие складок может привести к ухудшению эксплуатационных свойств покрытия, в частности к нарушению гидроизоляционного ковра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретические исследования

Напряженно-деформированное состояние (НДС) мембранных конструкций в основном зависит от стрелы провиса и начальной формы поверхности оболочки, а также величин, характеризующих податливость опорного контура. При креплении мембраны к опорному контуру без горизонтальных и вертикальных эксцентриситетов определяющими работу конструкции являются продольная и изгибная жесткость. При наличии эксцентриситетов крепления мембраны к контуру на работу мембранной конструкции оказывает влияние жесткость контура на кручение. Податливость опорного контура характеризуется относительными жесткостными параметрами. Для учета влияния формы оболочки, ее начального провиса также используются безразмерные параметры. Безразмерные параметры, применяемые при анализе НДС для некоторых мембранных конструкций, определяются по следующим формулам:

• для шатровых оболочек на круглом плане рассчитывается относительная продольная жесткость наружного опорного контура k_s и относительный параметр S :

$$k_s = \frac{(EA)_c}{EtR_c};$$

$$S = \frac{0,125q}{ER_c t (R_c/f)^3},$$

где $(EA)_c$ — продольная жесткость наружного опорного контура; E и t — модуль упругости и толщина мембраны; R_c — радиус наружного контура; q — равномерно распределенная нагрузка на покрытие; f — стрела подъема оболочки;

• первоначально плоские мембранные покрытия на круглом и овальном планах:

если жесткость на сжатие опорного контура покрытия удовлетворяет условию:

$$(EA)_c \geq \frac{tRE}{v(+\varphi_i)},$$

где $(EA)_c$ — продольная жесткость опорного контура; R — радиус опорного контура; E и t — модуль упругости и толщина мембраны; $\varphi_i = e_{pl}/e_{el}$ — отношение неупругих деформаций опорного контура к его упругим деформациям, вся мембрана находится в состоянии двухосного растяжения;

- на прямоугольном плане:

$$\bar{n} = \frac{(EJ)_c}{Eta^3}, \quad \bar{k} = \frac{(EA)_c}{Eta},$$

где $(EJ)_c$ и $(EA)_c$ — соответственно изгибная (в горизонтальной плоскости) и продольная жесткость контура; E и t — модуль упругости и толщина мембраны; a — характерный размер оболочки, равный половине стороны контура.

Кроме продольной и изгибной жесткости при эксцентричном креплении мембраны, на распределение усилий значительное влияние оказывает жесткость на кручение. В работе [14] предложены относительные характеристики опорного контура на чистое и стесненное кручение для сплошных и тонкостенных сечений при эксцентричном креплении мембраны:

$$\bar{m} = \frac{(GI_t)}{Etae^2}, \quad \bar{m}_\omega = \frac{(EI_\omega)}{Etae^2}, \quad \bar{\omega} = \frac{\omega}{ae},$$

где $\bar{m}$ — относительная жесткость на чистое кручение; G — модуль сдвига; I_t — момент инерции опорного контура на чистое кручение; E и t — модуль упругости и толщина мембраны; a — характерный размер оболочки, равный половине стороны контура; $e = \sqrt{e_v^2 + e_h^2}$, e_v , e_h — вертикальный и горизонтальный эксцентриситеты крепления мембраны к контуру; $\bar{m}_\omega$ — относительная секториальная жесткость; I_ω — секториальный момент инерции опорного контура; ω — относительная секториальная координата; ω — секториальная координата.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования действительной работы мембранных конструкций выполняются обычно на моделях. Это обусловлено большими размерами мембранных систем. Натурные испытания мембранной панели размерами в плане 12×12 м приведены в труде [15].

При использовании моделей необходимо решать проблему подобия модели натурной конструкции. При моделировании чаще всего жесткость опорного контура моделей получается несколько выше натурной конструкции. Это объясняется необходимостью размещения на контуре тензочувствительных датчиков, что при полном моделировании не всегда возможно из-за малых размеров попереч-

ного сечения контура. В процессе моделирования вместо стали натурной конструкции могут применяться алюминиевые сплавы, модуль упругости которых примерно в 3 раза меньше, что позволяет при схожих жесткостных параметрах получать более развитое сечение. Модельные эксперименты широко использовались при исследовании НДС как круглых и овальных в плане [16], так и прямоугольных мембранных покрытий [17–22].

А.И. Фарфель изучал работу двухскатного блока покрытия, составленного из прямоугольных мембранных панелей [23]. П.Г. Еремеев, М.Г. Деменев провели испытания панелей размером 12×12 м на равномерно распределенную нагрузку.

С учетом накопленного опыта экспериментальные исследования мембранных систем следует осуществлять преимущественно на моделях, которые для увеличения размеров элементов модели можно выполнять из алюминиевых сплавов. Если позволяют размеры исследуемых конструкций, кроме модельных, рекомендуется испытание натурных конструкций, что даст возможность получить данные о работе конструкции напрямую.

Экспериментальные исследования подтвердили гипотезу о совместной работе опорного контура с растянутой мембраной и возможности при определенных условиях исключения потери устойчивости внецентрично сжатого контура в плоскости покрытия. Экспериментально потеря устойчивости контура фиксировалась для квадратной мембранной конструкции. Условием исключения потери устойчивости контура служит достижение определенной жесткости. Однако при проведении в ЦНИИСК исследования модели квазицилиндрического мембранного покрытия квадратного плана с гибкостью опорного контура 250 последний потерял устойчивость в плоскости мембраны [24]. Изложенное послужило основанием произвести ряд экспериментальных исследований моделей с контуром, гибкостью превышающим 250 (Л.И. Гольденберг [25]).

Для уменьшения складок в углах прямоугольного в плане опорного контура устраиваются вуты или распорки. Зависимость влияния формы и размеров вут на складкообразование подробно изучал В.Б. Присяжной [26]. Установлено, что оптимальная величина вута составляет 1/10 длины стороны.

Численные исследования

Для расчетов мембранных конструкций применяют численные методы с использованием ЭВМ — метод стержневой аппроксимации (МСА) и метод конечных элементов (МКЭ), позволяющие решать сложные задачи расчета мембранных покрытий с учетом их конструктивных особенностей. Похожими методами пользуются и при расчете гибких мембран [27].

Точность результатов расчета, выполняемых численными методами, зависит в основном от густоты сетки дискретной расчетной модели. Выбор густоты сетки определяется компромиссом между временем счета задачи на ЭВМ и точностью расчета, в зависимости от конкретных условий решаемой задачи.

При численном расчете необходимо подобрать густоту сетки последовательным приближением, оценивая погрешность результатов расчета по уточненному решению [28]. Уточненное решение можно получить по результатам расчета моделей на двух сетках разбиения n_1, n_2 . Тогда по двум решениям A_{n1}, A_{n2} уточненное решение имеет вид:

$$A_{n1n2} = \frac{n_2^2}{n_2^2 - n_1^2} A_{n2} - \frac{n_1^2}{n_2^2 - n_1^2} A_{n1}.$$

При проведении трех расчетов на трех разных сетках уточненное решение можно определить так:

$$A_{n1n2n3} = \frac{n_1^4}{(n_2^2 - n_1^2)(n_3^2 - n_1^2)} A_{n1} - \frac{n_2^4}{(n_2^2 - n_1^2)(n_3^2 - n_2^2)} A_{n2} + \frac{n_3^4}{(n_3^2 - n_1^2)(n_3^2 - n_2^2)} A_{n3}.$$

В стандартных программных комплексах, реализующих численный метод расчета, геометрическая нелинейность реализована с помощью линеаризации задачи шаговым методом последовательных нагружений. Величину приращения нагрузки на каждом шаге следует определять по формуле:

$$\Delta q_i = q \frac{3i^2 - 3i + 1}{N^3},$$

где Δq_i — величина нагрузки на i -м этапе нагружения; q — суммарная расчетная нагрузка на мембранное покрытие; N — количество ступеней нагружения.

Исторически для расчета мембранных систем первоначально использовался МСА. Это метод позволяет выполнять расчет с достаточной для практических целей точностью. Пролетная конструкция мембранного покрытия в МСА аппроксимируется дискретной шарнирно-стержневой системой, продольные жесткости элементов которой определяются исходя из эквивалентности деформаций и усилий стержневой модели и элемента мембраны. Изгибные и крутильные жесткости элементов стержневой модели мембраны следует принимать равными нулю. Типовую ячейку шарнирно-стержневой модели рекомендуется принимать с двумя диагональными связями (рис. 4).

В зависимости от очертания ячейки стержневой модели площадь сечения элементов определяется по формулам:

- для квадратной ячейки при $\Delta x = \Delta y$:

$$A_1 = \frac{3\sqrt{2}}{8} \Delta x t, \quad A_2 = A_3 = \frac{3}{8} \Delta x t,$$

где Δx — размер стороны ячейки стержневой модели; t — толщина мембраны;

- для прямоугольной ячейки с размерами Δx и Δy ¹:

¹ Рекомендации по проектированию мембранных покрытий на прямоугольном плане для реконструируемых зданий и сооружений. М. : ЦНИИСК, 1986. 90 с.

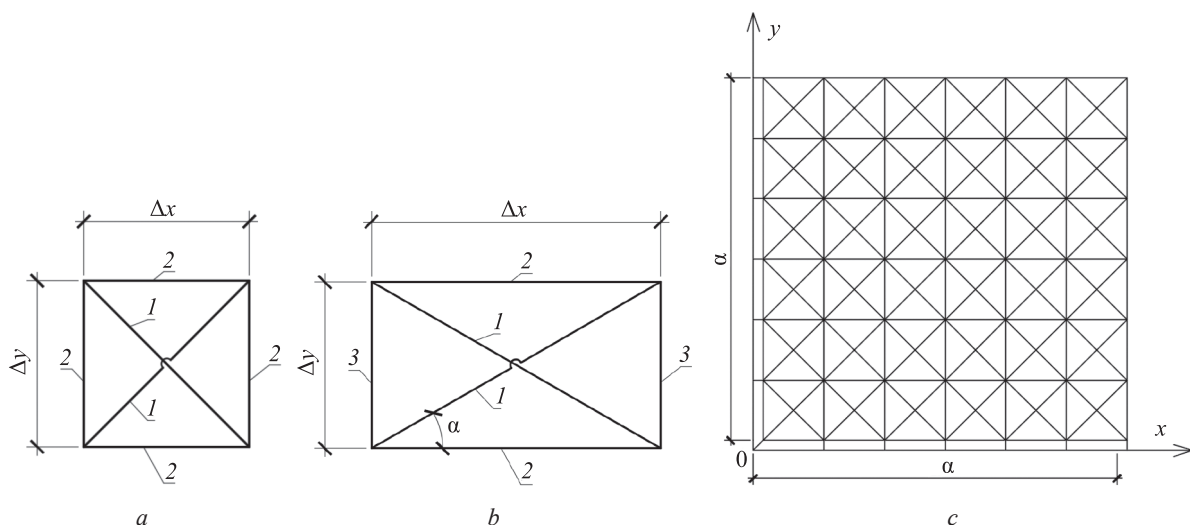


Рис. 4. Расчетная модель метода стержневой аппроксимации: а — квадратная ячейка; б — прямоугольная ячейка; в — дискретная схема покрытия

Fig. 4. Calculation model of the rod approximation method: а — square cell; б — rectangular cell; в — discrete roof scheme

$$A_1 = \frac{3}{16} \Delta x t \frac{\beta}{\cos^3 \alpha}, \quad A_2 = \frac{3}{16} \Delta x t \frac{3 - \beta^2}{\beta},$$

$$A_3 = \frac{3}{16} \Delta x t \frac{3\beta^2 - 1}{\beta^2},$$

где $\beta = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{\Delta x}{\Delta y}$.

При использовании МКЭ оболочка моделируется прямоугольными или треугольными мембранными конечными элементами (КЭ) оболочки. Из-за малой изгибной жесткости мембраны используются безмоментные КЭ оболочки. Расчет мембранных конструкций выполняется с учетом геометрической и в случае необходимости физической нелинейности.

При применении численных методов расчета важен правильный выбор вычислительного комплекса, сетки разбиения конструкции на КЭ или шарнирно-стержневые ячейки, способа решения нелинейной задачи. В работе [29] выполнена оценка применимости некоторых вычислительных комплексов для расчета мембранных систем. Изучены особенности формирования конечно-элементной модели (КЭМ) и нелинейного расчета мембранных систем.

Перспективная конструкция мембранного перекрытия

Преимущества мембранных систем, состоящих в полном использовании прочностных свойств стали оболочки, совмещении несущих и ограждающих функций, малого расхода стали, простоты конструкции, возможности блочного монтажа, позволяют широко использовать такие конструкции не только в покрытиях, но и перекрытиях зданий.

Мембранную конструкцию предполагается применять в перекрытиях многоэтажных зданий со стальным каркасом.

Мембранное перекрытие состоит из прямоугольного в плане плоского опорного контура, мембраны и устроенной по мембране монолитной бетонной плите. На рис. 5 показан план и разрез мембранного перекрытия с монолитной бетонной плитой.

Опорный контур выполняется из прокатного швеллера или двутавра. Прокатный профиль ориентируется так, чтобы его стенка располагалась в вертикальной плоскости. Для упрощения конструкции первоначально плоскую мембрану рационально крепить к верхней или нижней полке профиля. Выбор такого конструктивного решения позволяет исключить дополнительные элементы в виде опорного столика. Это уменьшает трудоемкость изготовления и снижает расход стали на контур. Такое конструктивное решение ведет к появлению эксцентриситетов крепления мембраны к контуру, появлению дополнительных изгибающих и крутящих моментов, а также бимоментов, что необходимо учитывать при расчете и проектировании. При креплении мембраны к верхней полке габариты перекрытия фактически совпадают с высотой профиля. При креплении к нижней полке строительная высота перекрытия больше на величину прогиба мембраны, однако такое крепление ведет к уменьшению изгибающих моментов в вертикальной плоскости контура, что может привести к уменьшению расхода стали на опорный контур. Кроме прокатных профилей, возможно выполнение контура из квадратных или прямоугольных труб. В углах перекрытия устанавливаются распорки из того же профиля, что и контур, на расстоянии 1/10 длины стороны контура от углов. Размеры перекрытия в плане 3–9 м, опор-

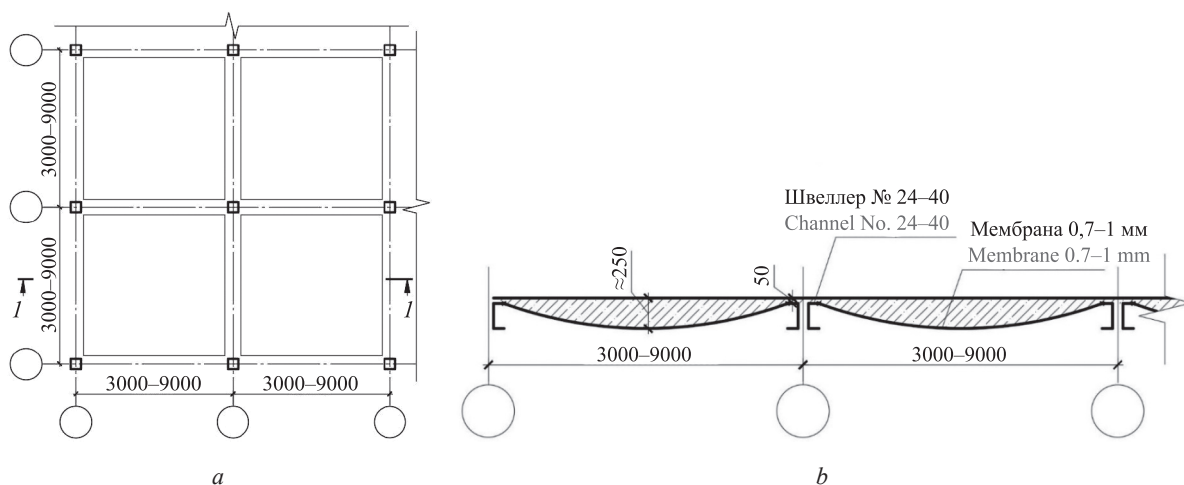


Рис. 5. Мембранное перекрытие многоэтажного здания: а — план; б — разрез

Fig. 5. Membrane slab of a multi-storey building: a — plan; b — section

ный контур швеллер или двутавр № 24–40, мембрана выполняется из стали толщиной 0,7–1 мм.

Сборка стальной части мембранного перекрытия (опорного контура и мембраны) осуществляется или на заводе, или на строительной площадке. При изготовлении мембранной конструкции полностью на заводе необходимо обеспечить ее доставку на строительную площадку в виде отправочных элементов, имеющих размеры, укладываемые в транспортный габарит. Собранный на земле мембранная часть перекрытия устанавливается в проектное положение.

Далее на мембрану как несъемную опалубку укладывается слой монолитного бетона тяжелого (класса В25, В30) или легкого. Бетон образует плиту, имеющую выпуклую форму. Армирование плиты конструктивное. Толщина слоя бетона складывается из прогиба от собственного веса мембраны и веса бетона. Перекрытие опирается на колонны по углам, реализуя апробированное конструктивное решение мембранного покрытия, использованное в патенте на изобретение П.Г. Еремеева [30]. После набора прочности бетон и стальная мембрана работают совместно, образуется жесткий в горизонтальной плоскости диск перекрытия, который значительно улучшает работу опорного контура, мембраны и повышает несущую способность конструкции в целом.

Вместо сплошной монолитной плиты возможно устройство монолитной решетчатой конструкции (рис. 6, а). С заполнением решетки из тяжелого бетона утеплителем, газосиликатными блоками, блоками из ячеистого или легкого бетона.

В качестве заполнения мембранного перекрытия можно использовать легковесные плиты, имеющие форму, повторяющую очертание мембраны под нагрузкой и размеры в плане, позволяющие разместить их на мембране с максимальным заполнением пространства. Плиты укладываются на мембрану на раствор. После монтажа плит швы между ними заполняются раствором (рис. 6, б).

Другим вариантом заполнения перекрытия может быть слоистая конструкция, состоящая из утеплителя и бетонной стяжки (рис. 6, в). Утеплитель укладывается непосредственно на мембрану, поверх него выполняется бетонная стяжка. Стяжка конструктивно армируется сеткой. Толщину утеплителя и стяжки назначают на основании прочностных расчетов и расчетов звукоизоляции перекрытия.

К преимуществам рассмотренных конструкций следует отнести: наличие несъемной опалубки в виде мембраны, непосредственно участвующей в работе перекрытия, простоту конструкции, формирование жесткого диска перекрытия, высокую несущую способность и жесткость.

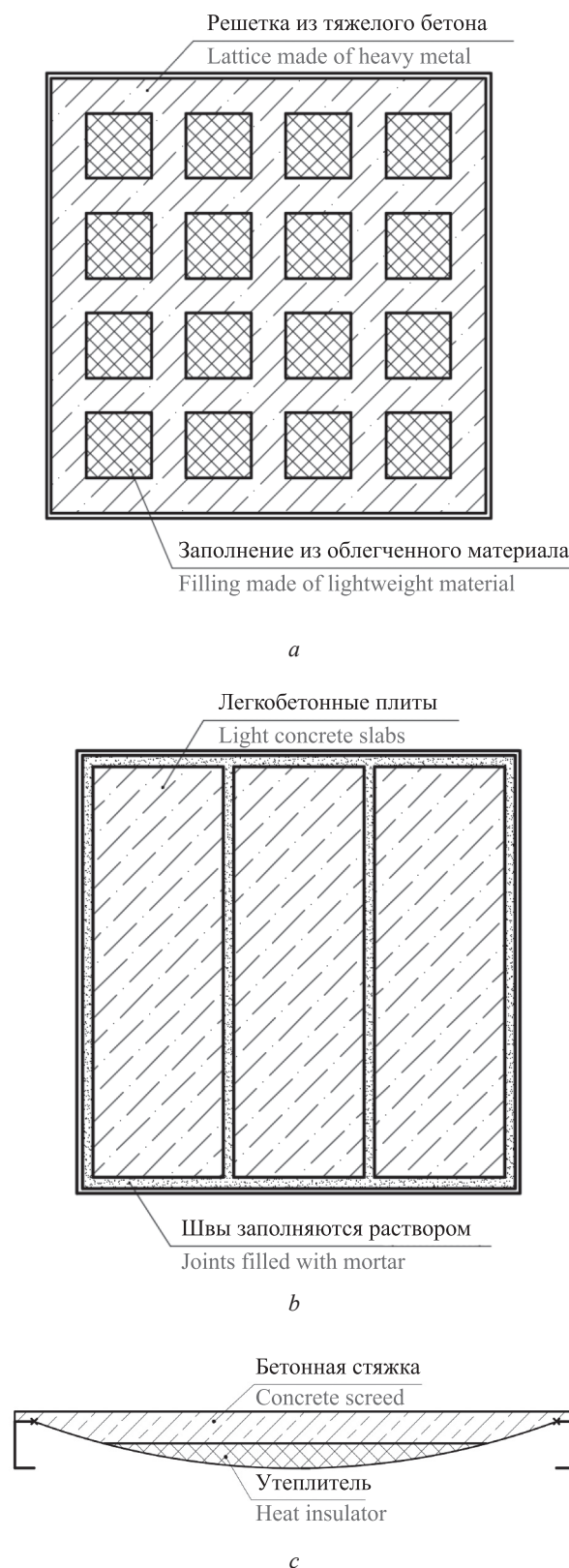


Рис. 6. Варианты исполнения конструкции плиты мембранного перекрытия: а — монолитная решетчатая конструкция; б — легкобетонные плиты; в — слоистая конструкция

Fig. 6. Design options of the membrane floor slab: а — monolithic lattice construction; б — lightweight concrete slabs; в — layered structure

Внедрение мембранного перекрытия в практику строительства многоэтажных зданий со стальным каркасом предполагает проведение теоретических, численных и экспериментальных исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты численных исследований разрабатываемой конструкции

Для реализации перспективной конструкции мембранного перекрытия многоэтажного здания проведены численные и экспериментальные исследования.

При выборе вычислительного комплекса и метода моделирования мембранной конструкции учтен накопленный ранее опыт численных исследований мембранных систем. Для проведения численных расчетов выбран вычислительный комплекс Лира-САПР с моделированием мембраны КЭ оболочки.

Конечно-элементная модель перекрытия включала четверть конструкции. Это обусловлено симметрией конструкции и позволило существенно снизить размерность задачи, сократить время нелинейного расчета. К преимуществам комплекса Лира-САПР, помимо корректного расчета геометрически нелинейных систем, необходимо отнести возможность расчета конструкции с учетом конструктивной (стадия монтаж при устройстве железобетонной плиты) нелинейности. В состав КЭМ включены опорный контур, мембрана, железобетонная плита и стержни, моделирующие эксцентриситет. Контур моделируется стержневыми КЭ, мембрана и железобетонная плита — КЭ оболочки. Переменная толщина плиты учтена введением в расчетную схему железобетонных оболочек разной толщины. На рис. 7 показана расчетная модель мембранного перекрытия.

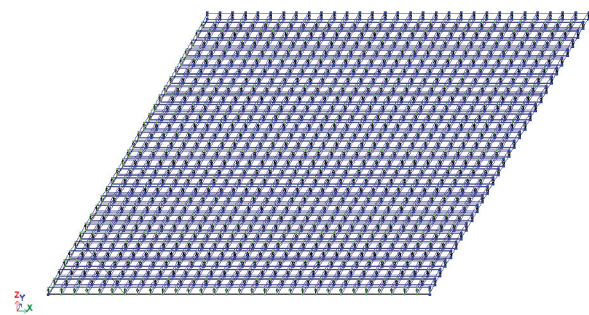


Рис. 7. Расчетная схема мембранного перекрытия

Fig. 7. Calculation scheme of the membrane slab

Опорный контур запроектирован из швеллера 27П, сталь С345. К верхней полке швеллера крепится мембрана толщиной 0,7 мм из стали С390. Модуль упругости — 206 000 МПа. Мембранная панель собирается на уровне земли, а затем устанавливается в проектное положение. Мембрана

первоначально плоская, после монтажа на мембрану укладывается слой бетона В25 толщиной от 50 до 150 мм. Начальный модуль упругости бетона В25 — 30 000 МПа. Мембранное перекрытие опирается на колонны по углам. Относительные жесткостные характеристики контура составляют: $n = 0,000077$, $k = 1,05$.

На покрытие действует собственный вес мембранной панели и бетона. Вес стальных конструкций учтен программно. Вес бетона задан в предположении средней толщины бетонной плиты 145 мм, расчетная нагрузка от веса бетона — 4 кПа. После набора прочности бетона на перекрытие прикладывается вес перегородок и пола (расчетная нагрузка — 1,1 кПа) и расчетная полезная нагрузка — 2,4 кПа.

Расчет перекрытия выполнен с применением вычислительного комплекса Лира-САПР 2018. Расчет осуществлялся с учетом геометрической нелинейности и стадийности формирования конструкции в три этапа:

I этап. Рассчитывается первоначально плоская мембранная конструкция, опертая по углам. На систему действует только вес металлических конструкций. Этот этап соответствует монтажу собранной на уровне земли мембранной панели на проектную отметку. Происходит формообразование пролетной оболочки, мембрана приобретает начальный провис.

II этап. На имеющую начальный провис мембрану укладывается слой бетона. К конструкции на этом этапе в дополнение к собственному весу стальных конструкций прикладывается вес бетона, равный 4 кПа.

III этап. Расчет ведется для конструкции, у которой бетон набрал полную прочность; нагрузка, прикладываемая на этом шаге, равна 3,5 кПа.

На рис. 8 представлены прогибы мембранного перекрытия после загрузки перекрытия полной нагрузкой.

На I этапе формирования перекрытия провис мембраны возникает только от собственного веса и составляет 43,2 мм. На II этапе после укладки бетона на конструкцию действуют собственный вес мембраны и контура и вес монолитного бетона, а суммарные перемещения составляют 159 мм. После формирования конструкции (III этап) и приложения расчетной нагрузки суммарные прогибы центра мембраны — 175 мм. Таким образом, перемещения от полезной нагрузки на конструкцию после формирования перекрытия составляют 16 мм или 1/375 пролета. Прогибы контура в горизонтальной плоскости от полной расчетной нагрузки на III этапе составляют:

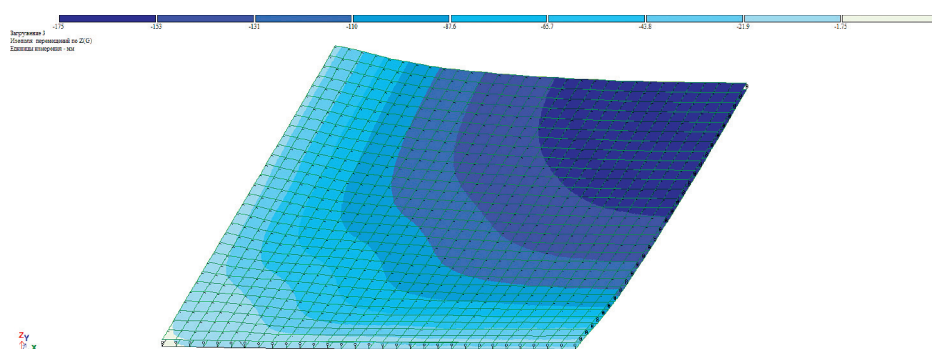


Рис. 8. Прогибы мембранного перекрытия от полной нагрузки

Fig. 8. Deflections of the membrane slab due to the full load

- в горизонтальной плоскости 6,04 мм или 1/993 пролета;
- в вертикальной плоскости 17,1 мм или 1/351 пролета.

Жесткость перекрытия обеспечена.

На рис. 9 показаны эквивалентные напряжения в мембране перекрытия.

Максимальные напряжения в мембране составляют 37,2 кН/см², что меньше расчетного сопротивления стали С390, равного 39 кН/см².

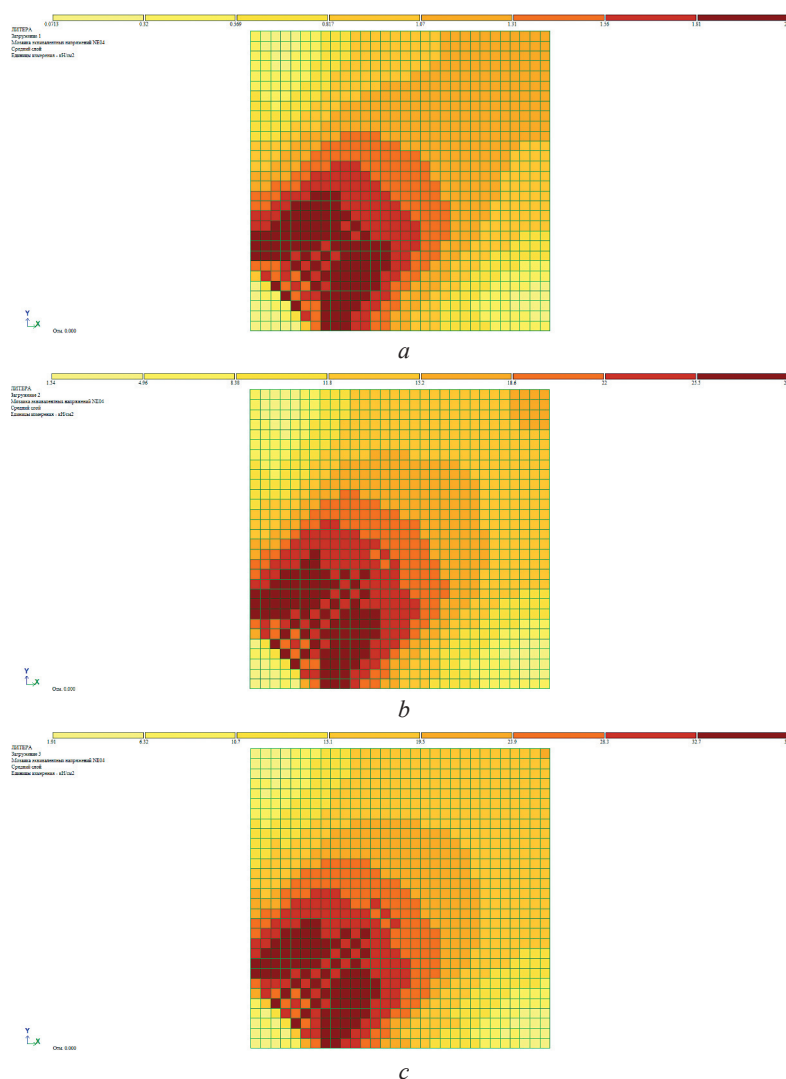


Рис. 9. Напряжения по Мизесу в мембране: *a* — I этап; *b* — II этап; *c* — III этап

Fig. 9. Mises stresses in the membrane at the stage of structure formation: *a* — 1st stage; *b* — 2nd stage; *c* — 3rd stage

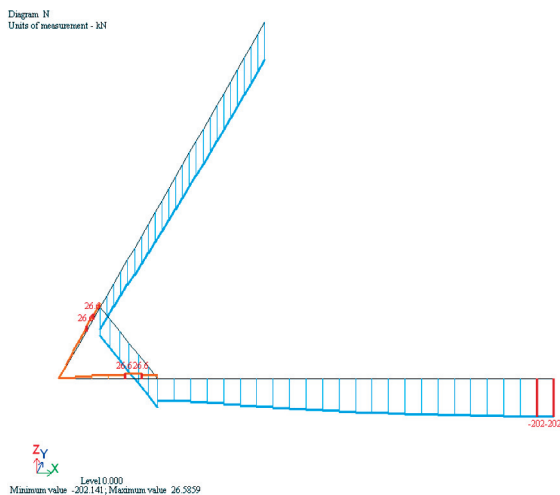


Рис. 10. Продольные усилия в опорном контуре

Fig. 10. Longitudinal forces in the support contour

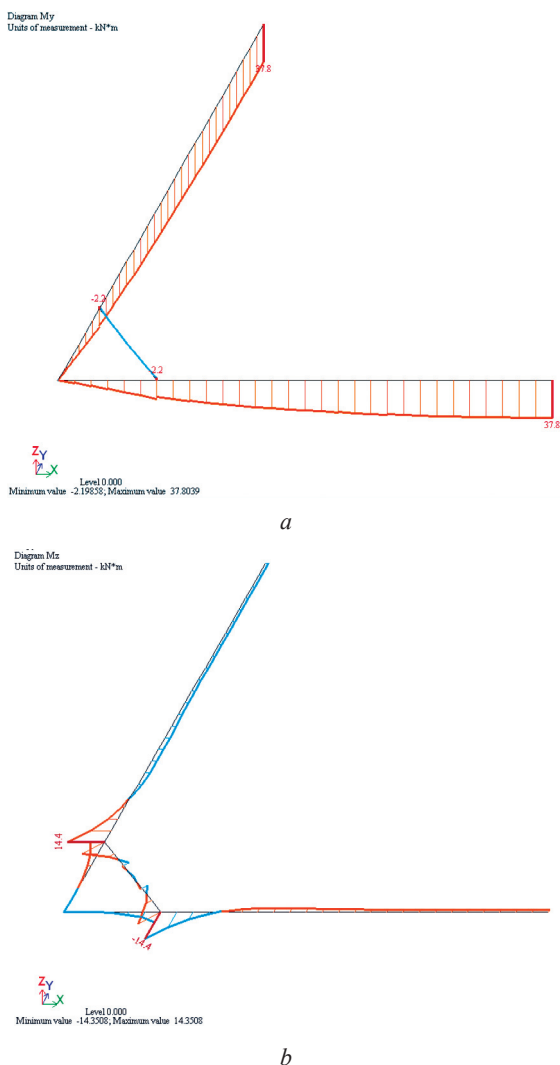


Рис. 11. Изгибающие моменты в опорном контуре: а — в вертикальной плоскости; б — в горизонтальной плоскости

Fig. 11. Bending moments in the support contour: а — in the vertical plane; б — in the horizontal plane

На рис. 10 и 11 представлены усилия, действующие в опорном контуре.

Распределение усилий в опорном контуре имеет вид, характерный для прямоугольных мембранных конструкций с оболочкой положительной кривизны. Максимальные по абсолютной величине сжимающие усилия и изгибающие моменты действуют в середине стороны опорного контура. Изгибающие моменты в горизонтальной плоскости достигают максимума в месте крепления распорки и минимальны в середине пролета стороны контура.

На рис. 12 показаны результаты проверки несущей способности опорного контура.

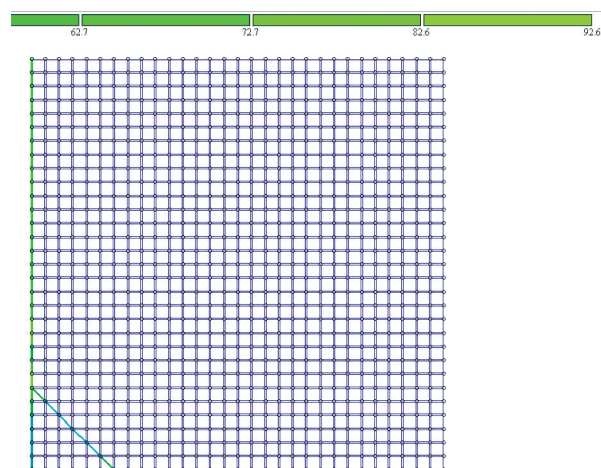


Рис. 12. Результаты расчета проверки несущей способности контура

Fig. 12. Results of analysis of the verification of the load-bearing capacity of the contour

Максимальные нормальные напряжения в контуре составляют не более 85 % от предела текучести стали. Прочность и устойчивость опорного контура обеспечены. Необходимо отметить, что в районе крепления к контуру распорки на участке длиной не более 100 мм наблюдаются напряжения до 24 %, превышающие расчетные. На этих участках контура допускается развитие пластических деформаций, что подтверждается ранее проведенными экспериментальными исследованиями. Для исключения пластики в контуре возможно локальное усиление его на этих участках.

Результаты экспериментальных исследований разрабатываемой конструкции

Выполнена экспериментальная оценка работоспособности разрабатываемой конструкции. С этой целью проведены испытания модели мембранного перекрытия (рис. 13). Модель изготовлена из алюминиевых сплавов, при выборе размеров элементов модели учитывались относительные параметры на-

турной конструкции. Для модели был принят опорный контур с размерами в плане $1,2 \times 1,2$ м из спаренных алюминиевых уголков $20 \times 1,2$ мм Т-образного сечения, алюминиевая мембрана толщиной 0,1 мм. Для оценки механических характеристик алюминиевого сплава осуществлены испытания образцов. Для алюминиевого сплава мембраны модуль упругости равен 52 000 МПа, временное сопротивление 240 МПа. Для алюминиевого сплава контура модуль упругости равен 72 000 МПа, временное сопротивление 193 МПа. Оценка работоспособности системы проведена на модели, опёртой по контуру.

Экспериментальные исследования выполнялись в четыре стадии:

- I стадия — на мембранную модель без раствора действовал только вес мембраны;

- II стадия — на мембранную модель дополнительно к собственному весу действует вес уложенного раствора;

- III стадия — на полностью сформированную модель с пролетной частью из мембраны и плиты из раствора, кроме собственного веса, действует равномерно распределенная на всей поверхности нагрузка;

- IV стадия — отличается от III тем, что экспериментальная нагрузка равномерно распределена на половине модели.

По итогам эксперимента был получен вывод о работоспособности перекрытия, а также его

высокой жесткости и несущей способности [31]. На I стадии прогиб мембраны составил 12,8 мм, на II стадии — 43,7 мм, на III стадии — 44,3 мм. Таким образом, после полного формирования перекрытия от полезной нагрузки прогнулось всего на 0,6 мм или 1/2000 пролета. Горизонтальный прогиб контура от полной нагрузки равен 1,07 или 1/1120 пролета. При действии нагрузки на половине покрытия прогибы мембраны составили 44,19 мм, горизонтальный прогиб контура — 0,95 мм. В отличие от ряда висячих систем на основании проведенных испытаний установлено, что для мембранного перекрытия загрузка половины конструкции менее опасно, чем загрузка всего перекрытия.

Кроме экспериментальных исследований, проведен численный расчет модели мембранного перекрытия. Расчет модели перекрытия выполнялся с учетом конструктивной, геометрической и физической нелинейности системы с применением вычислительного комплекса Лира-САПР 2018. Для учета конструктивной нелинейности использовалась система «Монтаж». Контур моделировался стержневыми КЭ с соответствующими геометрическими характеристиками. Мембрана и плита из раствора моделировались КЭ оболочки [32]. Численный расчет показал хорошее качественное соответствие расчетного и экспериментального поведения мембранного перекрытия. Некоторые результаты приведены в таблице.

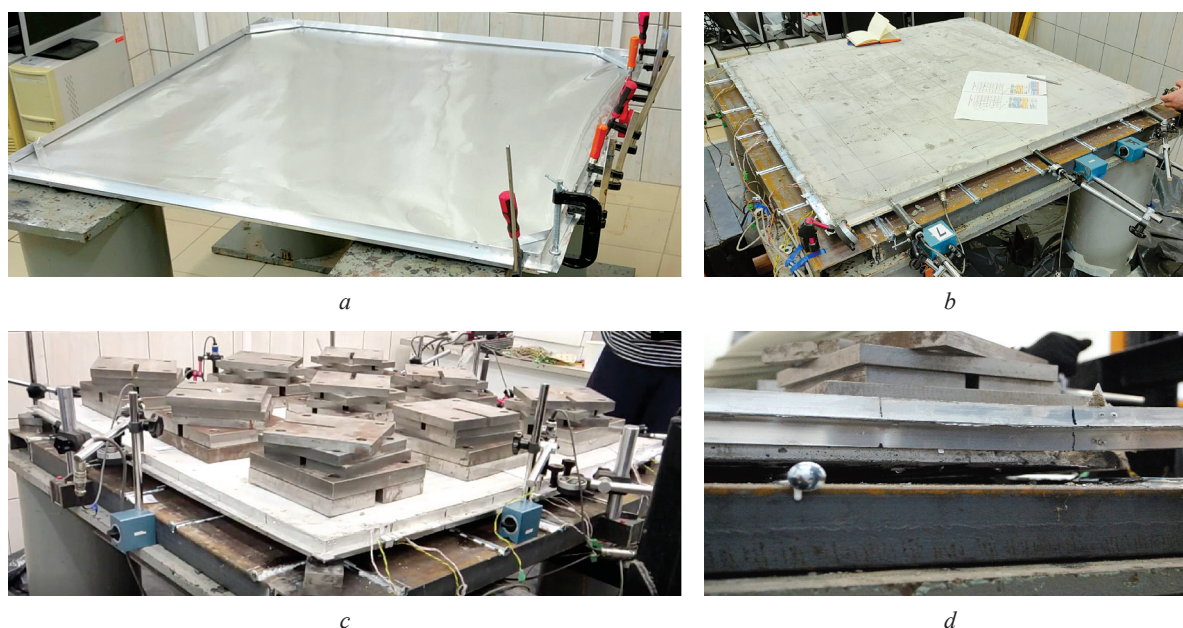


Рис. 13. Модель мембранного перекрытия: *a* — подготовка модели; *b* — размещение измерительных датчиков; *c* — модель, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой; *d* — модель после разрушения

Fig. 13. Model of the membrane slab: *a* — model preparation; *b* — arrangement of measuring sensors; *c* — model loaded with uniformly distributed load; *d* — model after failure

Показатель Value	Эксперимент Experiment	Численный расчет Calculation	Δ , %
Вертикальные перемещения мембраны, мм Vertical displacements of the membrane, mm	44,34	30,73	44,3
Горизонтальные перемещения середины опорного контура, мм Horizontal displacements of the middle of the support contour, mm	1,07	1,06	0,9
Приведенные напряжения в мембране, МПа Reduced stresses in the membrane, MPa	83,31	67,1	24,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мембранные конструкции используют в основном для больших и средних пролетов промышленных и общественных зданий, такие системы достаточно изучены и имеют большой опыт применения на практике.

Накопленный опыт использования мембранных конструкций на прямоугольном плане, малый расход стали, совмещение несущих и ограждающих свойств, возможность совместной работы стальной оболочки и размещенной на ней железобетонной плиты позволяют применить мембранную систему в перекрытиях зданий. Численные расчеты натурной конструкции и испытания мембранной модели с размещенной на мембране монолитной железобетонной плитой подтвердили перспективность подобной конструкции. После устройства на мембране железобетонной плиты мембранное перекрытие приобретает большую жесткость, что очень важно для формирования комфортных условий для людей, располагающихся на перекрытии. Мембрана и опорный контур доставляются на строительную площадку в заводской полуготовности, на уровне земли производится укрупнительная сборка, конструкция монтируется в проектное положение и на мембрану укладывается бетон. Мембрана в такой конструкции служит не только важным несущим элементом, но и выполняет роль несъемной опалубки. После набора прочности бетоном формируется жесткий диск перекрытия, что важно для работы многоэтажного каркаса.

Полученные результаты численного расчета показали хорошее качественное совпадение с экспериментальными данными. Для уменьшения количественного расхождения численных и экспериментальных результатов необходимы дальнейшие исследования разрабатываемой конструкции. Следует отработать вопросы учета переменной толщины плиты на мембране, совместной работы плиты, мембраны и опорного контура, учета физической нелинейности элементов системы и, прежде всего, железобетонной плиты. Важно оценить предложенные конструктивные решения мембранного перекрытия, разработать инженерную методику расчета, конструкцию узлов с учетом технологии монтажа.

Для разработки конструкции и экспериментально-теоретического обоснования несущей способности и жесткости мембранного перекрытия, состоящего из провисающей мембранной конструкции на прямоугольном плане с плоским опорным контуром и железобетонной плитой, формируемой на мембране, предполагается решение следующих задач:

- уточнение основных предпосылок численного расчета и экспериментальных исследований;
- проведение экспериментальных и численных исследований мембранных моделей и натурного перекрытия с сопоставлением экспериментальных и численных результатов;
- разработка конструкции натурной модели мембранного перекрытия и проведение ее испытаний;
- разработка методики проектирования мембранных перекрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wang Z., Song Q. Form-finding analysis of tensile membrane structure // Engineering Mechanics. 2002. Vol. 19. Issue 2. Pp. 41–44.
2. Philipp B., Breitenberger M., Auria I.D., Wüchner R., Bletzinger K.-U. Integrated design and analysis of structural membranes using the Isogeometric B-Rep Analysis // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2016. Vol. 303. Pp. 312–340. DOI: 10.1016/j.cma.2016.02.003
3. Кондратов К.Н., Туснин А.Р. Анализ форм складкообразования в мембранных конструкциях с внутренними опорами // Вестник МГСУ. 2012. № 11. С. 67–73. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.11.67-73
4. Трофимов В.И., Каминский А.М. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений. М. : Изд-во АСВ, 2002. 576 с.

5. Еремеев П.Г. Пространственные тонколистовые металлические конструкции покрытий. М. : Изд-во АСВ, 2006. 560 с.
6. Канчели Н.В., Батов П.А., Дробот Д.Ю. Реализованные мембранные оболочки: расчет, проектирование и возведение. М. : Изд-во АСВ, 2009. 119 с.
7. Bangash M.Y.H., Bangash T. Elements of Spatial Structures — Analysis and Design. Thomas Telford, London, GB, 2003. DOI: 10.1680/eoss.31494
8. Tian D. Membrane Materials and Membrane Structures in Architecture // The degree of Master of Architectural Design. 2011.
9. Uhlemann J. Elastic Constants of Architectural Fabrics for Design Purposes : PhD Thesis. 2016. 256 p. DOI: 10.2370/9783844044492
10. Kłosowski P., Ambroziak A., Zagubień A. Technical fabrics in construction of large scale roofs — numerical and experimental aspects. 2007. Pp. 1–7.
11. Еремеев П.Г., Туснин А.Р. Экспериментальные исследования модели мембранного покрытия производственного здания // Строительная механика и расчет сооружений. 1992. № 1. С. 65–70. EDN XMCZIL.
12. Фарфель М.И. Разработка и исследование конструкции двускатного блока из мембранных панелей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 24 с. EDN NLAKIR.
13. Пасюта А.В. Исследование прямоугольной висячей оболочки с внешним листовым армированием // Бетон и железобетон. 1988. № 10. С. 7–9.
14. Туснин А.Р. Расчет и проектирование конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля : дис. ... канд. техн. наук. М., 2003. 353 с. EDN NMXJQV.
15. Еремеев П.Г., Деменев М.Г. Экспериментальные исследования мембранных панелей // Строительная механика и расчет сооружений. 1992. № 2. С. 84–88. EDN XMDCTJ.
16. Еремеев П.Г. Эффективные конструкции металлических мембранных оболочек на плоском замкнутом опорном контуре : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1991. 53 с.
17. Арончик А.Б. Экспериментально-теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния покрытия в виде сочлененных мембранных оболочек отрицательной Гауссовой кривизны на квадратном плане : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1981. 21 с.
18. Еремеев П.Г., Присяжной В.Б. Экспериментальные исследования квадратных мембран с податливым контуром // Строительная механика и расчет сооружений. 1985. № 5. С. 58–61. EDN WZSDXX.
19. Еремеев П.Г., Туснин А.Р. Работа мембранных покрытий на прямоугольном плане при различных граничных условиях // Пространственные конструкции зданий и сооружений. 1991. № 7. С. 74–79.
20. Еремеев П.Г., Туснин А.Р. Работа прямоугольных мембранных покрытий при действии различных нагрузок // Известия вузов. Строительство. 1992. № 5–6. С. 8–12. EDN: UODULR
21. Фарфель М.И. Численные исследования работы прямоугольных мембранных панелей // Строительная механика и расчет сооружений. 2008. № 4 (219). С. 53–62. EDN XTSEZG.
22. Фарфель М.И. Инженерная методика расчета мембранных панелей на плоском прямоугольном контуре // Вестник НИИ Строительство. 2012. № 5. С. 30–37. EDN OZKLVN.
23. Фарфель М.И. Разработка и исследование конструкции двускатного блока из мембранных панелей : дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 176 с. EDN QEJLUR.
24. Гольденберг Л.И., Учитель З.Е. Экспериментально-теоретические исследования прочности и устойчивости гибкого контура квадратной мембраны с начальным прогибом // Строительная механика и расчет сооружений. 1989. № 4. С. 36–40.
25. Гольденберг Л.И. Прочность и устойчивость некоторых эффективных типов тонколистовых металлических оболочек : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1990. 58 с. EDN ZJOMRH.
26. Присяжной В.Б. Разработка и исследование металлических мембранных конструкций покрытий на прямоугольном плане для промышленных зданий : дис. ... канд. техн. наук. М., 1985. 240 с.
27. Bridgens B., Birchall M. Form and function: The significance of material properties in the design of tensile fabric structures // Engineering Structures. 2012. Vol. 44. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.05.044
28. Сальвадори М.Д. Численные методы в технике. М. : Изд-во иностранной литературы, 1955. 232 с.
29. Туснин А.Р., Туснина О.А. Численный расчет мембранных конструкций // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. № 3 (23). С. 15.
30. Патент RU № 2008407. Мембранный блок покрытия / М.Г. Деменев, П.Г. Еремеев, В.Л. Жуковцов, А.М. Каминский, Б.И. Коренблит, Ю.И. Корявин и др. 1994.
31. Туснин А.Р., Постарнак М.В. Испытания модели мембранного перекрытия многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 26–35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.26-35 EDN BLXHDI.

Поступила в редакцию 18 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

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

Михаил Валерьевич Постарнак — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1140119; mihaile.pasternak@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Wang Z., Song Q. Form-finding analysis of tensile membrane structure. *Engineering Mechanics*. 2002; 19(2):41-44.
2. Philipp B., Breitenberger M., Auria I.D., Wüchner R., Bletzinger K.-U. Integrated design and analysis of structural membranes using the Isogeometric B-Rep Analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2016; 303:312-340. DOI: 10.1016/j.cma.2016.02.003
3. Kondrashov K.N., Tushin A.R. Analysis of folding patterns typical for membrane structures with internal supports. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 11:67-73. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.11.67-73 (rus.).
4. Trofimov V.I., Kaminsky A.M. *Light metal structures of buildings and structures*. Moscow, ASV Publishing House, 2002; 576. (rus.).
5. Ereemeev P.G. *Spatial thin sheet metal structures of coatings*. Moscow, ASV Publishing House, 2006; 560. (rus.).
6. Kancheli N.V., Batov P.A., Drobot D.Yu. *Realized membrane shells: calculation, design and construction*. Moscow, ASV Publishing House, 2009; 119. (rus.).
7. Bangash M.Y.H., Bangash T. *Elements of Spatial Structures — Analysis and Design*. Thomas Telford, London, GB, 2003. DOI: 10.1680/eoss.31494
8. Tian D. Membrane materials and membrane structures in architecture. *The degree of Master of Architectural Design*. 2011.
9. Uhlemann J. *Elastic Constants of Architectural Fabrics for Design Purposes : PhD Thesis*. 2016; 256. DOI: 10.2370/9783844044492
10. Kłosowski P., Ambroziak A., Zagubień A. *Technical fabrics in construction of large scale roofs — numerical and experimental aspects*. 2007; 1-7.
11. Ereemeev P.G., Tushin A.R. Experimental studies of the model of the membrane coating of an industrial building. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 1992; 1:65-70. EDN XMCZIL. (rus.).
12. Farfel M.I. *Development and study of the design of a gable block of membrane panels : abstract of thesis ... cand. tech. sciences*. Moscow, 2009; 24. EDN NLAKIR. (rus.).
13. Pasyuta A.V. Investigation of a rectangular hanging shell with external sheet reinforcement. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1988; 10:7-9. (rus.).
14. Tushin A.R. *Calculation and design of structures from thin-walled rods of an open profile : diss. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 2003; 353. EDN NMJQV. (rus.).
15. Ereemeev P.G., Demenev M.G. Experimental studies of membrane panels. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 1992; 2:84-88. EDN XMDCTJ. (rus.).
16. Ereemeev P.G. *Efficient designs of metal membrane shells on a flat closed support contour : abstract of the thesis. ... doc. tech. sciences*. Moscow, 1991; 53. (rus.).
17. Aronchik A.B. *Experimental and theoretical study of the stress-strain state of a coating in the form of articulated membrane shells of negative Gaussian curvature on a square plan : abstract of thesis ... cand. tech. sciences*. Moscow, 1981; 21. (rus.).
18. Ereemeev P.G., Prisyazhnoy V.B. Experimental studies of square membranes with a compliant contour. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 1985; 5:58-61. EDN WZSDXX. (rus.).
19. Ereemeev P.G., Tushin A.R. The work of membrane coatings on a rectangular plan under various boundary conditions. *Spatial Structures of Buildings and Structures*. 1991; 7:74-79. (rus.).
20. Ereemeev P.G., Tushin A.R. Work of rectangular membrane coatings under the action of various loads. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 1992; 5:6-8-12. EDN: UODULR. (rus.).
21. Farfel M.I. Numerical studies of the operation of rectangular membrane panels. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2008; 4(219):53-62. EDN XTSEZG. (rus.).
22. Farfel M.I. Engineering methodology for calculating membrane panels on a flat rectangular contour. *Bulletin of the Research Center for Construction*. 2012; 5:30-37. EDN OZKLVN. (rus.).

23. Farfel M.I. *Development and study of the design of a gable block of membrane panels : diss. ... cand. tech. sciences.* Moscow, 2009; 176. EDN QEJIUR. (rus.).

24. Goldenberg L.I., Uchitel Z.E. Experimental and theoretical studies of the strength and stability of a flexible contour of a square membrane with an initial deflection. *Structural Mechanics and Calculation of Structures.* 1989; 4:36-40. (rus.).

25. Goldenberg L.I. *Strength and stability of some effective types of thin-sheet metal shells : abstract of thesis. ... doc. tech. sciences.* Moscow, 1990; 58. EDN ZJOMRH. (rus.).

26. Prisyazhnoj V.B. *Development and research of metal membrane structures of coatings on a rectangular plan for industrial buildings : dis. ... cand. tech. sciences.* Moscow, 1985; 240. (rus.).

27. Bridgens B., Birchall M. Form and function: The significance of material properties in the design of tensile fabric structures. *Engineering Structures.* 2012; 44:1-12. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.05.044

28. Salvadori M.D. *Numerical methods in engineering.* Moscow, Publishing House of Foreign Literature, 1955; 232. (rus.).

29. Tusnin A.R., Tusnina O.A. Numerical calculation of membrane structures. *Bulletin of VolgGASU. Series: Polythematic.* 2012; 3(23):15. (rus.).

30. Patent RU No. 2008407. *Membrane block coating* / M.G. Demenev, P.G. Ereemeev, V.L. Zhukovcov, A.M. Kaminskij, B.I. Korenblit, Yu.I. Koryavin et al. 1994.

31. Tusnin A.R., Postarnak M.V. Testing of the membrane floor slab model of multi-storey buildings. *Industrial and Civil Engineering.* 2022; 9:26-35. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.26-35 EDN BLXHDI. (rus.).

Received January 18, 2023.

Adopted in revised form on February 6, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

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

Mikhail V. Postarnak — postgraduate; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1140119; mihail.pastarnak@mail.ru.

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

Факторы влияния на деформативные свойства тяжелых бетонов на щелочных цементах

Мадина Шахидовна Саламанова^{1,2}, Сайд-Альви Юсупович Муртазаев^{1,2}

¹ Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова (ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова); г. Грозный, Россия;

² Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук; г. Грозный, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе формирования структуры, набора свойств и в период эксплуатации бетонные конструктивные элементы претерпевают различные линейные и объемные изменения, что связано с деформациями материала. Поэтому именно деформативные свойства учитывают при составлении проектной документации на стадии принятия конструктивных решений, зная факт влияния этого показателя на физико-механические характеристики конечного железобетонного изделия или монолитной конструкции в целом. Особый интерес вызывают и причины возникновения деформаций, проявляющихся в процессе твердения бетонного композита.

Материалы и методы. Деформативные свойства тяжелых бетонов на основе вяжущих щелочного затворения изучались согласно ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона», ГОСТ 17624–87 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности».

Результаты. Представлены исследования, направленные на изучение деформативных изменений. Полученные результаты показали, что наблюдалось развитие деформаций при твердении бетонных призм, для составов бетона с использованием микронаполнителя из опоквидного мергеля характерны усадочные деформации, для составов на добавке из барханного порошка обнаружено незначительное расширение.

Выводы. Исследования деформаций бетонов с использованием в качестве вяжущего минеральных порошков алюмосиликатного происхождения, активированных щелочным раствором, показали характер протекающих деформаций. Так, при поверхностном контакте бетона с окружающей средой усадочные деформации обусловлены влажностными, карбонизационными и частично контракционными процессами со свойственными им признаками. При отсутствии контакта с газовой средой явно проявляются деформации, вызванные контракционными процессами. Числовые значения усадочных деформаций ниже нормативных величин для портландцементного тяжелого бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: щелочной раствор, активатор, деформативные свойства, геополимеры, аспирационная пыль, клинкерная пыль, минеральный порошок

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саламанова М.Ш., Муртазаев С.-А.Ю. Факторы влияния на деформативные свойства тяжелых бетонов на щелочных цементах // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 416–426. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.416-426

Автор, ответственный за переписку: Мадина Шахидовна Саламанова, madina_salamanova@mail.ru.

Factors that influence deformation properties of heavy concretes containing alkali-activated cements

Madina Sh. Salamanova^{1,2}, Said-Alvi Yu. Murtazaev^{1,2}

¹ Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov (GSOTU named after academician M.D. Millionshchikov); Grozny, Russian Federation;

² Kh.I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences; Grozny, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the process of structurization, development of properties, and operation concrete structural elements undergo various linear and volumetric changes, triggered by material deformations. Therefore, it is the deformation properties that are taken into account when design documentation is drafted at the stage of making design solutions with regard for the influence of this factor on physical and mechanical characteristics of a final reinforced concrete product or a monolithic structure as a whole. Of particular interest are causes of deformations that emerge during the curing of concrete composites.

Materials and methods. Deformation properties of heavy concretes, having binders that contain alkaline mixes, were studied in accordance with GOST 24452–80 Concrete. Methods for determining prism strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio, and GOST 17624–87 Concrete. Ultrasonic method for determining strength.

Results. The paper presents studies focused on deformation-triggered changes. The results showed that the development of deformations was observed during the hardening of concrete prisms, and shrinkage deformations were characteristic

of concrete compositions that contained the micro-filler made of opoka malmstone, while compositions, having a dune powder additive, demonstrated slight expansion.

Conclusions. Deformations of concrete, containing such binders as mineral powders of aluminosilicate origin and activated by an alkaline solution, were studied to identify the nature of ongoing deformations. Hence, in case of the surface contact between concrete and the environment, shrinkage deformations are caused by moisture, carbonization and some contraction processes that manifest their characteristic features. In the absence of contact with the gas-air medium, deformations caused by contraction processes are clearly manifested. It is noteworthy that numerical values of shrinkage deformations are below the standard values for Portland cement heavy concrete.

KEYWORDS: alkaline solution, activator, stress-strain properties, geopolymers, aspiration dust, clinker dust, mineral powder

FOR CITATION: Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu. Factors that influence deformation properties of heavy concretes containing alkali-activated cements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):416-426. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.416-426 (rus.).

Corresponding author: Madina Sh. Salamanova, madina_salamanova@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Производство доминирующего в строительной сфере материала — портландцемента, требует ежегодной экстенерации из природной среды миллиардов тонн минерально-сырьевого ресурса. Конечно, это не сопровождается выделением токсичных веществ, но выпуск этой продукции сопряжен со значительными выбросами углекислоты, тонкодисперсной реакционной пыли, диоксинов, серы и т.д., наносящими огромный вред здоровью человека, живых существ и окружающей среде. В повестке многих научно-практических форумов остро стоит вопрос декарбонизации экономики и намечены принципиальные направления, напрямую затрагивающие производство ресурсо- и энергосберегающей продукции, изложенные в «Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» и определяющие следующие технологические решения обозначенных проблем:

- производство модифицированных вяжущих с минимальной долей портландцементного клинкера и введением минеральных добавок техногенного происхождения;
- развитие бесклинкерной технологии вяжущих щелочного затворения как на основе использования отходов топливно-энергетической промышленности при их наличии в данном регионе (шлакощелочные цементы), так и с применением тонкодисперсных добавок алюмосиликатной природы (геополимеры).

Таким образом, щелочные вяжущие, получаемые затворением минеральных алюмосиликатных порошков из отходов промышленности или доступного природного сырья, позволяют решать многие научные проблемы экологического, экономического и технического характера. В связи с этим была поставлена цель исследования, заключающаяся в разработке составов бетонных геокомпозитов на основе щелочных вяжущих с улучшенными физико-механическими показателями. А для устойчивого развития и промышленного внедрения технологии геополимерных вяжущих веществ необходим

анализ и систематизация данных о влиянии различных факторов на свойства строительных композитов, особый интерес вызывают проявляющиеся деформации и причины их возникновения в процессе эксплуатации бетонной конструкции [1–8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В процессе формирования структуры, набора свойств и в период эксплуатации бетонные конструктивные элементы претерпевают различные объемные изменения, что связано с деформациями материала [9–15]. Поэтому именно деформативные свойства учитывают при составлении проектной документации на стадии принятия конструктивных решений, зная влияние этого показателя на физико-механические характеристики конечного железобетонного изделия или монолитной конструкции в целом. Деформативные свойства тяжелых бетонов на основе вяжущих щелочного затворения изучались согласно ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона». В состав порошкообразных составляющих вяжущих связок входили отходы цементной промышленности в виде аспирационной и клинкерной пыли, минеральный тонкодисперсный порошок из опоковидного мергеля, полученный 40-минутным помолом в вибрационной шаровой мельнице до удельной поверхности 825 м²/кг. В качестве затворителя использовали подобранный в результате экспериментальных исследований щелочной раствор, состоящий из водного натриевого жидкого стекла (Na₂SiO₃ силикатный модуль 2,8 и плотностью 1,42 г/см³) и гидроксида натрия (NaOH плотностью 1,25 г/см³) в соотношении 80:20 % соответственно. Оптимальным было установление отношения жидкая составляющая к реакционноспособному порошку (ЩР/РК) в диапазоне 0,71–0,76. Для проведения исследований изготовили образцы призмы размером 100 × 100 × 400 мм с использованием в качестве заполнителя кварцевого песка с модулем крупно-

Табл. 1. Составы бетонов на вяжущих щелочной активации

Table 1. Compositions of concretes having alkaline activated binders

Номер состава Number composition	ЩР/ПК AS/RC	Расход материалов на 1 м³ бетона, кг/м³ Consumption of materials per 1 m³ of concrete, kg/m³						
		Щебень Rubble	Песок $M_k = 1,9$ Sand $M_s = 1.9$	ПК RC	КП CD	МП MP	Na_2SiO_3	NaOH
1	0,70	1100	600	511	62	30	250	61
2	0,75	1100	600	511	62	30	268	66

Примечание: ЩР/ПК — отношение щелочного раствора к реакционному порошку; ПК — реакционноспособный компонент (аспирационная пыль); КП — клинкерная пыль; МП — минеральный порошок 40-минутного помола тонкодисперсного мергеля с удельной поверхностью 825 м²/кг.

Note: AS/RC is the ratio of alkaline solution to reactive powder; RC is reactive component (aspiration dust); CD is clinker dust; MP is mineral powder made of finely dispersed malmsone, ground for 40 minutes, with a specific surface area of 825 m²/kg.

сти 1,9 и щебня осадочного происхождения, полученного дроблением валунно-гравийных пород (марка по дробимости 1000). В табл. 1 приведены составы бетонов на вяжущих щелочной активации.

Исследование влияния состава вяжущей связки «реакционный порошок — клинкерная пыль 15 % — мергель 10 % — Na_2SiO_3 + NaOH» и отношения щелочного раствора к порошкообразной вяжущей связке на физико-механические свойства, и, в частности, модуль деформаций, проводили с использованием проверенного и сертифицированного прибора — ультразвукового тестера Пульсар-1.1. В зависимости от скорости распространения ультразвуковых импульсов при поверхностном и сквозном прозвучивании бетона (рис. 1) можно определять прочность, плотность и модуль упругости согласно ГОСТ 17624–87 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности».

Для проведения исследований необходимо задавать режим прозвучивания, материал, установить коэффициенты калибровочных зависимостей «измеряемый параметр — скорость ультразвука». При измерении модуля деформаций коэффициенты для пересчета зависимости «скорость распространения — модуль упругости» можно представить в следующем виде:

$$E = \frac{\rho \cdot V^2}{9,81 \cdot \phi} 10^5,$$

где E — модуль упругости, МПа; ρ — объемный вес, г/см³; V — скорость ультразвука, м/с; ϕ — переходный коэффициент.

Фрагмент проведения эксперимента (рис. 2) и результаты испытаний образцов бетона на определение физико-механических и деформативных свойств, полученных прибором Пульсар, представлены в табл. 2.

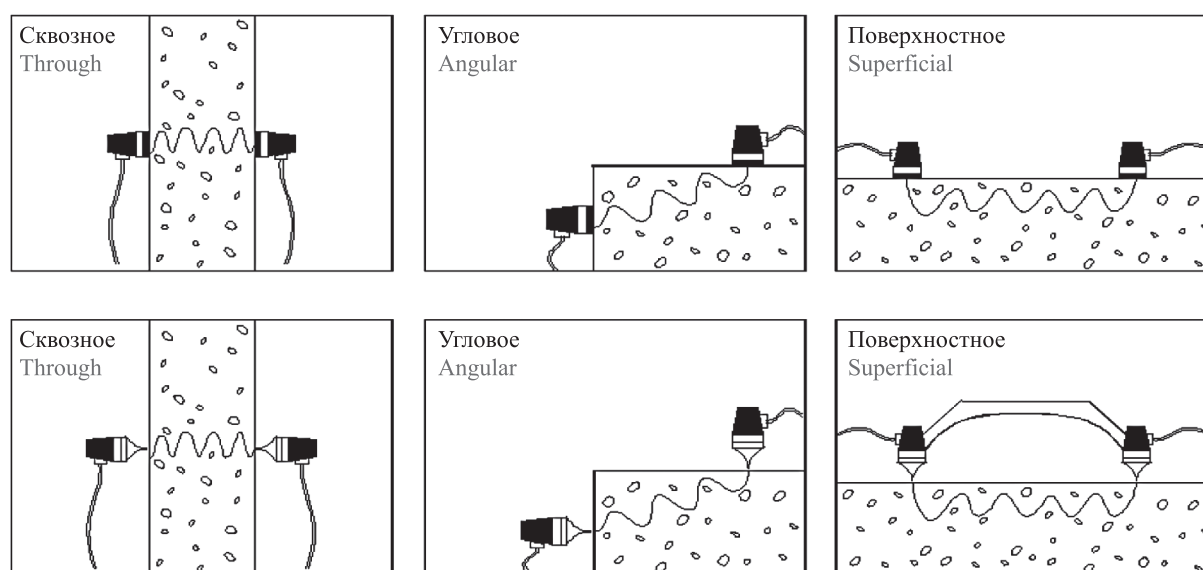


Рис. 1. Варианты прозвучивания

Fig. 1. Sonic testing options



Рис. 2. Процесс проведения испытаний на приборе Пульсар-1.1

Fig. 2. The process of testing using Pulsar 1.1

Табл. 2. Физико-механические свойства бетонов на вяжущих щелочной активации

Table 2. Physical and mechanical properties of concretes containing alkaline activated binders

Показатель Property	Составы бетона в табл. 1 Compositions of concrete in Table 1	
	Состав 1 / Composition 1	Состав 2 / Composition 2
Расход щелочного раствора, л/м ³ Consumption of alkaline solution, l/m ³	311	334
$R_{сж}$ (кубиковая), МПа / $R_{сж}$ (cubic), MPa	44,2	41,3
$R_{пр}$ (призменная), МПа / $R_{пр}$ (prism), MPa	37,0	36,2
Модуль упругости, 10 ³ МПа Modulus of elasticity, 10 ³ MPa	33,5	28,4
Средняя плотность, кг/м ³ / Average density, kg/m ³	2323	2312
Водопоглощение, % / Water absorption, %	3,4	3,8
Марка / Brand	400	400
Класс / Class	30	30

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследований показали, что бетонные образцы на основе вяжущих щелочной активации оказались достаточно плотными и непроницаемыми, невысокое водопоглощение подтверждает низкий процент открытой пористости, что прогнозирует высокую долговечность и прочность композитов. Модуль упругости и прочностные показатели в составе 1 сравнительно выше на 10–15 %, чем в составе 2, и это следствие того, что отношение щелочного затворителя к расходу порошкообразной составляющей вяжущей связки ниже, а при должном формировании образцов и выборе правильных условий для твердения возможно получить продукт хорошего качества.

Таким образом, в плотных многокомпонентных системах наблюдается более высокий модуль деформаций, и обосновано это тем, что в таких композициях слабых зон будет меньше, следовательно, меньше концентраций внутренних напряжений, что способствует упрочнению камня.

Рассматривая полученный искусственный камень на основе вяжущих щелочной активации с использованием минеральных порошков разной гранулометрии, дисперсности и активности с позиции многокомпонентной сложной системы, можно обозначить следующие структурные элементы [17–20]:

- цементная щелочная матрица, усиленная структурными химическими связями и прочными труднорастворимыми новообразованиями и соединениями;

- минеральные алюмосиликатные порошки в тонкодисперсном состоянии, выполняющие ключевую роль в процессах геообразования и гидратации на всех стадиях формирования структуры, и добавки-наполнители более высокой удельной поверхности, необходимые для создания плотной упаковки цементного камня;

- прочная диффузионная контактная зона, являющаяся дополнительным центром упрочнения и омоноличивания бетонного композита.

В результате проведенных исследований установлено, что такие факторы, как химико-минералогический состав компонентов вяжущей связки, концентрация щелочного затворителя, отношение щелочного раствора к реакционной составляющей, непосредственно влияют на деформативные изменения бетона. Для улучшения поровой структуры цементного камня использовали добавку — наполнитель из опоковидного мергеля, и в комплексе с оптимальными условиями твердения можно регулировать плотность композита. Но проведенные ранее [16] исследования установили, что показатель средней плотности повышается с увеличением степени наполнения системы, в дальнейшем это может привести к росту усадочных деформаций. В зависимости от минералогического состава частиц порошка возможно проявление и расширяющихся деформаций, поэтому для исследования отклонений от первоначального размера бетонных образцов необходимо изучить поведение системы, варьируя содержание компонентов и степень концентрации. Исследуемый материал считается новым на строительном рынке, поэтому необходимо определить значимость и природу возникновения деформативных отклонений на величину усадки бетона на щелочных вяжущих.

Усадка возникает в результате протекания процессов карбонизации, так как мы знаем, что в цементном камне содержится небольшой процент щелочей в несвязанном виде и при взаимодействии с углекислотой воздуха образуется карбонат натрия Na_2CO_3 . Но этот вид усадочных деформаций будет присутствовать только на поверхности композита на глубине примерно 1–10 мм [13, 14, 16].

Пластические усадочные деформации наблюдаются в результате уменьшения объема только что уложенного бетона до конца схватывания формовочной смеси. Для бетонов на щелочных вяжущих материалах с использованием в системе минеральных порошков разной granulometрии потенциал этого вида усадки выше, но его можно ликвидировать, используя правильные условия твердения, оптимальные процессы формования бетона [13–16].

Влажностные усадочные деформации проявляются в процессе твердения в воздушно-сухих условиях и развитие их происходит в течение нескольких месяцев. Именно этот вид усадки можно считать самым распространенным и значимым на практике.

Для бетонов на щелочных вяжущих с характерным невысоким содержанием воды в составе щелочного раствора свойственно малое содержание несвязанной воды в структуре бетона, следовательно, меньшее значение приобретает влажностная усадка [16].

И последний вид усадочных деформаций, связанный с процессами контракции, проявляется в результате химического взаимодействия воды с минералами порошкообразной составляющей вяжущей связки, определяется степенью протекания гидратационных процессов в системе и интенсивно развивается в момент протекания химических реакций. Величина контрактционной усадки составляет приблизительно 10 % от влажностной.

Для исследования проявляющихся в процессе твердения деформационных явлений и определения значимости усадки были изготовлены образцы из тяжелого бетона размерами $100 \times 100 \times 400$ мм по рецептурам, представленным в табл. 3, где в состав вяжущей связки входили отходы цементного производства, тонкодисперсный порошок и смешанный щелочной активатор-затворитель.

Состав вяжущей связки:

- аспирационная пыль 75 % + клинкерная пыль 15 % + минеральный порошок 10 % + Na_2SiO_3 + NaOH;

- аспирационная пыль 60 % + клинкерная пыль 15 % + минеральный порошок 25 % + Na_2SiO_3 + NaOH.

Количество минерального порошка варьировали в дозировках 10 и 25 % для выявления роли этого компонента на процессы возникновения деформаций, в качестве наполнителя использовали опоковидный мергель и барханные тонкие пески, которые подвергали механоактивации в течение 30 мин в шаровой вибромельнице ВМ-20, удельная поверхность полученного материала составила $S_{\text{уд}}$ 680 и 660 $\text{м}^2/\text{кг}$ соответственно. Показатель плотности щелочного раствора получали смешиванием натриевого жидкого стекла плотностью 1420 $\text{кг}/\text{м}^3$ и едкого натрия плотностью 1250 $\text{кг}/\text{м}^3$ в соотношении 80:20 %, осуществляли это с помощью лабораторного прибора ареометра АОН-3 с диапазоном измерений 1300–1800 $\text{кг}/\text{м}^3$ и АОН-2 с диапазоном измерений 1240–1320 $\text{кг}/\text{м}^3$. В среднем плотность смешанного щелочного раствора составляла 1340–1350 $\text{кг}/\text{м}^3$.

Оптимальным было принято отношение щелочного раствора к порошкообразной составляющей вяжущей связки в диапазоне 0,68–0,70. В качестве крупного заполнителя использовался щебень карьера Серноводский (ЧР) фракционного состава 5–20 мм, мелкий заполнитель применялся в эксперименте из кварцевого песка с модулем крупности 1,9 карьера Червленский местного производителя. Изготовленные бетонные образцы из смоделированных составов находились на период твердения в воздушно-сухих условиях при температуре

Табл. 3. Рецептуры бетонных композитов

Table 3. Formulations of concrete composites

Номер состава Number composition	Расход материалов на 1 м³ бетона, кг/м³ / Consumption of materials per 1 m³ of concrete, kg/m³							
	Щебень Rubble	Песок $M_k = 1,9$ Sand $M_s = 1.9$	Аспирационная пыль Aspiration dust	Клинкерная пыль Clinker dust	Опока Opoka	Барханный песок Dune sand	Na_2SiO_3	NaOH
1	1100	720	425	75	—	—	215	53
2	1100	720	375	75	50	—	209	52
3	1100	720	300	75	125	—	203	50
4	1100	720	375	75	—	50	206	50
5	1100	720	300	75	—	125	200	48

20 ± 2 °C и относительной влажности 40–50 %, наблюдение за происходящими изменениями осуществлялось с минуты изготовления на протяжении длительного срока до 60 сут.

Визуальный осмотр трех призм разного состава: без добавочного, 10 и 25 % мергеля, показал различие в цветовой окраске образцов, с увеличением минерального порошка происходит осветление бе-

тонной матрицы. На рис. 3, *a* представлены образцы на первые сутки твердения, а на снимке *b* — на третьи сутки, на снимке *c* — на 28 сут твердения. Образцы специально были оставлены в своих формах для наблюдения усадочных деформаций и удобства отмеривания отклонений от первоначальных размеров, в табл. 4 приведены результаты исследований.



Рис. 3. Общий вид испытаний призм на усадочные деформации

Fig. 3. Shrinkage testing of prisms

Табл. 4. Результаты визуальных обследований усадочных деформаций

Table 4. Results of visual examinations of shrinkage deformations

Номер состава Number composition	Расход компонентов вяжущей связки, % Consumption of binder components, %			Усадочные деформации, мм/м Shrinkage deformations, mm/m		
	Аспирационная пыль Aspiration dust	Клинкерная пыль Clinker dust	Опока Opoka	Возраст, сут Age, days	Продольные Longitudinal	Поперечные Transverse
1	85	15	—	1	—	—
				3	0,01	—
				28	0,30	0,20
2	75	15	10	1	0,01	—
				3	0,06	0,06
				28	0,10	0,10
3	60	15	25	1	0,02	0,01
				3	0,10	0,08
				28	0,50	0,40

Проведенные натурные исследования изменений от первоначальных размеров образцов позволяют оценить развитие усадочных деформаций с большой погрешностью, но для поверхностного представления достаточно заметить, что с повышением количества минеральной добавки до 25 % отклонение от исходных параметров растет. Образцы бетона на вяжущем щелочного затворения наблюдались в более поздние сроки, и усадочных деформаций зафиксировано не было. Поэтому для более точного исследования усадочных и линейных деформаций расширения была сконструирована специальная установка для этих целей и деформации измеряли с помощью индикаторов

часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе 400 мм.

Бетонные призмы размерами 100 × 100 × 400 мм сразу после распалубки на вторые сутки помещались в данные устройства, а для выявления зависимости такого важного фактора, как условия твердения на изменение от первоначальных размеров, приготовленные образцы в течение эксперимента содержали в фактически разных условиях: в изолированных от влагообмена с окружающей средой, заворачивали в теплоотражающую пленку толщиной 3 мм, и неизолированных, но в помещении постоянно фиксировали температуру воздуха и относительную влажность среды. Результаты исследований представлены на рис. 4.

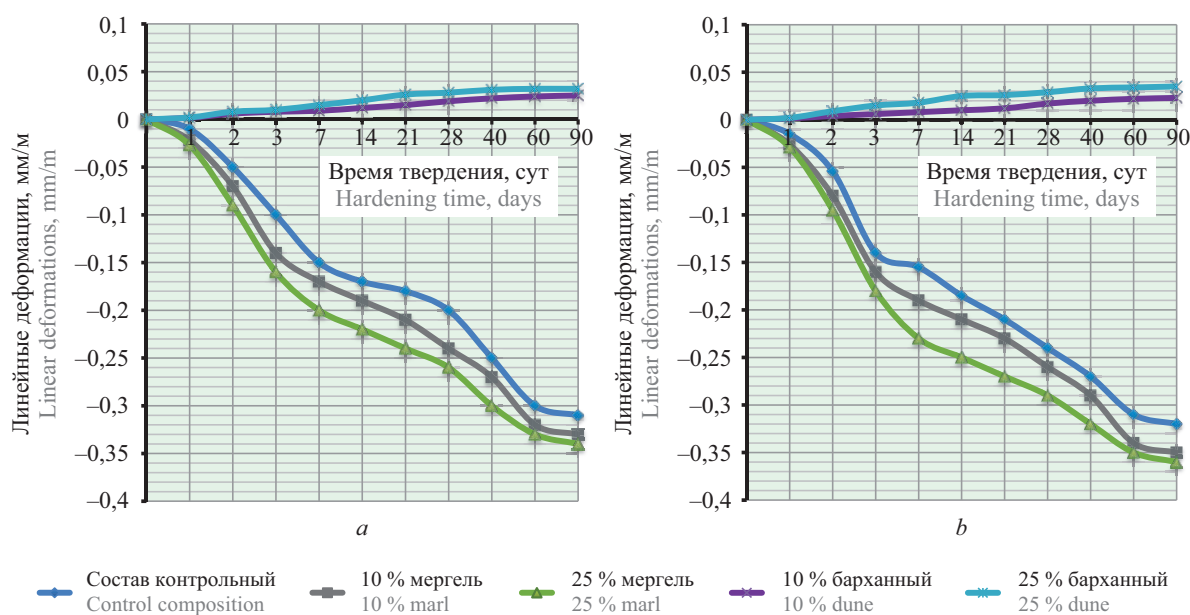


Рис. 4. Зависимость линейных деформаций от продолжительности твердения: а — условия, изолированные от влагопотери с окружающей средой; б — условия, неизолированные с окружающей средой при температуре 20 ± 2 °C и φ = 50–60 %

Fig. 4. Dependence of linear deformations on hardening time: a — conditions isolated from moisture loss in the environment; b — conditions not isolated from the environment at a temperature of 20 ± 2 °C and φ = 50–60 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования деформационных изменений проводили на достаточно длительные сроки твердения до 90 сут и более, фиксировались даже минимальные отклонения. Результаты исследований позволили сделать вывод, что наблюдалось развитие деформационных отклонений при твердении бетонных призм, и для бетонных составов с использованием порошка наполнителя из опоковидного мергеля характерны усадочные деформации, для составов на добавке из барханного порошка обнаружено незначительное расширение в объеме. Зависимости относительных линейных деформаций от времени твердения показывают, что рост деформаций начинается на третьи сутки и постепенно увеличивается в течение 28 сут до 0,26–0,29 мм/м в изолированных и неизолированных условиях выдерживания соответственно. С увеличением расхода минерального порошка отмечается также рост усадочных деформаций с 0,2 до 0,26 мм/м при отсутствии влагопотерь и с 0,24 до 0,29 мм/м в другом случае. Начиная с 40 сут развитие деформаций усадки замедляется даже для 25 % наполненных систем. Можно говорить, что в данном случае присутствует влажностная и контракционная усадка, особенно во втором случае она проявляется в образцах, твердеющих в условиях изоляции от влагообмена с окружающей средой.

Установлено, что бетонные композиты на вяжущей связке «барханный порошок – Na_2SiO_3 » проявляют незначительный, но расширяющийся эффект. Объемное расширение зафиксировано в большей мере в бетонных призмах на связке «аспирационная пыль – клинкерная пыль – барханный порошок 25 % – Na_2SiO_3 ». В исследуемых бетонных призмах (состав 4 и 5) также зафиксировано расширение объема на 0,024 мм/м на 60 сут твердения в образ-

цах с 10 % и 0,032 мм/м с 25 % барханного порошка. В изолированных от окружающей среды образцах расширение немного меньше, чем при контакте с воздухом.

Деформации в изолированных условиях можно считать результатом контракционной усадки, поэтому максимальные числовые значения на 60 сут — 0,34 мм/м. Выявленная характерная особенность вяжущих связок на барханных песках расширяется в объеме на 0,024 мм/м на 60 сут твердения в образцах с 10 % и 0,032 мм/м с 25 % барханного порошка обусловлена химическим составом, в котором оксида магния 2,41 %, известен факт, что это MgO и является самостоятельным вяжущим, которому свойственно при гидратации расширяться в объеме. Рентгенофазовый структурный анализ образцов цементного камня на вяжущей связке с применением минерального порошка из барханных песков подтвердил присутствие гидросульфаталюминатов кальция, также способствующих проявлению небольшого объемного расширения.

Таким образом, в результате исследований деформационных изменений бетонов с использованием в качестве вяжущего минеральных порошков алюмосиликатного происхождения, активированных щелочным раствором, установлен характер протекающих деформаций. Так, при поверхностном контакте бетона с окружающей средой усадочные деформации обусловлены влажностными, карбонизационными и частично контракционными процессами, со свойственными им характерными признаками. При отсутствии контакта с газовой средой явно проявляются деформации, вызванные контракционными процессами. Сравнивая полученные результаты усадочных деформаций бетонов на вяжущих щелочной активации, можно определить, что эти числовые значения ниже нормативных величин для портландцементного тяжелого бетона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lopez F.J., Sugita S., Tagaya M., Kobayashi T. Metakaolin-based geopolymers for targeted adsorbents to heavy metal ion separation // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2014. Vol. 02. Issue 07. Pp. 16–27. DOI: 10.4236/msce.2014.27002
2. Саламанова М.Ш., Муртазаев С.-А.Ю., Нахаев М.Р. Возможные пути альтернативного решения проблем в цементной индустрии // *Строительные материалы*. 2020. № 1–2. С. 73–77. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77
3. Chen L., Wang Z., Wang Y., Feng J. Preparation and properties of alkali activated metakaolin-based geopolymer // *Materials*. 2016. Vol. 9. P. 767. DOI: 10.3390/ma9090767
4. Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang H. Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture // *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 85. Pp. 163–173. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.04.007
5. Рахимова Н.Р. Состояние и перспективные направления развития исследований и производства композиционных шлакощелочных вяжущих, растворов и бетонов // *Строительные материалы*. 2008. № 9. С. 77–80.
6. Hardjito D., Wallah S., Sumajouw D., Rangan B. On the development of fly ash-based geopolymer concrete // *ACJ Materials Journal*. 2004. Vol. 101. Pp. 467–472.

7. Davidovitz J. Geopolymer. Chemistry and applications. Saint-Quentin : Institute Geopolymer, 2008. 592 p.
8. Nuruddin M.F., Demie S., Ahmed M.F., Shafiq N. Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and microstructure properties of self-compacting geopolymer concrete // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Geological and Environmental Engineering. 2011. Vol. 5. Issue 3. Pp. 187–194. DOI: 10.5281/zenodo.1062742
9. Alex T.C., Kalinkin A.M., Nath S.K., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V., Kumar S. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere // International Journal of Mineral Processing. 2013. Vol. 216. Pp. 102–107. DOI: 10.1016/j.minpro.2013.06.001
10. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. Issue 11. Pp. 2084–2090. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052
11. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Композиционные шлакощелочные вяжущие с минеральными добавками различного типа активности // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2013. № 16. С. 204–216.
12. Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu., Bisultanov R.G., Salamanova M.Sh. Fine-grained concretes with clinker-free binders on an alkali gauging // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). 2019. DOI: 10.2991/isees-19.2019.98
13. Bataev D.K.-S., Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu., Viskhanov S.S. Utilization of cement Kiln dust in production of alkali-activated clinker-free binders // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). 2019. DOI: 10.2991/isees-19.2019.89
14. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Механизм отверждения боратных солевых растворов шлакощелочными вяжущими // Цемент и его применение. 2016. № 3. С. 96–99.
15. Dombrowski K., Buchwald A., Weil M. The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers // Journal of Materials Science. 2007. Vol. 42. Issue 9. Pp. 3033–3043. DOI: 10.1007/s10853-006-0532-7
16. Pawlasova S., Skvara F. High-temperature properties of geopolymer materials // Alkali Activated Materials. 2008. Pp. 523–525.
17. Khater H.M. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT // Advances in Nano Research. 2015. Vol. 3. Issue 4. Pp. 225–242. DOI: 10.12989/anr.2015.3.4.225
18. Khater H.M., El Nagar A.M., Ezzat M. Optimization of Alkali activated grog/ceramic wastes geopolymer bricks // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2016. Vol. 5. Issue 1. Pp. 37–46. DOI: 10.15680/IJIRSET.2015.0501005
19. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand // International Journal of Chemical Sciences. 2016. Pp. 115–126.
20. Amer I., Kohail M., El-Feky M.S., Rashad A., Khalaf M.A. A review on alkali-activated slag concrete // Ain Shams Engineering Journal. 2021. Vol. 12. Issue 2. Pp. 1475–1499. DOI: 10.1016/j.asej.2020.12.003

Поступила в редакцию 10 октября 2022 г.

Принята в доработанном виде 28 января 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Мадина Шахидовна Саламанова** — доктор технических наук, доцент, директор научно-технического центра коллективного пользования «Современные строительные материалы и технологии»; **Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова (ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова);** 364051, г. Грозный, пр-т Хусейна Исаева, д. 100; **Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук;** 364051, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, д. 21а; SPIN-код: 614-9180, Scopus: 57192895779, ResearcherID: ABF-7578-2020, ORCID: 0000-0002-1293-7090; madina_salamanova@mail.ru;

Сайд-Альви Юсупович Муртазаев — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства; **Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова (ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова);** 364051, г. Грозный, пр-т Хусейна Исаева, д. 100; **Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук;** 364051, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, д. 21а; s.murtazaev@mail.ru.

Вклад авторов:

Саламанова М.Ш. — научное руководство, концепция исследования, итоговые выводы.

Муртазаев С.-А.Ю. — научное редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Lopez F.J., Sugita S., Tagaya M., Kobayashi T. Metakaolin-based geopolymers for targeted adsorbents to heavy metal ion separation. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2014; 02(07):16-27. DOI: 10.4236/msce.2014.27002
2. Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu., Nakhaev M.R. Possible alternative solutions to problems in the cement industry. *Construction Materials*. 2020; 1-2:73-77. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77 (rus.).
3. Chen L., Wang Z., Wang Y., Feng J. Preparation and properties of alkali activated metakaolin-based geopolymer. *Materials*. 2016; 9(9):767. DOI: 10.3390/ma9090767
4. Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang H. Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture. *Cement and Concrete Research*. 2016; 85:163-173. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.04.007
5. Rakhimova N.R. State and promising directions of development of research and production of composite slag-alkaline binders, mortars and concretes. *Construction Materials*. 2008; 9:77-80. (rus.).
6. Hardjito D., Wallah S., Sumajouw D., Rangan B. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*. 2004; 101:467-472.
7. Davidovitz J. *Geopolymer. Chemistry and applications*. Saint-Quentin, Institute Geopolymer, 2008; 592.
8. Nuruddin M.F., Demie S., Ahmed M.F., Shafiq N. Effect of Superplasticizer and NaOH molarity on workability, compressive strength and microstructure properties of self-compacting geopolymer concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Geological and Environmental Engineering*. 2011; 5(3):187-194. DOI: 10.5281/zenodo.1062742
9. Alex T.C., Kalinkin A.M., Nath S.K., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V., Kumar S. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere. *International Journal of Mineral Processing*. 2013; 216:102-107. DOI: 10.1016/j.minpro.2013.06.001
10. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials*. 2010; 24(11):2084-2090. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052
11. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Composite slag-alkali binders with mineral additives of various types of activity. *Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2013; 16:204-216. (rus.).
12. Salamanova M.Sh., Mintshev M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu., Bisultanov R.G., Salamanova M.Sh. Fine-grained concretes with clinker-free binders on an alkali gauging. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. 2019. DOI: 10.2991/isees-19.2019.98
13. Bataev D.K.-S., Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu., Viskhanov S.S. Utilization of cement kiln dust in production of alkali-activated clinker-free binders. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. 2019. DOI: 10.2991/isees-19.2019.89
14. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Mechanism of solidification of borate salt solutions with slag-alkaline binders. *Journal Cement and its Applications*. 2016; 3:96-99. (rus.).
15. Dombrowski K., Buchwald A., Weil M. The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers. *Journal of Materials Science*. 2007; 42(9):3033-3043. DOI: 10.1007/s10853-006-0532-7
16. Pawlasova S., Skvara F. High-temperature properties of geopolymer materials. *Alkali Activated Materials*. 2008; 523-525.
17. Khater H.M. Effect of firing temperatures on alkali activated Geopolymer mortar doped with MWCNT. *Advances in Nano Research*. 2015; 3(4):225-242. DOI: 10.12989/anr.2015.3.4.225
18. Khater H.M., El Nagar A.M., Ezzat M. Optimization of alkali activated grog/ceramic wastes geopolymer bricks. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2016; 5(1):37-46. DOI: 10.15680/IJIRSET.2015.0501005
19. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand. *International Journal of Chemical Sciences*. 2016; 115-126.
20. Amer I., Kohail M., El-Feky M.S., Rashad A., Khalaf M.A. A review on alkali-activated slag concrete. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021; 12(2):1475-1499. DOI: 10.1016/j.asej.2020.12.003

Received October 10, 2022.

Adopted in revised form on January 28, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

B I O N O T E S: **Madina Sh. Salamanova** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Scientific and Technical Center for Collective Use “Modern Building Materials and Technologies”; **Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov (GSOTU named after academician M.D. Millionshchikov)**; 100 Hussein Isaev Avenue, Grozny, 364051, Russian Federation; **Kh.I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences**; 21a Staropromyslovskoe highway, Grozny, 364051, Russian Federation; SPIN-code: 614-9180, Scopus: 57192895779, ResearcherID: ABF-7578-2020, ORCID: 0000-0002-1293-7090; madina_salamanova@mail.ru;

Said-Alvi Yu. Murtazaev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department “Technology of Construction Production”; **Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov (GSOTU named after academician M.D. Millionshchikov)**; 100 Hussein Isaev Avenue, Grozny, 364051, Russian Federation; **Kh.I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences**; 21a Staropromyslovskoe highway, Grozny, 364051, Russian Federation; s.murtazaev@mail.ru.

Contribution of the authors:

Madina Sh. Salamanova — scientific guidance, research concept, final conclusions.

Said-Alvi Yu. Murtazaev — scientific editing.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.545

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.427-437

Оптимизация пропорций композиционного вяжущего с комплексными добавками

Нгуен Зоан Тунг Лам¹, Светлана Васильевна Самченко¹, Танг Ван Лам²,
Виктория Андреевна Щецова¹

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

² Ханойский горно-геологический университет; г. Ханой, Вьетнам

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема повышения прочности и долговечности портландцементного камня актуальна. Для улучшения свойств цементного вяжущего на этапе изготовления цементных композитов могут быть использованы тонкодисперсные добавки неорганического происхождения, которые оказывают влияние на процессы гидратации и твердения бетона. Введение тонкодисперсных добавок-наполнителей минерального и неорганического происхождения позволяет уплотнить структуру цементного камня (ЦК), а следовательно, и самого бетона за счет значительного снижения пористости, повысить его прочность, непроницаемость и морозостойкость, уменьшить усадку. Кроме того, это дает возможность экономить клинкер, увеличивает водоудерживающую способность бетонных смесей, препятствуя их расслоению при совместном использовании с суперпластификаторами.

Материалы и методы. Изучено влияние составов вяжущего на механические свойства композиционного вяжущего с помощью планирования экспериментов Бокса – Уилсона. Прочность на сжатие ЦК в возрасте 7 и 28 суток определялась в соответствии с методом обработки результатов по ГОСТ 30744–2001. Исследование проведено в лаборатории кафедры строительного материаловедения МГСУ.

Результаты. Полученные результаты представлены в виде поверхности уравнения регрессии второго уровня, описывающей зависимость прочности ЦК на сжатие от содержания комплексной расширяющей и пуццолановой добавки. В результате проведенных экспериментов получен оптимальный состав смеси с использованием комплексных добавок.

Выводы. Основываясь на результатах исследования, авторы продолжают изучение свойств вяжущих материалов на основе комплексной расширяющей и пуццолановой добавки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композиционная добавка, прочность на сжатие, цементный камень, оптимизация, планирование экспериментов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лам Н.З.Т., Самченко С.В., Лам Т.В., Щецова В.А. Оптимизация пропорций композиционного вяжущего с комплексными добавками // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 427–437. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.427-437

Автор, ответственный за переписку: Нгуен Зоан Тунг Лам, nguyendoantunglam1110@gmail.com.

Optimization of proportions of a composite binder that has multi-component additives

Nguyen Doan Tung Lam¹, Svetlana V. Samchenko¹, Tang Van Lam²,
Victoria A. Shvetsova¹

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

² Hanoi University of Mining and Geology; Hanoi, Vietnam

ABSTRACT

Introduction. The problem of increasing the strength and durability of Portland cement stone is not new, but it is still highly relevant. To improve the properties of the cement binder at the stage of manufacturing cement composites, finely dispersed additives of inorganic origin can be used. They affect processes of hydration and curing of concrete. Finely dispersed additives, being fillers of mineral and inorganic origin, compact the structure of the cement stone, and, consequently, concrete itself due to substantial porosity reduction. They also increase its strength, impermeability and frost resistance and reduce shrinkage. Besides, these additives allow saving clinker and improve the water-retaining capacity of concrete mixes, preventing their segregation, if used together with superplasticizers.

Materials and methods. The effect of binder compositions on mechanical properties of a composite binder was studied using the Box-Wilson experimental design method. The compressive strength of cement stone was determined at the age of 7 and 28 days using the method of result processing according to GOST 30744–2001. The study was conducted at the laboratory of Department of Building Materials Engineering of Moscow State University of Civil Engineering.

Results. The results are presented as the surface of the second level regression equation, describing the dependence of compressive strength of the cement stone on the composition of multi-component expanding and pozzolanic additives. The optimal composition of the mix, having multi-component additives, was obtained as a result of the experiments.

Conclusions. In the future the authors will contribute the results of this study to their research into the properties of binders, containing multi-component expanding and pozzolanic additives.

KEYWORDS: composite additive, compressive strength, cement stone, optimization, planning of experiments

FOR CITATION: Lam N.D.T., Samchenko S.V., Lam T.V., Shvetsova V.A. Optimization of proportions of a composite binder that has multi-component additives. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):427-437. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.427-437 (rus.).

Corresponding author: Nguyen Doan Tung Lam, nguyendoantunglam1110@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме повышения прочности и долговечности портландцементного камня по-прежнему уделяется достаточно много внимания [1]. Портландцемент (ПЦ) на протяжении более 200 лет является основным строительным материалом, из которого изготавливается широкая номенклатура строительных материалов и изделий [2–4]. Сегодня цементная промышленность в мире выпускает разнообразные цементы: сульфатостойкий, тампонажный, напрягающий, кислотоупорный, гидрофобный, глиноземистый и другие, выбираемые для применения с учетом будущих условий эксплуатации бетонных композитов [5, 6].

Проведение мероприятий с целью повышения прочности цемента возможно как на стадии его производства, так и в процессе применения. Одним из широко используемых в настоящее время приемов для достижения этой цели является применение различных добавок, влияющих на процессы размывания клинкера, а также на гидратацию и твердение цемента. Для этого обычно используют такие тонкодисперсные минеральные добавки, как трепел, доменные шлаки различного состава, золу уноса, природный гипс, микрокремнезем, метакеолин и др. Эти добавки не растворяются в воде, они — часть твердой фазы цементного камня (ЦК) и бетона [7–10].

Минеральные добавки делятся на химически активные и инертные. Активные добавки, состоящие в основном из аморфного SiO_2 , способны взаимодействовать со свободным гидроксидом кальция с образованием малорастворимых низкоосновных гидросиликатов кальция во влажной среде или обладают способностью к самостоятельному твердению даже при нормальной температуре. Поэтому их используют для управления процессами структурообразования ЦК и твердеющего бетона [11–16].

Однако данные породы, помимо кремнезема, также могут содержать цеолиты, кварц, известняк, компоненты в виде слюды и т.д., а следовательно, «активность» этих пород в цементах может быть комплексной [17–19]. Так, продукты реакций минералов портландцементного клинкера с диатомитом, трепелом и опокой зависят от состава последних. Глинистые материалы интенсивно взаимодей-

ствуют с гидроксидом кальция с образованием гидроалюмосиликатов кальция [20, 21]. Известняк реагирует с трехкальциевым алюминатом с образованием карбоалюминатов кальция, что оказывает регулирующее воздействие на схватывание цемента и скорость реакций гидратации алита и белита [22, 23]. Активность цеолитов по отношению к ПЦ имеет более сложный характер. В результате реакции разрушается цеолитовая структура, а кремнезем и глинозем связывают гидроксид кальция, образуя гидросиликаты и гидроалюмосиликаты кальция [24, 25].

Благодаря использованию местных осадочных горных пород (диатомит, трепел, опока) можно не только расширить минерально-сырьевую базу при производстве ПЦ, но отойти от классического понимания об активных минеральных добавках, которые ассоциируются с добавками с максимальным содержанием аморфного кремнезема.

Введение тонкодисперсных добавок-наполнителей органического и неорганического происхождения позволяет уплотнить структуру ЦК и бетона, что позволит повысить его плотность, прочностные характеристики и морозостойкость, а также снизить проницаемость и усадку. Кроме того, добавки дают возможность экономить клинкер и увеличивают водоудерживающую способность бетонных смесей, препятствуя их расслоению при совместном использовании с суперпластификаторами [26–28].

В данной работе проведена оптимизация состава композиционного вяжущего с неорганическими добавками природного происхождения при помощи ортогонального центрального планирования второго порядка Бокса – Уилсона, а также исследовано влияние природного гипса второго сорта и трепела Хотынецкого месторождения на прочность при сжатии ЦК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

1. Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (М500 Д0) с истинной плотностью 3,208 г/см³.

2. Глиноземистый цемент (ГЦ) 40 (SRB 400, Secar, Франция по ГОСТ 969–91) с истинной плотностью 3,196 г/см³. Характеристики использованных цементов приведены в табл. 1.

Табл. 1. Физико-механические характеристики цементов

Table 1. Physico-mechanical characteristics of cements

Вид цемента Type of cement	Удельная поверхность, см ² /г Specific surface area, cm ² /g	Нормальная густота, % Standard consistency, %	Сроки схватывания, мин Setting time, min		Предел прочности на 3 сут, МПа Maximum compressive strength on the 3rd day, MPa	Предел прочности на 28 сут, МПа Maximum compressive strength on the 28th day, MPa
			Начало Beginning	Конец End		
Портландцемент Portland cement	3655	26,50	140	250	–	51,27
Глиноземистый цемент Aluminous cement	3470	27,00	65	280	41,31	43,36

3. Природный гипс (Г) второго сорта в соответствии с ГОСТ 401–2019 (содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ равняется 93,20 %) с истинной плотностью 2,316 г/см³.

4. Трепел (Тр) Хотынецкого месторождения с истинной плотностью 2,395 г/см³.

5. Вода для смешивания бетона соответствует нормативным требованиям ГОСТ 23732–2011.

Методы

Нормальная густота и сроки схватывания цементов определялись в соответствии с ГОСТ 310.3–76.

Активность портландцемента и истинная плотность определялись по ГОСТ 30744–2001.

Активность глиноземистого цемента была определена в соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ 969–2019.

Удельная поверхность установлена на приборе ПСХ согласно ГОСТ 21043–87.

Для определения прочности на 7 и 28 сут были приготовлены образцы-кубики размерами $2 \times 2 \times 2$ см при водоцементном отношении, равном 0,4. Образцы до проведения испытаний твердели в нормальных условиях ($t = 20 \pm 2$ °С, $\phi = 95$ %) в камере нормального твердения CURACEM 65-L0013/D. Прочность образцов была определена с использованием гидравлического пресса CONTROLS MCC8 50-C8422 в лаборатории кафедры строительного материаловедения НИУ МГСУ. Для сравнения установлена прочность контрольных образцов, изготовленных и испытанных по аналогичной методике из бездобавочного цемента.

Табл. 2. Диапазон переменных влияющих факторов

Table 2. Values and ranges of factors of influence

Факторы / Factors		Уровни варьирования факторов / Factors variation level				
В качестве переменных As variables	В натуральном виде As components	–1,215	–1	0	+1	+1,215
x_1	% ГЦ / % AC	9,57	10	12	14	14,43
x_2	% Г / % G	6,96	7,5	10	12,5	13,04
x_3	% Тр / % Tr	11,14	12	16	20	20,86

В этом исследовании для разработки смеси используется метод проектирования Бокса – Уилсона. Затем уравнение регрессии второго уровня вычисляется по формуле [29–32]:

$$y = b_o + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{j=1}^n b_{jj} x_j^2 + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1, j \neq u}^n b_{ju} x_j x_u, \quad (1)$$

где x_j — факторы; x_j, x_u — взаимодействие между факторами; b_o, b_j и b_{ju} — коэффициенты регрессии; n — число факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для нахождения оптимального состава добавок композиционного вяжущего был применен ортогональный центрально-композиционный план второго порядка при трех факторах. В этом исследовании авторы изучают влияние содержания добавок на прочность ЦК через 7 и 28 сут твердения. Входные факторы, влияющие на механические свойства ЦК (табл. 2):

- x_1 — содержание ГЦ от 9,57 до 14,43 %;
 - x_2 — содержание Г от 6,96 до 13,04 %;
 - x_3 — содержание Тр от 11,14 до 20,86 %;
- % ПЦ + % ГЦ + % Г + % Тр = 100 %.

Количество испытаний N определяется по формуле:

$$N = 2^n + 2n + m = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15, \quad (2)$$

где $m = 1$ — количество экспериментов в центре (для оценки функции отклика делали 3 дополнительные попытки в центре плана, не учтенные в общих формулах (1) и (2), $k = 4$); $n = 3$ — количество входов.

После кодирования переменных были проведены соответствующие эксперименты.

Результаты экспериментов представлены в табл. 3–6.

Коэффициент уравнения регрессии рассчитывается по формуле [29–32]:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2} \quad \forall_j = \overline{1...n},$$

$$b_{ju} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} x_{ui} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2 x_{ui}^2} \quad \forall_{j,u} = \overline{1...n}; \quad j \neq u, \quad (3)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - b_{11} \overline{x_1^2} - \dots - b_{nn} \overline{x_n^2}.$$

Результаты расчета представлены в табл. 4.

В результате были получены следующие уравнения регрессии:

$$y_1 = 40,569 - 0,844x_1 - 1,059x_2 - 2,681x_3 - 0,113x_1x_2 + 0,098x_1x_3 + 1,555x_2x_3 + 0,472x_1x_2x_3 - 0,550x_1^2 - 0,495x_2^2 + 0,530x_3^2; \quad (4)$$

$$y_2 = 52,650 - 0,200x_1 - 2,550x_2 - 1,265x_3 + 0,846x_1x_2 - 0,004x_1x_3 + 0,404x_2x_3 + 1,086x_1x_2x_3 - 0,637x_1^2 - 0,885x_2^2 - 3,051x_3^2. \quad (5)$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии (4) и (5) была проверена при помощи критерия Стьюдента

Коэффициент t_{bj} считается существенным, если $|t_{bj}| \geq t_p(v_2)$.

Согласно работе [33], в табл. 3.2: $t_p(v_2) = 3,1824$ ($p = 0,05$, $v_2 = k - 1 = 4 - 1 = 3$ число степеней свободы).

Значение t_{bj} было определено по формуле [29–32]:

$$t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{bj}}. \quad (6)$$

Значение дисперсии коэффициентов регрессии S_{bj} было рассчитано по формуле (7) [29–32]:

Табл. 3. Соотношение добавок в вяжущем, кодированные значения и полученные результаты по методу ортогонального централизованного планирования второго порядка

Table 3. Ratios of additives in the binder, coded values and results obtained according to the second-order orthogonal centralized planning method

Точки плана ПФЭ ² Points of the plan of a complete factorial experiment ²	В натуральном виде Real variable			В качестве переменных Variable coding			Функции отклика и результаты испытаний Response functions and test results	
	% ГЦ % AC	% Г % G	% Тр % Tr	x_1	x_2	x_3	y_1 — прочность ЦК через 7 сут, МПа y_1 — strength of cement stone at 7 days, MPa	y_2 — прочность ЦК через 28 сут, МПа y_2 — strength of cement stone at 28 days, MPa
Ядро плана The core of the plan	10	7,5	12	−1	−1	−1	45,86	52,11
	14	7,5	12	+1	−1	−1	44,69	51,72
	10	12,5	12	−1	+1	−1	42,33	48,78
	14	12,5	12	+1	+1	−1	38,82	47,43
	10	7,5	20	−1	−1	+1	37,80	49,85
	14	7,5	20	+1	−1	+1	35,13	45,10
	10	12,5	20	−1	+1	+1	38,60	43,79
	14	12,5	20	+1	+1	+1	37,37	46,77
Звездные точки Star (axial) points	9,57	10	16	−1,215	0	0	39,95	50,82
	14,43	10	16	1,215	0	0	39,40	51,91
	12	6,96	16	0	−1,215	0	41,91	57,55
	12	13,04	16	0	1,215	0	37,60	44,45
	12	10	11,14	0	0	−1,215	43,97	47,52
	12	10	20,86	0	0	1,215	38,57	48,08
Точки в центре плана Plan center points	12	10	16	0	0	0	40,90	53,79
	12	10	16	0	0	0	40,63	51,63
	12	10	16	0	0	0	41,50	53,59
	12	10	16	0	0	0	40,53	53,94

Табл. 4. Коэффициенты уравнения регрессии

Table 4. Coefficient of the regression equation

y_j		b_j										
		b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
y_1	$R_{сж}^{7, МПа}$ $R_{сж}^{7, МПа}$	40,569	–0,844	–1,059	–2,681	–0,113	0,098	1,555	0,472	–0,550	–0,495	0,530
y_2	$R_{сж}^{28, МПа}$ $R_{сж}^{28, МПа}$	52,650	–0,200	–2,550	–1,265	0,846	–0,004	0,404	1,086	–0,637	–0,885	–3,051

$$S_{bj} = \sqrt{\frac{S_{ll}^2}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}}, \quad (7)$$

где S_{ll}^2 — остаточная дисперсия на одну степень свободы [29–32].

$$S_{ll}^2 = \frac{\sum_{c=1}^k (y_{0c} - \bar{y}_0)^2}{k-1}; \quad (8)$$

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{k} \sum_{c=1}^k y_{0c}, \quad (9)$$

где k — количество повторных экспериментов в центре; y_{0c} — полученное значение c -го эксперимента в центре; $\bar{y}_0$ — среднее значение k экспериментов в центре.

Для уравнения регрессии (4):

$$\sum_{c=1}^4 (y_{01c} - \bar{y}_{01})^2 = 0,5694 \Rightarrow S_{ll}^2 = \frac{0,5694}{4-1} = 0,1898.$$

Значения критерия проверки, коэффициенты уравнения регрессии приведены в табл. 5.

После проверки коэффициентов несущественные коэффициенты отбрасывались. Таким образом, из уравнения (4) было получено уравнение (10):

$$y_1 = 40,569 - 0,844x_1 - 1,059x_2 - 2,681x_3 + 1,555x_2x_3. \quad (10)$$

Для уравнения регрессии (5):

$$\sum_{c=1}^4 (y_{02c} - \bar{y}_{02})^2 = 3,5071 \rightarrow S_{ll}^2 = \frac{3,5071}{4-1} = 1,1690.$$

Значения критерия проверки, коэффициенты уравнения регрессии приведены в табл. 6.

После проверки коэффициентов несущественные коэффициенты отбрасывались. Таким образом, из уравнения (5) было получено уравнение (11):

$$y_2 = 52,650 - 2,550x_2 - 1,265x_3 - 3,051x_3^2. \quad (11)$$

Проверка адекватности модели

Проверка адекватности модели выполнена при помощи критерия Фишера по формулам $F_{\text{рас}}$ (12) и S_{2d} (13) [31]:

$$F_{\text{рас}} = \frac{S_d^2}{S_{ll}^2}; \quad (12)$$

$$S_{2d}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N-g}, \quad (13)$$

где S_d^2 — значение дисперсии; S_{ll}^2 — остаточная дисперсия на одну степень свободы; y_i — значение

Табл. 5. Значения критерия проверки, коэффициенты уравнения регрессии (4)

Table 5. Student coefficients for checking regression equation (4)

b_j	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
b_j	40,569	–0,844	–1,059	–2,681	–0,113	0,098	1,555	0,472	–0,550	–0,495	0,530
$ b_j $	40,569	0,844	1,059	2,681	0,113	0,098	1,555	0,472	0,550	0,495	0,530
S_{bj}	0,2868	0,1316	0,1316	0,1316	0,1540	0,1540	0,1540	0,1540	0,2086	0,2086	0,2086
t_{bj}	141,443	–6,414	–8,043	–20,364	–0,730	0,633	10,095	3,068	–2,634	–2,375	2,541

Табл. 6. Значения критерия проверки, коэффициенты уравнения регрессии (5)

Table 6. Student coefficients for checking regression equation (5)

b_j	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
b_j	52,650	–0,200	–2,550	–1,265	0,846	–0,004	0,404	1,086	–0,637	–0,885	–3,051
$ b_j $	52,650	0,200	2,550	1,265	0,846	0,004	0,404	1,086	0,637	0,885	3,051
S_{bj}	0,7118	0,3267	0,3267	0,3267	0,3823	0,3823	0,3823	0,3823	0,5178	0,5178	0,5178
t_{bj}	73,964	–0,611	–7,805	–3,871	2,214	–0,010	1,056	2,842	–1,231	–1,708	–5,892

i -го эксперимента; $\hat{y}_i$ — значение функции, полученное в соответствии с экспериментом i ; g — количество коэффициентов регрессии.

Соответствующее табличное значение критерия Фишера $F_p(v_1, v_2)$ было найдено по табл. 3.5 [33] (процентные точки F -распределения) при уровне значимости $p = 0,05$.

Для уравнения регрессии (10):

$$\sum_{i=1}^{15} (y_{1i} - \hat{y}_{1i})^2 = 12,393 \rightarrow S_{1d}^2 = \frac{12,393}{15-5} = 1,2393;$$

$$S_{1ll}^2 = 0,1898 \Rightarrow F_{\text{рас}} = \frac{S_{1d}^2}{S_{1ll}^2} = \frac{1,2393}{0,1898} = 6,5295 < F_{0,05}(10; 3) = 8,767.$$

Для уравнения регрессии (11):

$$\sum_{i=1}^{15} (y_{2i} - \hat{y}_{2i})^2 = 86,364 \rightarrow S_{2d}^2 = \frac{86,364}{15-4} = 7,8513;$$

$$S_{2ll}^2 = 1,1690 \Rightarrow F_{\text{рас}} = \frac{S_{2d}^2}{S_{2ll}^2} = \frac{7,8512}{1,1690} = 6,7162 < F_{0,05}(11; 3) = 8,733.$$

Поэтому уравнения (10) и (11) удовлетворяют условию $F_{\text{рас}} < F_{\text{таб}}$.

С помощью компьютерной программы получены изображения поверхности выражения целевой функции для уравнений регрессии (10) и (11), которые представлены на рис. 1, 2.

Анализируя уравнение регрессии (11), замечено, что ГЦ не оказывает влияния на прочность при сжатии на 28 сут твердения. Это может быть объяснено

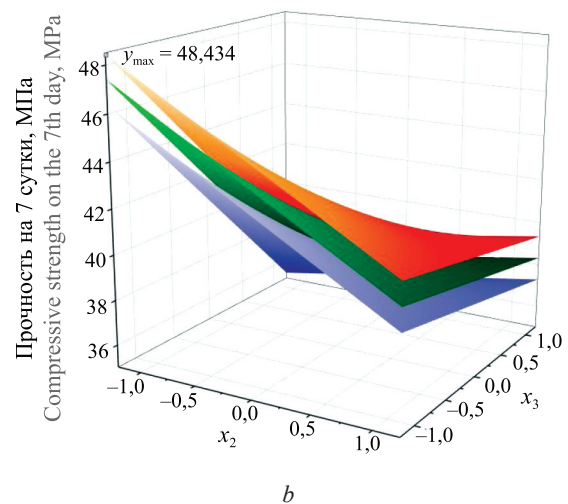
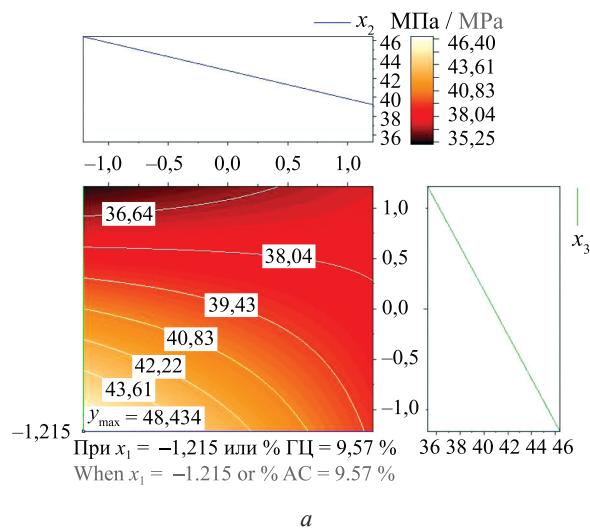


Рис. 1. Поверхность уравнения регрессии (10)

Fig. 1. Second-order surface equation (10)

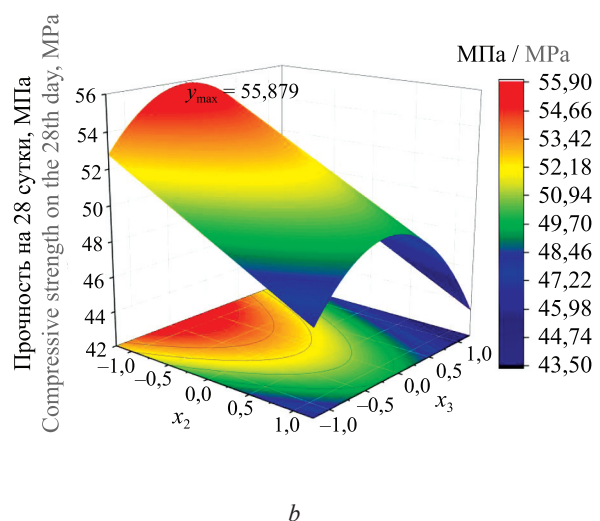
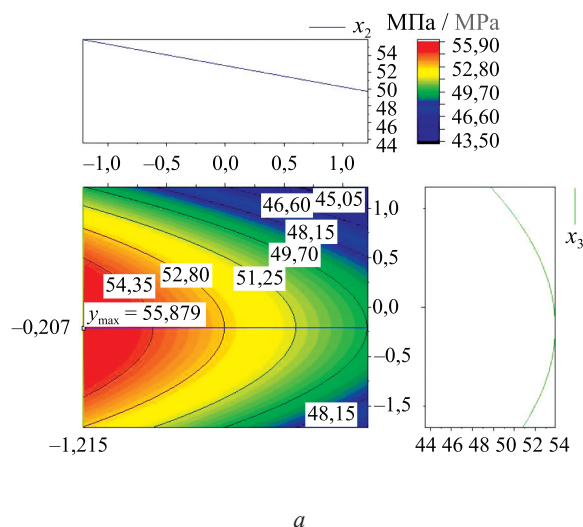


Рис. 2. Поверхность уравнения регрессии (11)

Fig. 2. Surface of the second-order equation (11)

ускоренным процессом твердения ГЦ: он набирает марочную прочность уже на 3 сут твердения. Взаимодействия с другими факторами и квадратичный член для природного гипса отсутствуют. Из этого следует, что зависимость прочности ЦК на 28 сут твердения от количества природного гипса является линейной. При снижении количества гипса в составе вяжущего увеличивается прочность ЦК на 28 сут. Максимальное значение предела прочности при сжатии было достигнуто при количестве гипса, равном около 7 % от массы вяжущего. Если проанализировать полученную функцию относительно количества трепела в составе вяжущего x_3 , то получим уравнение: $y = 55,75 - 1,265x^3 - 3,051x^2$ ($x_2 = -1,215$ для y_{1max}). Зависимость прочности ЦК на 28 сут твердения от количества трепела является квадратичной. Такая функция имеет экстремум в точке $x_3 = -1,265 / (2 \cdot (-3,051)) = -0,207$. Это соответствует количеству трепела, равному 15,17 % от массы композиционного вяжущего. Это значение оптимально с точки зрения связывания гидроксида кальция в низкоосновные гидросиликаты кальция в ходе пуццолановой реакции. Если трепела недостаточно, то часть $\text{Ca}(\text{OH})_2$ остается несвязанной; если избыточное количество, то часть трепела, не вступившего в реакцию, выступает в роли микронаполнителя и приводит к снижению прочности ЦК из-за замены части портландцемента при введении трепела в композиционное вяжущее. Оптимальный состав для получения ЦК максимальной прочности при сжатии на 28 сут твердения представлен в табл. 7.

Анализируя уравнение регрессии (10), отмечено, что для ГЦ (x_1) функция обратно пропорциональная. Возможно, это связано с явлением перекристаллизации метастабильных гидроалюминатов кальция в стабильный трехкальцевый гидроалюминат на 7 сут твердения. Поэтому ЦК с максимальной прочностью на 7 сут твердения был получен при минимальном количестве ГЦ, равном 9,57 % от массы вяжущего. Как было сказано ранее, пик набора прочности глиноземистого цемента приходится на 3 сут твердения. В созданной структуре ЦК образование гидросиликатов кальция (в ходе гидратации портландцемента) приводит к появлению внутренних напряжений и, как следствие, повышению пористости и снижению прочности цементного камня.

Коэффициент взаимодействия факторов x_2 и x_3 имеет положительный знак, что говорит о возможности увеличения предела прочности при сжатии образцов ЦК на 7 сут твердения в том случае, если коэффициенты при x_2 и x_3 будут иметь одинаковые знаки. Коэффициенты при линейных членах x_2 и x_3 являются отрицательными. Максимальная прочность на 7 сут может быть достигнута при минимальных значениях факторов $x_2 = x_3 = -1,215$. Влияние гипса было объяснено выше. Портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образовавшийся в ходе реакции гидратации портландцемента, участвовал в реакциях образования этрингита и гиббсита. Таким образом, на 7 сут твердения оказалось недостаточно количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$, способного вступить в пуццолановую реакцию с трепелом. Также причиной снижения прочности может быть происхождение трепела. Трепел является горной породой с развитой поверхностью и высокой пористостью. Оптимальный состав для получения ЦК максимальной прочности при сжатии на 7 сут твердения представлен в табл. 7.

Результаты исследуемых оптимальных цементов и их сравнение с бездобавочным портландцементом показаны на рис. 3.



Рис. 3. Кинетика твердения цементного камня оптимальных составов

Fig. 3. Hardening kinetics of the cement stone that has optimal compositions

Из рис. 3 видно, что значение прочности на сжатие состава 2 приблизительно равно значению прочности бездобавочного цемента на 28 сут твердения,

Табл. 7. Оптимальные значения прочности цементного камня на 7 и 28 сут

Table 7. Optimal values of cement stone strength on the 7th and 28th days

Состав Composition	% ГЦ % CA	% Г % G	% Тр % Tr	Кодированное значение фактора Coded factor value		
				x_1	x_2	x_3
$y_{1max} = 48,4$ МПа (Состав 1) $y_{1max} = 48.4$ МПа (Composition 1)	9,57	6,96	11,14	-1,215	-1,215	-1,215
$y_{2max} = 55,8$ МПа (Состав 2) $y_{2max} = 55.8$ МПа (Composition 2)	9,57	6,96	15,17	-1,215	-1,215	-0,207

хотя содержание добавок равно 31,70 % от массы вяжущего. Следовательно, оптимальным составом композиционного вяжущего является состав 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа данных, полученных в ходе эксперимента, можно сделать следующие выводы:

- используя алгоритм экспериментального планирования, найдены уравнения регрессии, описывающие взаимосвязь между целевыми функциями: прочность на сжатие ЦК на 7 и 28 сут твердения;

- полученные уравнения регрессии второго порядка (10) и (11) описывают зависимости прочности при сжатии от содержания добавок в композиционном вяжущем;

- с помощью компьютерных программ получены изображения поверхностей уравнений (10) и (11), представленных на рис. 1, 2;

- оптимальный состав вяжущей смеси с максимальной прочностью на сжатие на 7 и 28 сут твердения приведен в табл. 7.

Представленное исследование входит в цикл работ авторов по изучению свойств композиционного вяжущего, содержащего в своем составе трепел, природный гипс, глиноземистый цемент и портландцемент.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Булгаков Б.И., Танг В.Л., Александрова О.А. Влияние наноразмерных частиц сажи на прочность цементного камня в раннем возрасте // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 18–22. DOI: 10.12737/22441

2. Кривобородов Ю.Р., Самченко С.В. Цементные минералы и их твердые растворы : монография. М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2020. 175 с.

3. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Бикбаев Р.Р., Пиксайкина А.А. Исследование свойств портландцементов с активной минеральной добавкой на основе трепела // Вестник ПГТУ. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 3. С. 7–17. DOI: 10.25686/2542-114X.2019.3.7

4. Hewlett P., Liska M. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Elsevier, 2019. 800 p.

5. Kurdowski W. Cement and concrete chemistry. Springer Dordrecht, 2014. 700 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7945-7

6. Родин А.И. Разработка биоцидных цементов и композитов на их основе : дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2013. 205 с.

7. Баженов Ю.М., Нгуен Динь Чинь, Нгуен Тхе Винь. Высокопрочные бетоны с комплексным применением золы рисовой шелухи, золы-уноса и суперпластификаторов // Вестник МГСУ. 2012. № 1. С. 77–82. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.1.77-82

8. Стельмах С.А., Щербань Е.М., Коробкин А.П., Налимова А.В., Серебряная И.А., Нажуев М.П. Разработка состава композиционного портландцемента на основе золошлаковой смеси Новочеркасской ГРЭС // Вестник СевКавГТИ. 2017. № 3 (30). С. 148–153.

9. Senhadji Y., Escadeillas G., Mouli M., Khelafi H., Benosman A. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar // Powder Technology. 2014. Vol. 254. Pp. 314–323. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.01.046

10. Потрясова Е.В., Жучков Е.А., Ахматов М.К., Фомина Н.Н. Влияние техногенной минеральной добавки на свойства цементных композиций // Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сб. мат. семинара молодых ученых XXIV Междунар. науч. конф. 2021. С. 55–60.

11. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М. : Изд-во АСВ, 2006. 368 с.

12. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Федорцов В.А. Повышение коррозионной стойкости цементных композитов активными добавками // Строительство и реконструкция. 2020. № 2. С. 51–60. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-51-60

13. Алексакин С.В., Булгаков Б.И. Мелкозернистый бетон для гидротехнического строительства, модифицированный комплексной органоминеральной добавкой // Вестник МГСУ. 2013. № 8. С. 97–103. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.8.97-103

14. Танг Ван Лам, Нгуен Зоан Тунг Лам. Пуццоланическая активность тонкодисперсных минеральных компонентов различной природы Вьетнама // Техника и технология силикатов. 2021. Т. 28. № 1. С. 7–12.

15. Трунов П.В. Композиционные вяжущие с использованием вулканогенно-осадочных пород Камчатки и мелкозернистые бетоны на их основе : дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2014. 161 с.

16. Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М., Балатханова Э.М., Митина Е.А., Емельянов Д.В., Родин А.И. и др. Получение и физико-механические свойства цементных композитов с применением наполнителей и воды затворения месторождений Чеченской Республики // Вестник МГСУ. 2014. № 12. С. 141–151. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.12.141-151

17. Ерофеев В.Т., Калашников В.И., Смирнов В.Ф., Карпушин С.Н., Родин А.И., Красноглазов А.М. и др. Стойкость цементных композитов на биоцидном портландцементе с активной минеральной добавкой в условиях воздействия модельной

среды бактерий // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 1. С. 11–17.

18. Овчаренко Г.И., Викторов А.В., Садрашва А.О. Влияние вида тонкоизмельченных минеральных добавок на прочность цементного камня. Часть 2 // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 1 (673). С. 28–31.

19. Рахимов Р.З., Камалова З.А., Ермилова Е.Ю., Стоянов О.В. Термически обработанный трепел как активная минеральная добавка в цемент // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 13. С. 99–101.

20. Samchenko S., Larsen O., Gurkin A. The effect of dispersion of limestone on the properties of cement mortar // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Pp. 2068–2071. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.076

21. Zunino F., Scrivener K. The reaction between metakaolin and limestone and its effect in porosity refinement and mechanical properties // Cement and Concrete Research. 2021. Vol. 140. P. 106307. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106307

22. Millán Corrales G., González López J.R., Palomab A., Fernandez Jiménez A. Replacing fly ash with limestone dust in hybrid cements // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 243. P. 118169. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118169

23. Hay R., Li L., Celik K. Shrinkage, hydration, and strength development of limestone calcined clay cement (LC3) with different sulfation levels // Cement and Concrete Composites. 2022. Vol. 127. P. 104403. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104403

24. Zhang X., Wang B., Chang J. Variation in mineral composition by hydration and carbonation in calcium hydroxide matrix containing zeolite // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 56. P. 104491. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104491

25. Chenarboni H.A., Lajevardi S.H., MolaAbasi H., Zeighami E. The effect of zeolite and cement stabi-

lization on the mechanical behavior of expansive soils // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 272. P. 121630. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121630

26. Воронин В.В. Эффективные добавки для вяжущих веществ и бетонов // Научные достижения в исследованиях о новых современных строительных материалах : совместный Междунар. науч. симпозиум. Ханой, 2006. С. 98–105.

27. Wang Q., Xiong Z., He J., Lai M., Ho J. Effective solution for improving rheological properties of cement paste containing zeolite // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 351. P. 128780. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128780

28. Wang Q., Zhang J., Ho J.C.M. Zeolite to improve strength-shrinkage performance of high-strength engineered cementitious composite // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 234. P. 117335. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117335

29. Ву Ким Зиен, Баженова С.И., До Минь Чиен, Хоанг Минь Тхуан, Нгуен Ван Зыонг, Нгуен Зоан Тунг Лам. Оптимизация пропорций смеси пенобетона с использованием плана экспериментов Бокса-Уилсона // Инженерный вестник Дона. 2021. № 5. С. 606–620.

30. Хартман К., Лецкий Э.К., Шефер В., Лецкая Н.С., Фомин Г.А. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М. : Мир, 1977. 552 с.

31. Nguyễn Minh Tuyền. Quy hoạch thực nghiệm. Hà Nội : NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2007. 264 tr. (Нгуен Минь Туен. Планирование эксперимента. Ханой : Изд-во Наука и Технологии. 2007. 264 с.).

32. Александрова О.В., Мацевич Т.А., Кирьянова Л.В., Соловьев В.Г. Статистические методы решения технологических задач : учебное пособие. М. : Изд-во МГСУ. 2017. 153 с.

33. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М. : Наука, 1983. 416 с.

Поступила в редакцию 19 декабря 2022 г.

Принята в доработанном виде 22 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Нгуен Зоан Тунг Лам — аспирант кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 5706-4917, ResearcherID: HGU-5702-2022, ORCID: 0000-0001-9061-8426; nguyendoantunglam1110@gmail.com;

Светлана Васильевна Самченко — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 653449, Scopus: 56575166100, ResearcherID: E-9534-2017, ORCID: 0000-0002-3523-593X; samchenko@list.ru;

Танг Ван Лам — кандидат технических наук, преподаватель-исследователь; **Ханойский горно-геологический университет**; 18 Фо Виен, Дык Тханг, Бак Ту Лиен, Ханой, Вьетнам; РИНЦ ID: 3214-6263, Scopus: 57209307830, ResearcherID: G-2948-2018, ORCID: 0000-0002-4857-835X; lamvantang@gmail.com;

Виктория Андреевна Швецова — аспирант кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1074835, Scopus: 57205074852, ResearcherID: AFN-9948-2022, ORCID: 0000-0002-7079-5705; wishhuma@mail.ru.

Вклад авторов:

Нгуен Зоан Тунг Лам — анализ источников и литературы, построение экспериментальной модели, проведение экспериментальной работы, анализ полученных результатов, построение математической модели, формулирование выводов.

Самченко С.В. — идея статьи, научное руководство, формулирование концепции исследования.

Танг Ван Лам — анализ источников и литературы, редактирование текста статьи.

Щецова В.А. — участие в экспериментальной работе, редактирование текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bulgakov B.I., Tang Van Lam, Alexandrova O.V. Effect of nano-sized carbon-black particles on the strength of cement paste at early age. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016; 11:18-22. DOI: 10.12737/22441 (rus.).
2. Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. *Cement minerals and their solid solutions : monograph*. Moscow, RkhTU name after D.I. Mendeleeva, 2020; 175. (rus.).
3. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bikbaev R.R., Piskaykina A.A. Research of properties of portland cement with active mineral additive on the basis of tripoli. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2019; 3:7-17. DOI: 10.25686/2542-114X.2019.3.7 (rus.).
4. Hewlett P., Liska M. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier, 2019; 800.
5. Kurdowski W. *Cement and Concrete Chemistry*. Springer Dordrecht, 2014; 700. DOI: 10.1007/978-94-007-7945-7
6. Rodin A.I. *Development of biocidal cements and composites based on them : diss. ... cand. tech. sciences*. Saransk, 2013; 205. (rus.).
7. Nguyen Dinh Trinh, Nguyen The Vinh, Bazhenov Yu.M. High-strength concretes with integrated use of rice husk ash, fly ash and superplasticizers. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 1:77-82. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.1.77-82 (rus.).
8. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Korobkin A.P., Nalimova A.V., Serebryanaya I.A., Nazhnev M.P. Development of the composition of composite Portland cement based on the ash and slag mixture of the Novocherkassk State District Power Plant. *Vestnik SevKavGTI*. 2017; 3(30):148-153. (rus.).
9. Senhadji Y., Escadeillas G., Mouli M., Khelafi H., Benosman A. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. *Powder Technology*. 2014; 254:314-323. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.01.046
10. Potryasova E.V., Zhuchkov E.A., Akhmatov M.K., Fomina N.N. Influence of technogenic mineral additive on the properties of cement compositions. *Construction the formation of living environment : collection of materials of XXIV international scientific conference on advanced in civil engineering*. 2021; 55-60. (rus.).
11. Bazhenov Yu.M., Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I. *Modified high quality concretes*. Moscow, Publishing House ASV, 2006; 368. (rus.).
12. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Fedortsov V.A. The increasing of corrosive resistance of cement composites by active additives. *Building and Reconstruction*. 2020; (2):51-60. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-51-60 (rus.).
13. Aleksashin S.V., Bulgakov B.I. Fine concrete for hydraulic engineering modified by a multi-component additive. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2013; 8:97-103. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.8.97-103 (rus.).
14. Tang Van Lam, Nguyen Doan Tung Lam. Pozzolanic activity of fine mineral components of various nature of Vietnam. *Technique and Technology of Silicates*. 2021; 28(1):7-12. (rus.).
15. Trunov P.V. *Composite binders using volcanic-sedimentary rocks of Kamchatka and fine-grained concretes based on them : diss. ... cand. tech. sciences*. Belgorod, 2014; 161. (rus.).
16. Erofeev V.T., Bazhenov Yu.M., Balatkhanova E.M., Mitina E.A., Emel'yanov D.V., Rodin A.I. et al. Obtaining and physical mechanical properties of cement composites with the use of fillers and mixing water from the Chechen Republic fields. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 12:141-151. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.12.141-151 (rus.).
17. Erofeev V.T., Kalashnikov V.I., Smirnov V.F., Karpushin S.N., Rodin A.I., Krasnoglazov A.M. et al. Durability of cement composites based on biocidal Portland cement with an active mineral additive under the influence of the model environment of bacteria. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 1:11-17. (rus.).
18. Ovcharenko G.I., Viktorov A.V., Sadrashva A.O. Effect of the type of finely grinding mineral additives on the strength of cement stone. Part 2. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2015; 1(673):28-31. (rus.).
19. Rakhimov R.Z., Kamalova Z.A., Ermilova E.Yu., Stoyanov O.V. Thermally treated tripoli as an active mineral additive in cement. *Vestnik of Kazan Technological University*. 2014; 17(13):99-101. (rus.).
20. Samchenko S., Larsen O., Gurkin A. The effect of dispersion of limestone on the properties of cement

mortar. *Materials Today: Proceedings*. 2019; 19:2068-2071. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.076

21. Zunino F., Scrivener K. The reaction between metakaolin and limestone and its effect in porosity refinement and mechanical properties. *Cement and Concrete Research*. 2021; 140:106307. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106307

22. Millán Corrales G., González López J.R., Palomab A., Fernandez Jiménez A. Replacing fly ash with limestone dust in hybrid cements. *Construction and Building Materials*. 2020; 243:118169. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118169

23. Hay R., Li L., Celik K. Shrinkage, hydration, and strength development of limestone calcined clay cement (LC3) with different sulfation levels. *Cement and Concrete Composites*. 2022; 127:104403. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104403

24. Zhang X., Wang B., Chang J. Variation in mineral composition by hydration and carbonation in calcium hydroxide matrix containing zeolite. *Journal of Building Engineering*. 2022; 56:104491. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104491

25. Chenarboni H.A., Lajevardi S.H., Mola-Abasi H., Zeighami E. The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils. *Construction and Building Materials*. 2021; 272:121630. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121630

26. Voronin V.V. Effective admixtures for binders and concretes. *Scientific achievements in research on new modern building materials : joint international scientific symposium*. Hanoi, 2006; 98-105. (rus.).

27. Wang Q., Xiong Z., He J., Lai M., Ho J. Effective solution for improving rheological properties of cement paste containing zeolite. *Construction and Building Materials*. 2022; 351:128780. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128780

28. Wang Q., Zhang J., Ho J.C.M. Zeolite to improve strength-shrinkage performance of high-strength engineered cementitious composite. *Construction and Building Materials*. 2020; 234:117335. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117335

29. Vu Kim Dien, Bazhenova S.I., Do Minh Chien, Hoang Minh Thuan, Nguyen Van Duong, Nguyen Doan Tung Lam. Optimization of foam concrete mixture ratio using the Box-Wilson experimental plan. *Engineering Journal of Don*. 2021; 5:606-620. (rus.).

30. Khartman K., Letskii E.K., Shefer V., Letskaya N.S., Fomin G.A. *Planning an experiment in the study of technological processes*. Moscow, Mir, 1977; 552. (rus.).

31. Nguyễn Minh Tuyển. Quy hoạch thực nghiệm. Hà Nội, NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2007; 264 tr. [Nguyễn Minh Tuyển. *Experimental planning*. Hanoi, Science and Technology Publishing House, 2007; 264]. (vietn.).

32. Aleksandrova O.V., Matseevich T.A., Kir'yanova L.V., Solov'ev V.G. *Statistical methods for solving technological problems : tutorial*. Moscow, MGSU Publishing House, 2017; 153. (rus.).

33. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. *Mathematical statistics tables*. Moscow, Nauka Publ., 1983; 416. (rus.).

Received December 19, 2022.

Adopted in revised form on February 22, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

B I O N O T E S: **Nguyen Doan Tung Lam** — postgraduate of the Department of Building Material Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 5706-4917, ResearcherID: HGU-5702-2022, ORCID: 0000-0001-9061-8426; nguyendoantunglam1110@gmail.com;

Svietlana V. Samchenko — Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Building Material Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 653449, Scopus: 56575166100, ResearcherID: E-9534-2017, ORCID: 0000-0002-3523-593X; samchenko@list.ru;

Tang Van Lam — Candidate of Technical Sciences, Lecturer-Researcher; **Hanoi University of Mining and Geology**; 18 Pho Yen, Duc Thang, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam; ID RSCI: 3214-6263, Scopus: 57209307830, ResearcherID: G-2948-2018, ORCID: 0000-0002-4857-835X; lamvantang@gmail;

Viktoriya A. Shvetsova — postgraduate of the Department of Building Material Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1074835, Scopus: 57205074852, ResearcherID: AFN-9948-2022, ORCID: 0000-0002-7079-5705; wishhuma@mail.ru.

Contribution of the authors:

Nguyen Doan Tung Lam — literature analysis, experimental model building, experimental work, analysis experimental data, mathematical model building, conclusion for a research paper.

Svietlana V. Samchenko — main idea of article, scientific leadership, creating a plan of research.

Tang Van Lam — literature analysis, editing main body of article.

Viktoriya A. Shvetsova — participation in experimental work, editing main body of article.

The authors declare no conflict of interest.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 331.45

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.438-446

Динамика снижения производственного травматизма

Елена Анатольевна Король, Евгений Николаевич Дегаев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена динамика снижения производственного травматизма за период с 2000 по 2021 г. По информации Федеральной службы по труду и занятости, в 2021 г. по отношению к 2020 г. участились несчастные случаи на рабочих местах. В обрабатывающей отрасли, строительстве, транспортировке и хранении больше всего погибших на производстве, суммарно 52,2 % от общего количества всех несчастных случаев с летальным исходом. Цель исследования — изучить комплекс параметров, влияющих на уровень производственного травматизма, и определить факторы, способствующие снижению нарушений требований трудового законодательства в области охраны труда.

Материалы и методы. Положения Трудового кодекса РФ и Федерального закона «О специальной оценке условий труда» от 28.12.2013 № 426, устанавливающие требования по охране труда и процедуре специальной оценки условий труда, являются основой для верификации статистических данных о производственном травматизме.

Результаты. Неудовлетворительная организация производства и рабочего места стала основной причиной несчастных случаев в 2021 г. (31 % от общего числа). По вине работников произошло 16 % несчастных случаев с тяжелыми последствиями (нарушения распорядка и дисциплины труда — 10 %, технологического процесса — 6 %). Выявлено свыше 6 тыс. нарушений законодательства по процедуре специальной оценки условий труда на общую сумму наложенных штрафов 2641,9 млн руб.

Выводы. Динамика снижения производственного травматизма в России в разрезе 2000–2021 гг. имеет положительную тенденцию, однако неравномерный характер. Наблюдается некоторое увеличение пострадавших при несчастных случаях на производстве в 2007, 2010 и 2021 гг. Главная причина увеличения производственного травматизма в 2021 г. — мораторий на проведение плановых инспекций в связи с коронавирусной инфекцией. Для снижения производственного травматизма следует ужесточить штрафные санкции за нарушения работодателями требований трудового законодательства, в том числе по специальной оценке условий труда.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: охрана труда, производственный травматизм, техника безопасности, специальная оценка условий труда, несчастные случаи, нарушения, контрольно-надзорная деятельность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Король Е.А., Дегаев Е.Н. Динамика снижения производственного травматизма // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 438–446. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.438-446

Автор, ответственный за переписку: Евгений Николаевич Дегаев, DegaevEN@mgsu.ru.

Dynamics of decline in industrial injuries

Elena A. Korol', Evgeniy N. Degaev

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

ABSTRACT

Introduction. The authors analyze the dynamics of decline in industrial injuries in 2000 to 2021. According to the Federal Service for Labor and Employment, accidents at work became more frequent in 2021 relative to 2020. In the processing industry, construction, transportation and storage sectors, the largest number of fatalities was registered in the workplace, reaching 52.2 % of the total number of all fatal accidents. The purpose of the work is to study the set of parameters, affecting the level of industrial injuries, and to identify the factors that contribute to reducing the number of violations of labor law requirements in occupational safety.

Materials and methods. Provisions of the Labor Code of the Russian Federation and Federal Law “On Special Evaluation of Working Conditions” No. 426 dated December 28, 2013, which set the occupational safety requirements and the procedure for the special evaluation of working conditions, are the basis for verifying statistical data on industrial injuries.

Results. Unsatisfactory production and workplace arrangements were the main causes of accidents in 2021 (31 % of the total number). 16 % of accidents, that involved grave consequences, occurred through the fault of employees (violation of work performance procedures and discipline of labor — 10 %, violations of the technology process — 6 %). More than 6,000 violations of the law were revealed as a result of a special evaluation of working conditions, and the total amount of charged penalties reached 2,641,900 rubles.

Conclusions. The dynamics of decline in industrial injuries in Russia in the context of 2000–2021 has a positive trend, but it is irregular. There was a slight increase in the number of fatalities at industrial facilities in 2007, 2010 and 2021. The main

reason for an increase in industrial injuries in 2021 was a ban imposed on scheduled inspections due to the coronavirus infection. To reduce industrial injuries, it is necessary to toughen penalties for violations by employers of the requirements of the labor legislation, including those regulating the special evaluation of working conditions.

KEYWORDS: occupational safety, industrial injuries, safety precautions, special evaluation of working conditions, accidents, violations, controlling and supervisory activities.

FOR CITATION: Korol' E.A., Degaev E.N. Dynamics of decline in industrial injuries. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):438–446. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.438-446 (rus.).

Corresponding author: Evgeniy N. Degaev, DegaevEN@mgssu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

По данным Федеральной службы по труду и занятости^{1,2}, в 2021 г. по отношению к 2020 г. участились несчастные случаи на рабочих местах. Государственные трудовые инспекции в ходе проведенных контрольно-надзорных процедур выявили свыше 172,2 тыс. нарушений, связанных с трудовым законодательством (рис. 1).

¹ Результаты мониторинга условий и охраны труда в Российской Федерации в 2020 году. М.: Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации, 2021.

² Отчет о деятельности Федеральной службы по труду и занятости и ее территориальных органов в 2021 году.



Рис. 1. Количество нарушений трудового законодательства в разрезе видов экономической деятельности
Fig. 1. Number of violations of labor legislation broken down by the type of economic activities

Количество погибших по сравнению с 2020 г. увеличилось на 18,4 %. Это связано, прежде всего, с введенными ограничениями на проведение плановых проверок из-за распространения коронавирусной инфекции. Отсутствие надзорной деятельности привело к несоблюдению некоторыми организациями требований охраны труда и обеспечения безопасных рабочих условий. На рис. 2 приведены сведения о погибших на производстве в зависимости от вида экономической деятельности.

В обрабатывающей отрасли, строительстве, транспортировке и хранении больше всего погибших на производстве, суммарно 52,2 % от общего количества всех несчастных случаев с летальным исходом.



Рис. 2. Распределение погибших в зависимости от вида экономической деятельности
Fig. 2. Breakdown of fatalities by the type of economic activities

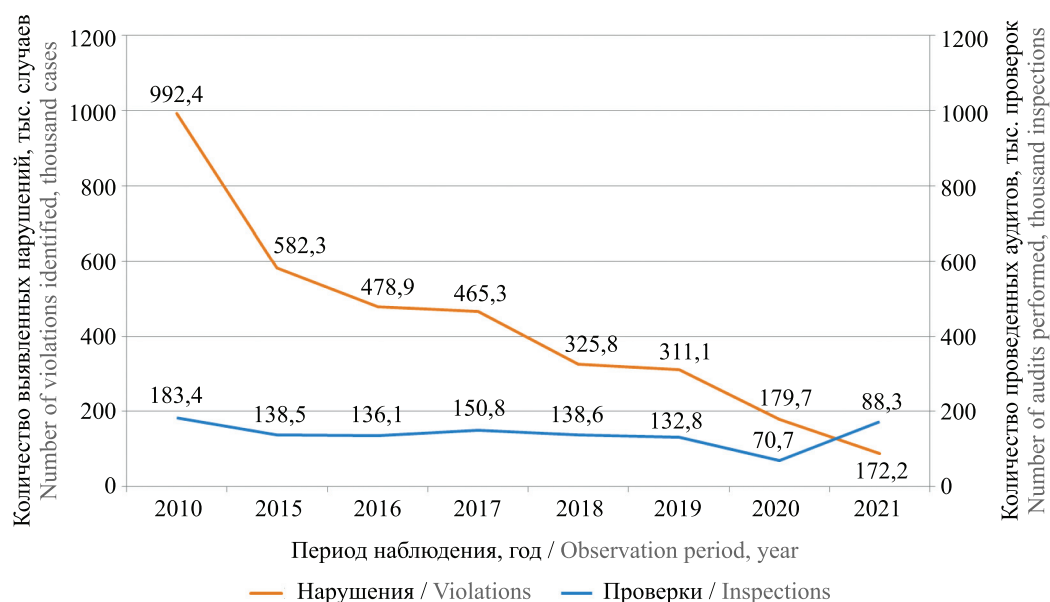


Рис. 3. Количество выявленных нарушений трудового законодательства в России за период 2010–2021 гг.
Fig. 3. Number of labor legislation violations identified in Russia in 2010–2021

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Трудовое законодательство³ под охраной труда понимает систему, которая обеспечивает сохранение жизни и здоровья сотрудников в период трудового процесса, а также включает в себя мероприятия, направленные на обеспечение социально-экономических, лечебно-профилактических, организационно-технических и других прав.

Требования трудового законодательства по охране труда дополняет Федеральный закон «О специальной оценке условий труда»⁴, устанавливающий необходимость проведения специальной оценки условий труда (СОУТ), в процессе которой следует определить риски, связанные с наличием опасных и вредных факторов производства. Обнаруженные факторы подлежат исследованию для разработки технических и организационных мер по снижению риска негативного или опасного влияния на жизнь и здоровье работника.

Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях (КоАП РФ)⁵ ст. 5.27.1 предусматривает наложение штрафа за нарушение или непроведение процедуры СОУТ в размере от 5 до 10 тыс. руб. на должностные лица, на юридические лица — от 60 до 80 тыс. руб. Соккрытие несчастного случая согласно ст. 15.34 КоАП РФ влечет

³ Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ.

⁴ О специальной оценке условий труда : Федеральный закон от 28.12.2013 № 426-ФЗ.

⁵ Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 № 195-ФЗ.

наложение административного штрафа на юридических лиц в размере от 5 до 10 тыс. руб., на должностных лиц — от 500 до 1000 руб.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно информации Федеральной службы государственной статистики (Росстат)⁶, количество выявленных нарушений трудового законодательства в России планомерно снижается с 2010 г. (рис. 3). Количество нарушений, выявленных одной проверкой, снизилось более чем в 2,7 раза с 5,4 до 2,0 случаев.

В разрезе 2010 и 2020 гг. больше всего нарушений фиксируется по оплате труда, нормированию рабочего времени, проведению процедур инструктажа на рабочем месте, требованиям охраны труда и техники безопасности (рис. 4).

С 2010 г. наблюдается снижение выявленных нарушений охраны труда, что можно связать с сокращением трудовых ресурсов страны и более ответственным подходом работодателей к обучению и инструктированию работников по охране труда (рис. 5). Однако в 2020 и 2021 гг. увеличилось количество нарушений по оплате и нормированию труда, что связано с введенными строгими санитарно-эпидемиологическими ограничениями во время пандемии COVID-19, которые привели к большому количеству сокращений и переходу части сотрудников на удаленный режим работы [1–5].

⁶ Труд и занятость в России 2021 : статистический сб. М. : Росстат, 2021. 177 с.

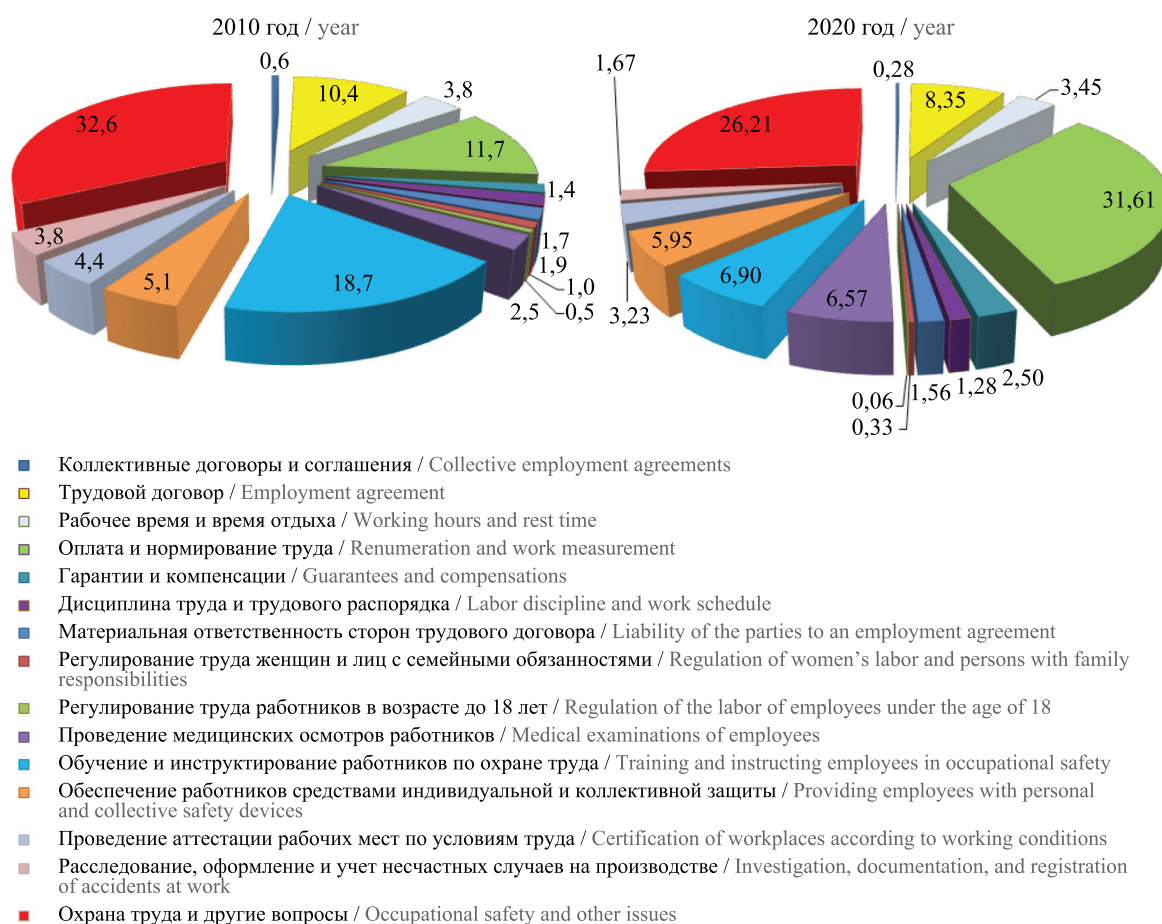


Рис. 4. Распределение зафиксированных нарушений по видам

Fig. 4. Breakdown of recorded violations by types

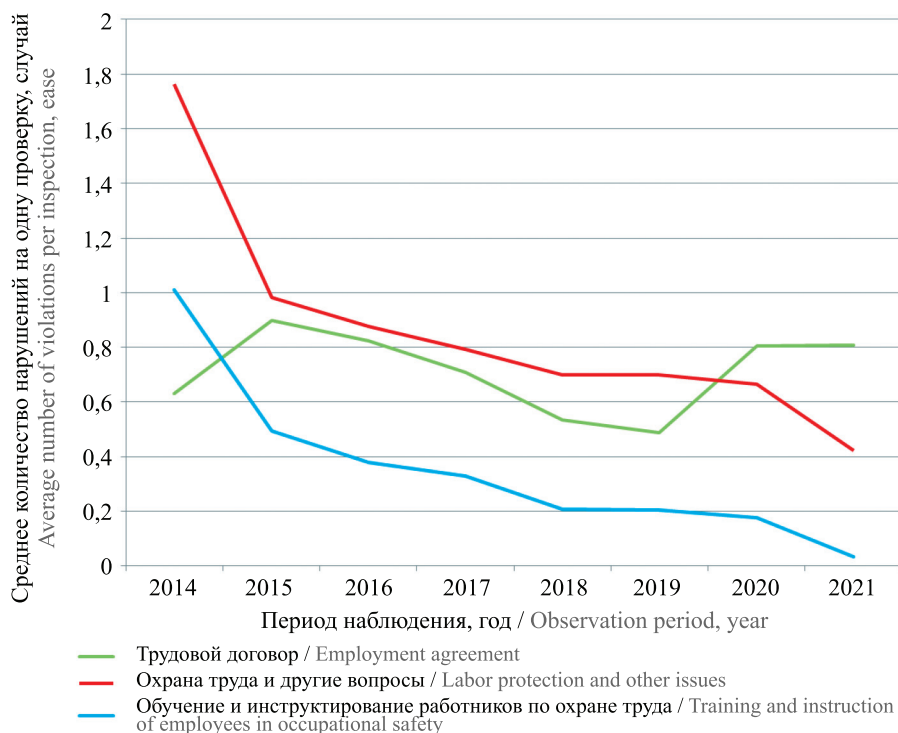


Рис. 5. Среднее количество нарушений, выявленных одной проверкой, по основным направлениям

Fig. 5. Average number of violations identified during one inspection

Данные, фиксируемые с 2000 по 2021 г., свидетельствуют о динамике снижения производственного травматизма в России (рис. 6). Несчастных случаев с летальным исходом стало в 3,6 раза меньше (снижение с 4,4 до 1,21 тыс. чел.), а общее количество пострадавших сократилось более чем в 7 раз (снижение с 151,8 до 21,6 тыс. чел.).

На рис. 7 прослеживается взаимосвязь численности трудовых ресурсов и общего количества выявленных нарушений охраны труда. В 2021 г. с увеличением численности трудовых ресурсов установлено на 34 % больше нарушений, чем в 2020 г.

В 2020 г. уменьшение трудовых ресурсов и снижение количества выявляемых нарушений приводит

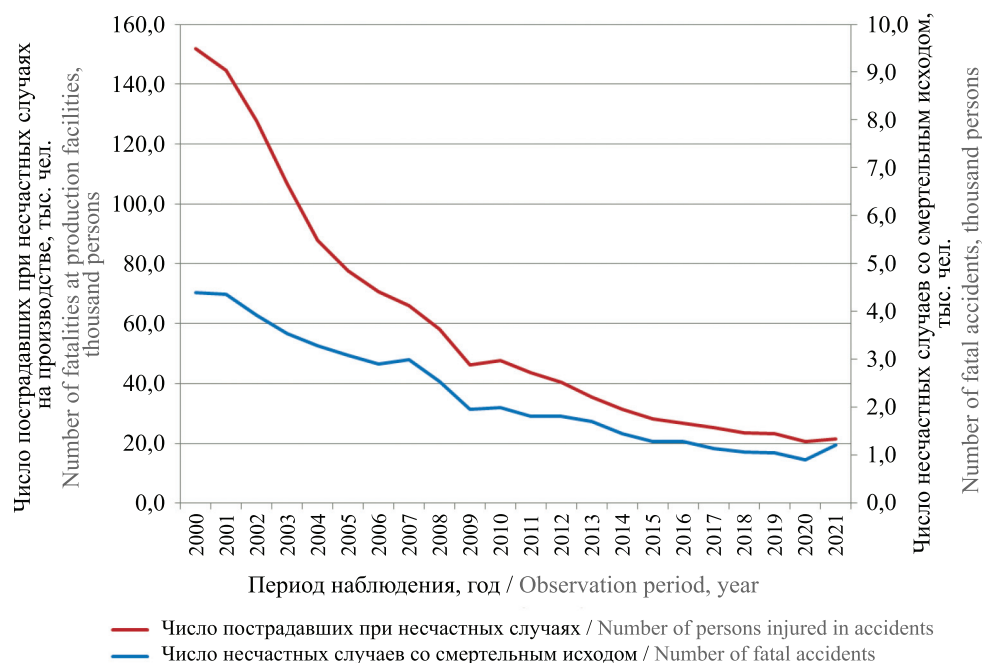


Рис. 6. Производственный травматизм с 2000 по 2021 г.

Fig. 6. Industrial injuries from 2000 to 2021



Рис. 7. Данные по изменению трудовых ресурсов и выявленным нарушениям на производстве

Fig. 7. Data on changes in labor resources and identified violations at production facilities

к положительной динамике сокращения количества пострадавших при несчастных случаях (рис. 8). Но уже в 2021 г. фиксируется увеличение численности пострадавших и общего количества трудовых ресурсов [6–8].

Структура занятых по уровню образования свидетельствует о повышении числа работников с высшим образованием с 2010 по 2020 г. на 7,0 %, что положительно повлияло на производственную культуру и ответственность работников (рис. 9).

Однако в 2021 г. с увеличением на 1,6 % трудовых ресурсов в стране зафиксировано снижение работников с высшим образованием на 0,7 %, что косвенно также может влиять на увеличение производственного травматизма.

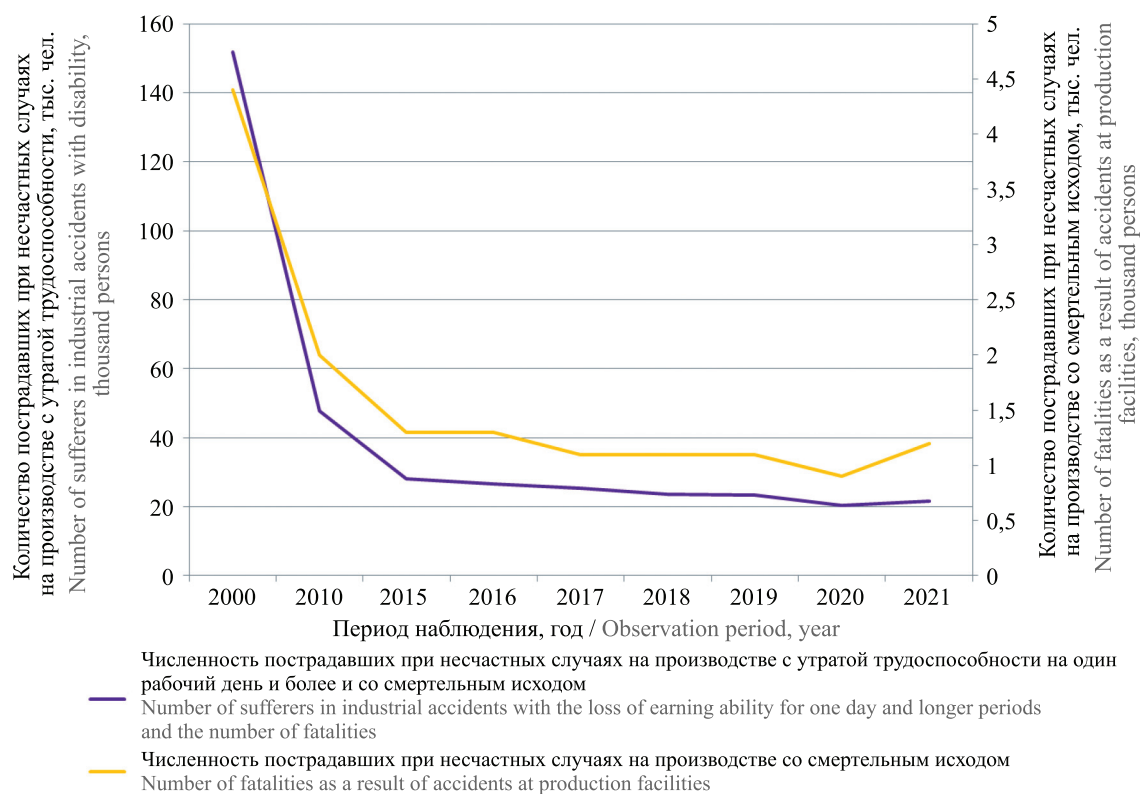


Рис. 8. Количество несчастных случаев на производстве с 2000 по 2021 г.

Fig. 8. Number of accidents at work from 2000 to 2021

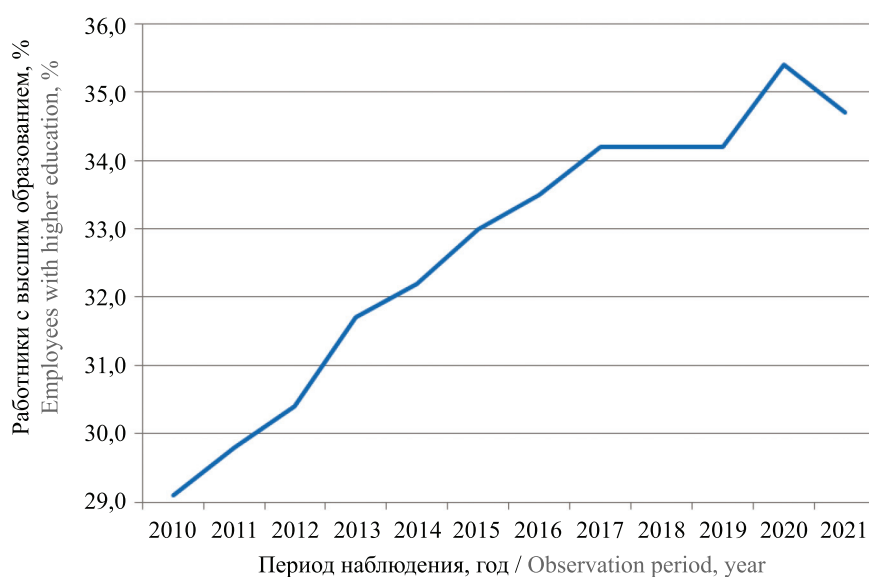


Рис. 9. Структура работников по уровню образования с 2010 по 2021 г.

Fig. 9. Breakdown of employees by education from 2010 to 2021

На рис. 10 приведены статистические данные несчастных случаев на производстве в 2021 г. с тяжёлыми последствиями, типизированные по видам.



Рис. 10. Типология несчастных случаев на производстве
Fig. 10. Typology of industrial accidents

Наибольшее количество несчастных случаев произошло в результате падения при разности уровня высот и воздействия движущихся деталей, машин и механизмов. Для снижения риска возникновения несчастных случаев законодательством предусмотрена процедура проведения специальной

оценки условий труда. В 2021 г. государственными инспекциями труда было назначено 7318 административных штрафов и выписано 3721 предупреждений за нарушение работодателями установленного порядка проведения СОУТ на рабочих местах или ее непроведение (ч. 2 ст. 5.27.1 КоАП РФ). Общая сумма наложенных штрафов составила 2641,9 млн руб. [8–10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика снижения производственного травматизма в России в разрезе 2000–2021 гг. имеет положительную тенденцию, однако неравномерный характер. Наблюдается некоторое увеличение пострадавших при несчастных случаях на производстве в 2007, 2010 и 2021 гг. Основной причиной увеличения производственного травматизма в 2021 г. является мораторий на проведение плановых инспекций в связи с коронавирусной инфекцией [11–16].

Неудовлетворительная организация производства и рабочего места — главная причина несчастных случаев в 2021 г. (31 % от общего числа). По вине работников произошло 16 % несчастных случаев с тяжёлыми последствиями (нарушения распорядка и дисциплины труда — 10 %, технологического процесса — 6 %).

Выявлено свыше 6 тыс. нарушений законодательства по процедуре СОУТ на общую сумму наложенных штрафов 2641,9 млн руб. Для снижения производственного травматизма следует ужесточить штрафные санкции за нарушения работодателями требований трудового законодательства, в том числе по специальной оценке условий труда [17–20].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гапоненко Ю.Д. Теоретические подходы к дефиниции «охрана труда» // Вестник науки. 2020. Т. 1. № 1 (22). С. 69–73.
2. Щепетова В.А., Савинова Т.С. Прогнозирование производственной травмы работника с помощью «дерева событий» // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2020. № 1 (26). С. 197–202.
3. Король Е.А., Дегаев Е.Н., Нармания Б.Е. Верификация температуры воздуха рабочих зон на предприятиях текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 6 (402). С. 189–194. DOI: 10.47367/0021-3497_2022_6_189
4. Дегаев Е.Н. Проектные решения обеспечения безопасности производственных процессов при переустройстве инженерных коммуникаций // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 3 (1051). С. 50–53.
5. Fominova O., Chernyshev V. Controlled vibration protection systems: Optimization and verification // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings”. 2020. Pp. 753–762. DOI: 10.1007/978-981-13-9267-2_63
6. Зиновьева О.М., Меркулова А.М., Смирнова Н.А. Направления повышения промышленной безопасности на предприятиях горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № S1. С. 21–30. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-1-21-30
7. Соколов А.М., Баутенок А.В. Производственные риски на объектах горно-металлургических производств // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № S1. С. 111–117. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-1-111-117
8. Потоцкий Е.П., Гарт В.А. Оценка риска травмирования персонала с учетом показателя

профессиональной пригодности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № S1. С. 144–153. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-1-144-153

9. Минько В.М., Евдокимова Н.А., Басараб А. К разработке программ снижения риска травмирования на производстве // Безопасность жизнедеятельности. 2020. № 1 (229). С. 3–8.

10. Красовский В.О. Алгоритмы количественной оценки профессиональных рисков в гигиене труда // Norwegian Journal of Development of the International Science. 2020. № 38–1. С. 28–32.

11. Горбунова Е.С. Совершенствование процедуры проведения производственного контроля на опасных производственных объектах // Молодой ученый. 2020. № 3 (293). С. 43–45.

12. Olyanyshen T.V., Storozhuk V.M., Yatsiuk R.A., Korzh H.I., Ratushniak Yu.V., Melnikov A.V. Multicriteria problem of evaluation of the enterprise labor protection management system efficiency // Mathematical Modeling and Computing. 2021. Vol. 8. Issue 2. Pp. 330–337. DOI: 10.23939/mmc2021.02.330

13. Suparna N.S., Ajeet Jaiswal. The occupational health and safety // Anthrope-Indialogs. 2021. Vol. 1. Issue 3. Pp. 261–269.

14. Saputri H. Legal protection of occupational safety and health for pharmacists of clinics in Semarang // Awang Long Law Review. 2022. Vol. 5. Issue 1. Pp. 205–214. DOI: 10.56301/awl.v5i1.565

15. Alam M.-U., Sharior F., Shoaib D.M., Hasan M., Tabassum K.F., Ferdous S. et al. Hygiene knowledge and practices and determinants of occupa-

tional safety among waste and sanitation workers in Bangladesh during the COVID-19 pandemic // Hygiene and Environmental Health Advances. 2022. Vol. 4. P. 100022. DOI: 10.1016/j.heha.2022.100022

16. Isa M.F.M., Rahim N.Z.A., Fathi M.S., Yusoff R.C.M. Extending the occupational safety and health management system as a knowledge management system through the mixed-reality remote audit // Knowledge Management in Organisations. 2022. Pp. 270–278. DOI: 10.1007/978-3-031-07920-7_21

17. Jbeily A.H. Importance and effectiveness of different safety training methods and their application in iron ore pelletizing plants // European Journal of Business and Management Research. 2023. Vol. 8. Issue 1. Pp. 142–146. DOI: 10.24018/ejbmr.2023.8.1.1790

18. Tawiah T., Opoku A., Frimpong A., Hafiz B. An assessment of knowledge among healthcare professionals on occupational health hazards at New Abirem government Hospital, Ghana // Asian Journal of Medicine and Health. 2022. Pp. 153–171. DOI: 10.9734/ajmah/2022/v20i1030516

19. Yilmaz S. How to enhance occupational health and safety practices in schools: An analysis through the eyes of school principals // International Journal of Psychology and Educational Studies. 2022. Vol. 9. Pp. 922–933. DOI: 10.52380/ijpes.2022.9.4.871

20. Yiu N.S.N., Chan D.W.M., Shan M., Sze N.N. Implementation of safety management system in managing construction projects: Benefits and obstacles // Safety Science. 2019. Vol. 117. Pp. 23–32. DOI: 10.24136/eq.2022.035

Поступила в редакцию 27 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 10 марта 2023 г.

Одобрена для публикации 13 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Анатольевна Король — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 678276, Scopus: 57197844794, ResearcherID: C-2635-2019, ORCID: 0000-0002-5019-3694; KorolEA@mgsu.ru;

Евгений Николаевич Дегаев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 798266, Scopus: 57195225439, ResearcherID: S-1854-2018, ORCID: 0000-0001-6384-8277; DegaevEN@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gaponenko Yu.D. Theoretical approaches to the definition of “labor protection”. *Bulletin of Science*. 2020; 1(1):(22):69-73. (rus.).

2. Shchepetova V.A., Savinova T.S. Forecasting an employee’s individual injury by using the “event

tree”. *Education and Science in the Modern World. Innovation*. 2020; 1(26):197-202. (rus.).

3. Korol E.A., Degaev E.N., Narmania B.E. The air temperature verification of working areas in the textile industry. *Proceedings of Higher Educational Institu-*

tions. *Textile Industry Technology*. 2022; 6(402):189-194. DOI: 10.47367/0021-3497_2022_6_189 (rus.).

4. Degaev E.N. Design solutions for ensuring the safety of production processes during the reconstruction of engineering communications. *BST: Building Equipment Bulletin*. 2022; 3(1051):50-53. (rus.).

5. Fominova O., Chernyshev V. Controlled vibration protection systems: Optimization and verification. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. 2020; 753-762. DOI: 10.1007/978-981-13-9267-2_63

6. Zinovieva O.M., Merkulova A.M., Smirnova N.A. Directions for improving industrial safety at mining enterprises. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2020; S1:21-30. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-1-21-30 (rus.).

7. Sokolov A.M., Bautenok A.V. Production risks at objects of mining and metallurgical production. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2020; S1:111-117. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-1-111-117 (rus.).

8. Pototskii E.P., Gart V.A. Assessment of the risk of injury of personnel taking into account the indicator of professional suitability. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2020; S1:144-153. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-1-144-153 (rus.).

9. Minko V.M., Evdokimova N.A., Basarab A. To the development of programs to reduce the risk of injury in the production. *Life Safety*. 2020; 1(229):3-8. (rus.).

10. Krasovsky V. Algorithms of quantitative assessment of professional risks in occupational health. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2020; 38-1:28-32. (rus.).

11. Gorbunova E.S. Improving the procedure for conducting production control at hazardous production facilities. *Young Scientist*. 2020; 3(293):43-45. (rus.).

12. Olyanyshen T.V., Storozhuk V.M., Yatsiuk R.A., Korzh H.I., Ratushniak Yu.V., Melnikov A.V. Multi-criteria problem of evaluation of the enterprise labor protection management system efficiency. *Mathemati-*

cal Modeling and Computing. 2021; 8(2):330-337. DOI: 10.23939/mmc2021.02.330

13. Suparna N.S., Ajeet Jaiswal. The occupational health and safety. *Anthropo-Indialogs*. 2021; 1(3):261-269.

14. Saputri H. Legal protection of occupational safety and health for pharmacists of clinics in Semarang. *Awang Long Law Review*. 2022; 5(1):205-214. DOI: 10.56301/awl.v5i1.565

15. Alam M.-U., Sharior F., Shoaib D.M., Hasan M., Tabassum K.F., Ferdous S. et al. Hygiene knowledge and practices and determinants of occupational safety among waste and sanitation workers in Bangladesh during the COVID-19 pandemic. *Hygiene and Environmental Health Advances*. 2022; 4:100022. DOI: 10.1016/j.heha.2022.100022

16. Isa M.F.M., Rahim N.Z.A., Fathi M.S., Yusoff R.C.M. Extending the occupational safety and health management system as a knowledge management system through the mixed-reality remote audit. *Knowledge Management in Organisations*. 2022; 270-278. DOI: 10.1007/978-3-031-07920-7_21

17. Jbeily A.H. Importance and effectiveness of different safety training methods and their application in iron ore pelletizing plants. *European Journal of Business and Management Research*. 2023; 8(1):142-146. DOI: 10.24018/ejbmr.2023.8.1.1790

18. Tawiah T., Opoku A., Frimpong A., Hafiz B. An assessment of knowledge among healthcare professionals on occupational health hazards at New Abirem Government Hospital, Ghana. *Asian Journal of Medicine and Health*. 2022; 153-171. DOI: 10.9734/ajmah/2022/v20i1030516

19. Yilmaz S. How to enhance occupational health and safety practices in schools: An analysis through the eyes of school principals. *International Journal of Psychology and Educational Studies*. 2022; 9:922-933. DOI: 10.52380/ijpes.2022.9.4.871

20. Yiu N.S.N., Chan D.W.M., Shan M., Sze N.N. Implementation of safety management system in managing construction projects: Benefits and obstacles. *Safety Science*. 2019; 117:23-32. DOI: 10.24136/eq.2022.035

Received February 27, 2023.

Adopted in revised form on March 10, 2023.

Approved for publication on March 13, 2023.

BIONOTES: Elena A. Korol' — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Housing and Communal Complex; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 678276, Scopus: 57197844794, ResearcherID: C-2635-2019, ORCID: 0000-0002-5019-3694; KorolEA@mgsu.ru;

Evgeniy N. Degaev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Housing and Communal Complex; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 798266, Scopus: 57195225439, ResearcherID: S-1854-2018, ORCID: 0000-0001-6384-8277; DegaevEN@mgsu.ru.

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

The authors declare that they have no conflicts of interest.

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 532.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.447-454

Взаимодействие водного потока и подводных трубопроводных переходов

Дмитрий Юрьевич Шерстнёв¹, Илья Артемьевич Брянский²,
Юлия Вадимовна Брянская¹

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

² *Ленгипроречтранс; г. Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день трубопроводный транспорт является важным, высокоэффективным и перспективным видом транспорта для доставки воды, газа, нефти и др. При прокладке трубопроводов зачастую возникает необходимость в преодолении водных преград. Это производится методами наклонного бурения, сооружения траншейного или поверхностного перехода, прокладкой по дну водотока. Прокладка трубопроводов по дну русла не закреплена нормативно, однако на практике достаточно часто используется. Основную опасность при взаимодействии потока и русла представляют размывы дна вблизи сооружения. При проектировании решение многих инженерных задач связано с расчетом распределения скоростей и оценкой создаваемых гидравлических сопротивлений. Величина гидравлических сопротивлений зависит от положения трубопроводного перехода к набегающему потоку.

Материалы и методы. Для определения величины коэффициентов гидродинамического сопротивления и подъемной силы выполнялись экспериментальные исследования моделей трубопроводных переходов в аэродинамической трубе.

Результаты. В ходе экспериментов измерялись тензометрическими весами составляющие силы воздействия потока на трубопроводный переход при различных числах Рейнольдса, с использованием которых были рассчитаны значения коэффициентов гидродинамического сопротивления и подъемной силы для трубопровода, лежащего на экране под различными углами к набегающему потоку, заглубленного в дно на 1/2 и 1/3 диаметра, а также защищенного гибкими бетонными матами.

Выводы. Наименьшие значения коэффициентов гидродинамического сопротивления и подъемной силы получены для трубопровода с заглублением на половину диаметра, проложенного перпендикулярно по отношению к направлению потока. При прокладке трубопроводов без заглубления оптимальной является пригрузка бетонными матами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трубопроводный переход, коэффициент гидродинамического сопротивления, коэффициент подъемной силы, обтекание трубопровода, турбулентный поток, защитные покрытия, гидравлические сопротивления

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шерстнёв Д.Ю., Брянский И.А., Брянская Ю.В. Взаимодействие водного потока и подводных трубопроводных переходов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 447–454. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.447-454

Автор, ответственный за переписку: Юлия Вадимовна Брянская, mgsu-hydraulic@yandex.ru.

Features of laying underwater pipeline crossings

Dmitry Yu. Sherstnev¹, Ilya A. Bryansky², Yuliya V. Bryanskaya¹

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

² *Lengiprorchtrans; St. Petersburg, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. To date, pipeline transport is an important, highly efficient and promising method of transporting water, gas, oil, etc. It is often necessary to overcome water barriers in the course of laying pipelines. At the design stage, many engineering problems can be solved by analyzing the velocity distribution and evaluating hydraulic resistances. The value of hydraulic resistances depends on the position of the pipeline crossing relative to the incoming flow.

Materials and methods. Experimental studies of models of pipeline crossings in a wind tunnel were conducted to determine the values of coefficients of hydrodynamic resistance and the lifting force.

Results. During the experiments, components of the flow force, acting on the pipeline crossing, were measured using the strain gauge balance at different Reynolds numbers applied to find values of coefficients of hydrodynamic resistance and the lifting force for a pipeline lying on a screen at different angles to the incoming flow. 1/2 and 1/3 of the pipeline diameter was buried in the riverbed and safeguarded by flexible concrete mats.

Conclusions. The lowest values of coefficients of hydrodynamic resistance and the lifting force were obtained for a pipeline with 1/2 of the pipeline diameter buried in the riverbed and laid perpendicularly to the flow direction. Concrete mats are the optimal loading for non-buried pipelines.

KEYWORDS: pipeline crossing, coefficient of hydrodynamic resistance, coefficient of the lifting force, pipeline flow, turbulent flow, protective coatings, hydraulic resistances

FOR CITATION: Sherstnev D.Yu., Bryansky I.A., Bryanskaya Yu.V. Features of laying underwater pipeline crossings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):447-454. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.447-454 (rus.).

Corresponding author: Yuliya V. Bryanskaya, mgsu-hydraulic@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Магистральные трубопроводы (МТ) являются одним из наиболее эффективных видов транспорта для доставки нефти, газа, воды, серы, угля и других продуктов на большие расстояния. Ввиду своей эффективности МТ очень важны для экономики Российской Федерации. За 2021 г., по данным Федеральной таможенной службы России, экспорт сырой нефти составил 267,467 млн т на 121,444 млрд долл. США и нефтепродуктов 142,802 млн т на 66,887 млрд долл. США. Большая часть объемов экспортируемых за рубеж углеводородов поставляется именно по трубопроводам (табл. 1).

На текущий момент строительство и эксплуатацию МТ регулируют следующие государственные нормативные документы:

• СТО ГУ ГТИ 08.29–2009 «Учет руслового процесса на участках подводных переходов трубопроводов через реки»¹;

• СП 47.13330.2011 «Инженерные изыскания для строительства магистральных трубопроводов»;

• СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы».

Трубопроводы на своем пути пересекают различные водные преграды, в подавляющем большинстве случаев с турбулентным водным потоком. Подобные преграды преодолеваются различными способами, такими как — сооружение поверхностного перехода, переход методом наклонного бурения, траншейный переход и подводный пере-

¹ СТО ГУ ГТИ 08.29–2009. Учет руслового процесса на участках подводных переходов трубопроводов через реки. СПб. : Нестор-История, 2009. 184 с.

Табл. 1. Крупнейшие трубопроводы России

Table 1. The largest pipelines in Russia

Крупнейшие трубопроводы России Russia's largest pipelines	Диаметр, мм Diameter, mm	Длина, км Length, km	Год постройки Year of construction
Туймазы – Омск – Красноярск – Иркутск Tuimazy – Omsk – Krasnoyarsk – Irkutsk	720	3662	1964
Дружба / Friendship	529–1020	8900	1981
Усть-Балык – Омск / Ust-Balyk – Omsk	1020	964	1967
Узень – Атырау – Самара / Uzen – Atyrau – Samara	1020	1750	1971
Усть-Балык – Курган – Уфа – Альметьевск Ust-Balyk – Kurgan – Ufa – Almet'yevsk	1220	2119	1973
Уса – Ухта – Ярославль – Москва Usa – Ukhta – Yaroslavl – Moscow	720	1853	1975
Нижневартовск – Курган – Самара Nizhnevartovsk – Kurgan – Samara	1220	2150	1976
Самара – Тихорец – Новороссийск Samara – Tikhorets – Novorossiysk	1220	1522	1979
Сургут – Нижний Новгород – Полоцк Surgut – Nizhny Novgorod – Polotsk	1020	3250	1981
Ямал – Европа / Yamal – Europe	1420	2000	1999
Тенгиз – Новороссийск / Tengiz – Novorossiysk	720	1580	2001
Балтийская трубопроводная система / Baltic Pipeline System	1067	1300	2012
Северный поток / Nord Stream	1220	1224	2012
Северный поток – 2 / Nord Stream – 2	1220	1200	2021

ход по дну водотока [1]. Последний способ прокладки не закреплен государственными нормами. К примеру, в руководстве Государственного гидрологического института «Учет руслового процесса на участках подводных переходов трубопроводов через реки»¹ не рассматривается прокладка по дну русла. Однако такие переходы прокладываются достаточно часто и имеют особенности, которые стоит учитывать ввиду важности магистрального трубопроводного транспорта и его высокой опасности в случае аварий для экологии, дороговизны и сложности ремонта. Согласно данным статистики, аварии в зоне прокладки подводных переходов происходят более чем в пять раз чаще по сравнению с сухопутными участками вблизи переходов [2, 3]. Случаются подобные аварии во многом из-за несовершенных методик расчета турбулентного потока и выбора неоптимальной схемы прокладки трубопровода [4].

Особенности взаимодействия трубопроводных переходов с водной средой исследовались как отечественными [5–9], так и зарубежными авторами [10–20]. Чаще всего предметом изучения становятся трубопроводные переходы, проложенные по дну морей. Таким образом, основным фактором, воздействующим на трубопровод, являются волны. Главная опасность при взаимодействии потока и трубопроводного перехода — размывы дна основания вблизи сооружения, что может привести к аварии.

Многие трубопроводы прокладываются в несколько ниток — одна, две, три, четыре и т.д. Например, газопровод «Северный поток – 1» (две нитки) имеет протяженность 1224 км, газопровод «Запад – Восток» (четыре нитки) — 733 км, газо-

провод «Теннесси» (пять ниток) — 3300 км^{2,3,4}. При параллельной прокладке нескольких трубопроводов в едином техническом коридоре между нитками выдерживается безопасное расстояние от 5 до 100 м. Подобная прокладка при подводном переходе через водоток вносит значительные изменения в характеристики потока и отличается от однопутной.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Турбулентный водный поток при взаимодействии с трубопроводом, проложенным по дну, может привести к размыву дна основания трубопровода, воздействию на трубопровод подъемной силы, что способствует всплыванию и разрыву трубопровода, значительному экологическому и экономическому ущербу. Хотя в некоторых статьях рассматривается процесс самозакапывания трубопровода после размыва [21], размыва основания под трубопроводным переходом желательно избегать.

В соответствии со статистическими данными, наиболее частыми причинами аварий являются воздействие внешней среды и ошибки монтажа (рис. 1) [22]. Также стоит отметить, что прокладка в траншее не дает гарантии отсутствия аварий на переходе через реки. За последнее время во мно-

² Газпром. URL: <https://www.gazprom.ru/projects/nord-stream/>

³ Шевченко А. Китай строит новый участок 3-й нитки газопровода Запад – Восток // Neftegaz.RU. URL: <https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/698251-kitay-nachalstroitelstvo-novogo-uchastka-gazoprovoda-zapad-vostok/>

⁴ Трофименко А. Самые длинные газопроводы в мире // БКС Экспресс. URL: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/samye-dlinnye-gazoprovody-v-mire?ysclid=lbe02rfy4o280267357>

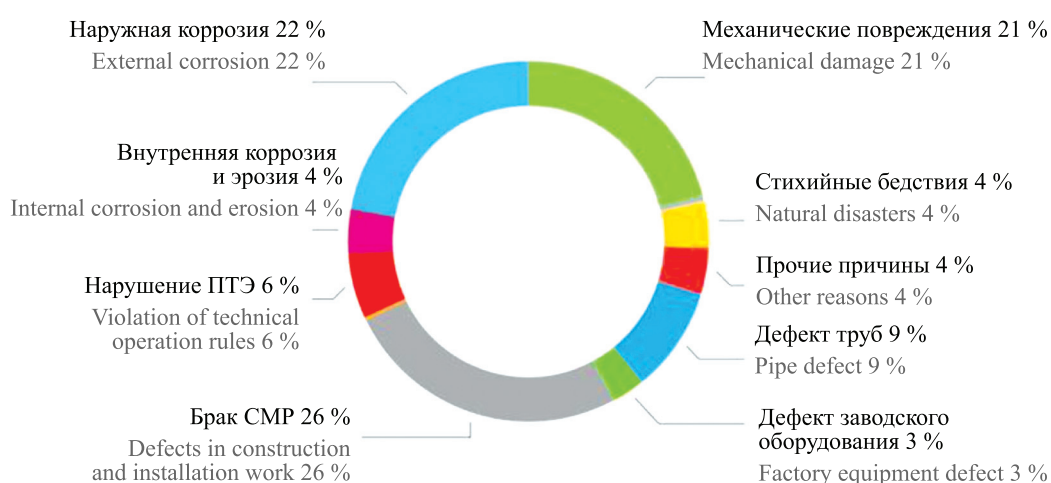


Рис. 1. Распределение причин, обуславливающих возникающие на магистральных газопроводах аварийные ситуации (согласно информации Ростехнадзора, 2005–2013 гг.)

Fig. 1. Breakdown of causes of emergency situations arising at the gas mains (according to the information provided by Rostekhnadzor, 2005–2013)

гих предгорных и горных районах участки труб, проложенных в траншеях, оголились вследствие общей и боковой эрозии [23].

В качестве примера подобных аварий можно привести прорыв подводного трубопровода компании ExxonMobil в Нигерии в дельте р. Нигер. В результате аварии в Атлантический океан попало 14 тыс. т нефти, вода покрылась черной нефтяной пленкой на 200 км вдоль берегов штата Аква-Ибом (рис. 2). Недавно в марте 2021 г. произошла авария на подводном участке трубопровода компании «Сибур» на р. Обь, неподалеку от г. Нижневартовска с пропуском широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ или пропан-бутана, который используется в быту и как газомоторное топливо) с последующим кратковременным возгоранием (рис. 3).



Рис. 2. Авария на подводном трубопроводе компании ExxonMobil, Нигерия. Прорыв трубопровода в дельте р. Нигер (1998 г.)

Fig. 2. An accident at the underwater pipeline operated by ExxonMobil, Nigeria. Pipeline breakthrough in the estuary of the Niger River (1998)



Рис. 3. Авария на трубопроводе компании «Сибур», р. Обь, неподалеку от г. Нижневартовска (6 марта 2021 г.)

Fig. 3. An accident at the Sibur pipeline. The Ob River, near Nizhnevartovsk. March 6, 2021

Методы снижения аварийности МТ

Ввиду высокой аварийности подводных переходов применяются различные методы по защите трубопроводов от воздействия турбулентного потока. К подобным методам относятся заглубление трубопровода в грунтовое основание водотока, защита гибкими бетонными матами и т.д. [24, 25]. В каждом случае есть свои особенности взаимодействия потока и трубопровода. Например, при защите универсальными гибкими защитными бетонными матами (УГЗБМ) есть вероятность подъема потоком первых рядов мата и последующего заворачивания защитного покрытия (рис. 4), что приводит к изменению гидравлических характеристик потока в зоне перехода и может способствовать аварийной ситуации [26]. Также использование защитных покрытий в виде матов и габионов создает искусственный пережат на реке, который способствует размыву дна на прилегающих участках.

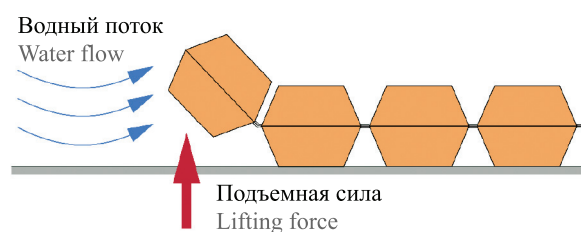


Рис. 4. Схема заворачивания мата водным потоком

Fig. 4. Mat wrapping by the water flow.

Для того чтобы расчетными методами прогнозировать поведение того или иного вида компоновки подводного перехода через водоток, необходимо знать коэффициенты гидродинамического сопротивления C_D и подъемной силы C_L , распределение скоростей вдоль трубопровода, значения размывающих скоростей для грунтов основания. Коэффициенты гидродинамического сопротивления и подъемной силы можно определить по следующим зависимостям:

$$C_D = \frac{2F_x}{\omega_x \rho V^2}, \quad (1)$$

$$C_L = \frac{2F_z}{\omega_z \rho V^2}, \quad (2)$$

где F_x — продольная составляющая силы давления; ω_x — площадь миделевого сечения; ρ — плотность жидкости; V — скорость потока на подходе к препятствию; F_z — вертикальная составляющая силы давления.

Наиболее надежным методом определения коэффициентов сопротивлений является эмпирический. Подобные исследования проводились Д.В. Штеренлихтом [27], В.С. Боровковым [28] и другими авторами [29]. Однако для каждой компоновки трубопроводного перехода подобные значения будут уникальными. На текущий момент не суще-

Табл. 2. Значения коэффициентов гидродинамического сопротивления и подъемной силы при различных числах Re
Table 2. Values of hydrodynamic resistance and lifting force coefficients at different Re numbers

Способ прокладки трубопровода Pipeline laying method	Re = $1,4 \cdot 10^5$		Re = $2,2 \cdot 10^5$		Re = $3,2 \cdot 10^5$		Re = $4,0 \cdot 10^5$	
	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L
90°	1,180	–1,100	1,290	0,200	1,130	0,900	1,000	1,650
30°	–	–	0,560	1,180	0,245	0,590	0,220	0,390
45°	–	–	0,810	0,300	0,345	0,160	0,260	0,110
1/2	0,150	0,004	0,080	0,004	0,055	0,003	0,048	0,002
1/3	–	–	0,620	0,910	0,330	0,660	0,190	0,470
Маты / Mats	0,200	0,700	0,250	0,600	0,240	0,165	0,270	0,010

ствует комплексных эмпирических исследований для участков подводных переходов через водотоки многониточных МТ и их еще требуется провести.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате экспериментов на дозвуковой аэродинамической трубе установлены значения коэффициентов гидродинамического сопротивления и подъемной силы при различных числах Рейнольдса для одиночного трубопровода, проложенного под различными углами по отношению к набегающему потоку, заглубленному на половину и треть диаметра в дно основания русла, а также защищенному гибкими бетонными матами типа УГЗБМ. При проведении исследований измерялись значения составляющих силы воздействия потока на модель трубопроводного перехода с помощью тензометрических весов. Затем по формулам (1) и (2) рассчитывались коэффициенты гидродинамического сопротивления и подъемной силы. Значения полученных коэффициентов приведены в табл. 2.

Как видно из полученных результатов, наибольшей устойчивостью к всплыванию и наименьшим сопротивлением обладают трубопроводы, заглубленные на половину диаметра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты выполненных экспериментальных исследований показали, что наименьшие значения коэффициента гидродинамического сопротивления и подъемной силы получены для трубопровода с заглублением на половину диаметра. Из способов прокладки трубопроводных переходов без заглубления наиболее оптимальной является пригрузка трубопровода бетонными матами. При отсутствии возможности использования матов прокладка трубопровода под углом 45° по отношению к направлению движения воды также уменьшит степень воздействия потока на подводный переход на 65 %. При прокладке трубопровода под углом к набегающему потоку возникают вихревые течения вдоль трубы, которые также могут способствовать размывам и требуют более пристального изучения. Остаются открытыми и вопросы по изменению коэффициентов гидродинамического сопротивления и подъемной силы при прокладке двух и более ниток трубопровода, и воздействию потока на русло с трубопроводным переходом, т.е. устойчивости сооружения к размывам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ryltseva Yu. Design and construction of underwater pipelines crossings // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 04006. DOI: 10.1051/e3s-conf/202126304006
2. Брянский И.А., Боровков В.С. Гидравлические характеристики турбулентного потока при обтекании препятствий // Гидротехническое строительство. 2020. № 2. С. 37–41.
3. Дейнеко С.В. Обеспечение надежности систем трубопроводного транспорта нефти и газа. М. : Техника, 2011. 176 с.
4. Дебольский В.К. Аварии подводных нефте- и газопроводов, и их последствия для водных объектов // Защита населения и территорий при чрезвычайных

ситуациях в мирное и военное время как составная часть национальной безопасности России : Вторая всерос. науч.-практ. конф. 1997. С. 234–235.

5. Эван Эхов Б.Г. К вопросу обеспечения надежности трубопроводов при строительстве переходов методом наклонно-направленного бурения // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. № 4 (138). С. 113–122. DOI: 10.17122/ntj-oil-2022-4-113-122

6. Шарнина Г.С., Абкадыров И.А. Строительство магистральных трубопроводов в российских болотах // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2019. № 12 (96). С. 98–100.

7. Шарнина Г.С., Абкадыров И.А. Адаптирование технологии сооружения магистральных трубопроводов Pipe Express к условиям болотистой местности России // Современные технологии в нефтегазовом деле — 2019 : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. в 2 т. 2019. С. 389–392.
8. Дегтярев В.В., Шлычков В.А. Лабораторное и теоретическое исследование динамики размыва речного дна вблизи подводного перехода // Гидротехническое строительство. 2013. № 8. С. 21–27.
9. Рыльцева Ю.А. Современные способы и средства диагностики и ремонта подводных переходов трубопроводов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 9. С. 1236–1263. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1236-1263
10. Azamathulla H.Md., Zakaria N.A. Prediction of scour below submerged pipeline crossing a river using ANN // Water Science and Technology. 2011. Vol. 63. Issue 10. Pp. 2225–2230. DOI: 10.2166/wst.2011.459
11. Azamathulla H.Md., Yusoff M.A.M., Hasan Z.A. Scour below submerged skewed pipeline // Journal of Hydrology. 2014. Vol. 509. Pp. 615–620. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.058
12. Parsaie A., Haghiabi A.H., Moradinejad A. Prediction of scour depth below river pipeline using support vector machine // KSCE Journal of Civil Engineering. 2019. Vol. 23. Issue 6. Pp. 2503–2513. DOI: 10.1007/s12205-019-1327-0
13. Myrhaug D., Ong M.C., Føien H., Gjengedal C., Leira B.J. Scour below pipelines and around vertical piles due to second-order random waves plus a current // Ocean Engineering. 2009. Vol. 36. Issue 8. Pp. 605–616. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.02.007
14. Sumer B.M., Jensen H.R., Mao Y., Fredsøe J. Effect of lee-wake on scour below pipelines in current // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 1988. Vol. 114. Issue 5. Pp. 599–614. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(1988)114:5(599)
15. Dey S., Singh N.P. Clear-water scour depth below underwater pipelines // Journal of Hydro-Environment Research. 2007. Vol. 1. Issue 2. Pp. 157–162. DOI: 10.1016/j.jher.2007.07.001
16. Myrhaug D., Ong M.C., Gjengedal C. Scour below marine pipelines in shoaling conditions for random waves // Coastal Engineering. 2008. Vol. 55. Issue 12. Pp. 1219–1223. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2008.03.006
17. Zhang Q., Draper S., Cheng L., An H. Effect of limited sediment supply on sedimentation and the onset of tunnel scour below subsea pipelines // Coastal Engineering. 2016. Vol. 116. Pp. 103–117. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.05.010
18. Dong H., Huang P., Sun Z., Li Z., Chong L. Numerical simulation of local scour and flow field around pipelines // Journal of Coastal Research. 2020. Vol. 111. Issue sp1. DOI: 10.2112/JCR-SI111-049.1
19. Damroudi M., Esmaili K., Rajaei S.H. Effect of pipeline external geometry on local scour and self-burial time scales in current // Journal of Applied Fluid Mechanics. 2021. Vol. 14. Issue 01. DOI: 10.47176/jafm.14.01.31399
20. Zhu Y., Xie L., Su T.C. Scour protection effects of a geotextile mattress with floating plate on a pipeline // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 8. P. 3482. DOI: 10.3390/su12083482
21. Sumer B.M., Fredsøe J. Scour below pipelines in waves // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 1990. Vol. 116. Issue 3. Pp. 307–323. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(1990)116:3(307)
22. Лисанов М.В., Савина А.В., Дегтярев Д.В., Самусева Е.А. Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта // Безопасность труда в промышленности. 2010. № 7. С. 16–22.
23. Габитов И.А., Джамалов А.Т., Алиев Э.Г. Оценка риска выхода из строя газопроводов на подводных переходах // Инновационные технологии в науке и образовании : VI Междунар. науч.-практ. конф. в 2 ч. Ч. 1. 2017. С. 27–32.
24. Медведев С.С., Мартынова Н.Б., Иванов И.А., Ермолаев А.С. Применение габионных конструкций для защиты подводных переходов трубопроводов // Наука и техника в газовой промышленности. 2007. № 3 (30). С. 90–93.
25. Зыков М.А., Иванов В.А. Методы защиты и берегоукрепления подводных переходов магистральных трубопроводов // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 12–1. С. 29–33.
26. Bryansky I.A., Bryanskaya Yu.V., Yumasheva M.A. Hydraulic characteristics of the water flow under the conditions of stationary inward flow over pipelines with protection coating // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Issue 1. P. 012128. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012128
27. Штеренлихт Д.В. Взаимодействие набегающего потока и трубопроводов на переходах через реки : дис. ... д-ра тех. наук. М., 1970. 459 с.
28. Богомолов А.И., Боровков В.С., Майрановский Ф.Г. Высокоскоростные потоки со свободной поверхностью : учеб. пособие. М. : Стройиздат, 1979. 344 с.
29. Боровков В.С., Брянский И.А., Юмашева М.А. Особенности поперечного обтекания водным потоком тел различной формы при наличии экрана // Научное обозрение. 2017. № 6. С. 27–32.

Поступила в редакцию 13 декабря 2022 г.

Принята в доработанном виде 6 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Дмитрий Юрьевич Шерстнёв** — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1036902; sherstnevdmirii@yandex.ru;

Илья Артемьевич Брянский — кандидат технических наук, ведущий инженер; **Ленгипроречтранс;** 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 29, литер А; РИНЦ ID: 981795, Scopus: 57204360762; bryansky.ilya@gmail.com;

Юлия Вадимовна Брянская — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 280769, Scopus: 6505953432, ResearcherID: AAE-7741-2020, ORCID: 0000-0002-6233-3690; mgsu-hydraulic@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ryltseva Yu. Design and construction of underwater pipelines crossings. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:04006. DOI: 10.1051/e3sconf/202126304006
2. Bryansky I.A., Borovkov V.S. Hydraulic characteristics of the turbulence flow in the pipe crossings. *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*. 2020; 2:37-41. (rus.).
3. Dejneco S.V. *Ensuring the reliability of oil and gas pipeline transport systems*. Moscow, Tekhnika, 2011; 176. (rus.).
4. Debol'skij V.K. Accidents of underwater oil and gas pipelines and their consequences for water bodies. *Protection of the population and territories in emergency situations in peacetime and wartime as an integral part of the national security of Russia : the second All-Russian scientific and practical conference*. 1997; 234-235. (rus.).
5. Evan Ekho B.G. On the issue of ensuring the reliability of pipelines during the construction of crossings by directional drilling. *Problems of collection, preparation and transportation of oil and petroleum products*. 2022; 4(138):113-122. DOI: 10.17122/ntj-oil-2022-4-113-122 (rus.).
6. Sharnina G.S., Abkadyrov I.A. Construction of trunk pipelines in Russian marshes. *Business magazine Neftegaz.RU*. 2019; 12(96):98-100. (rus.).
7. Sharnina G.S., Abkadyrov I.A. Adapting the technology of the structure of Pipe Express main pipelines to the conditions of Russia's bottom areas. *Modern technologies in the oil and gas business — 2019 : a collection of proceedings of the international scientific and technical conference in 2 volumes*. 2019; 389-392. (rus.).
8. Degtyarev V.V., Shlychkov V.A. Laboratory and theoretical study of the dynamics of erosion of the river bottom near the underwater crossing. *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*. 2013; 8:21-27. (rus.).
9. Ryltseva Yu.A. The modern methods and means of diagnostics and repair of underwater crossings of the pipelines. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(9):1236-1263. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1236-1263 (rus.).
10. Azamathulla H.Md., Zakaria N.A. Prediction of scour below submerged pipeline crossing a river using ANN. *Water Science and Technology*. 2011; 63(10):2225-2230. DOI: 10.2166/wst.2011.459
11. Azamathulla H.Md., Yusoff M.A.M., Hasan Z.A. Scour below submerged skewed pipeline. *Journal of Hydrology*. 2014; 509:615-620. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.058
12. Parsaie A., Haghiabi A.H., Moradinejad A. Prediction of scour depth below river pipeline using support vector machine. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019; 23(6):2503-2513. DOI: 10.1007/s12205-019-1327-0
13. Myrhaug D., Ong M.C., Føien H., Gjengedal C., Leira B.J. Scour below pipelines and around vertical piles due to second-order random waves plus a current. *Ocean Engineering*. 2009; 36(8):605-616. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.02.007
14. Sumer B.M., Jensen H.R., Mao Y., Fredsøe J. Effect of lee-wake on scour below pipelines in current. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 1988; 114(5):599-614. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(1988)114:5(599)
15. Dey S., Singh N.P. Clear-water scour depth below underwater pipelines. *Journal of Hydro-Environment Research*. 2007; 1(2):157-162. DOI: 10.1016/j.jher.2007.07.001
16. Myrhaug D., Ong M.C., Gjengedal C. Scour below marine pipelines in shoaling conditions for random waves. *Coastal Engineering*. 2008; 55(12):1219-1223. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2008.03.006
17. Zhang Q., Draper S., Cheng L., An H. Effect of limited sediment supply on sedimentation and the onset of tunnel scour below subsea pipelines. *Coastal Engineering*. 2016; 116:103-117. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.05.010
18. Dong H., Huang P., Sun Z., Li Z., Chong L. Numerical simulation of local scour and flow field

around pipelines. *Journal of Coastal Research*. 2020; 111(sp1). DOI: 10.2112/JCR-SI111-049.1

19. Damroudi M., Esmaili K., Rajaei S.H. Effect of pipeline external geometry on local scour and self-burial time scales in current. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2021; 14(01). DOI: 10.47176/jafm.14.01.31399

20. Zhu Y., Xie L., Su T.C. Scour protection effects of a geotextile mattress with floating plate on a pipeline. *Sustainability*. 2020; 12(8):3482. DOI: 10.3390/su12083482

21. Sumer B.M., Fredsoe J. Scour below pipelines in waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 1990; 116(3):307-323. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(1990)116:3(307)

22. Lisanov M.V., Savina A.V., Degtyarev D.V., Samuseva E.A. Analysis of Russian and foreign data on accidents at pipeline transport facilities. *Occupational Safety in Industry*. 2010; 7:16-22. (rus.).

23. Gabibov I.A., Dzhamaalov A.T., Aliev E.G. Assessment of the risk of failure of gas pipelines at underwater crossings. *Innovative technologies in science and education : VI international scientific and practical conference in 2 hours. Part 1*. 2017; 27-32. (rus.).

24. Medvedev S.S., Martynova N.B., Ivanov I.A., Ermolaev A.S. Application of gabion structures for protection of underwater pipeline crossings. *Science and Technology in the Gas Industry*. 2007; 3(30):90-93. (rus.).

25. Zykov M.A., Ivanov V.A. Methods of protection and bank revetment of trunk pipeline's underwater lines. *Modern High Technologies*. 2015; 12-1:29-33. (rus.).

26. Bryansky I.A., Bryanskaya Yu.V., Yumasheva M.A. Hydraulic characteristics of the water flow under the conditions of stationary inward flow over pipelines with protection coating. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012128. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012128

27. Shterenlicht D.V. *Interaction of the oncoming flow and pipelines at river crossings : dis. ... dr. tech. sciences*. Moscow, 1970; 459. (rus.).

28. Bogomolov A.I., Borovkov V.S., Mairanovsky F.G. *High-speed flows with a free surface : textbook*. Moscow, Stroyizdat, 1979; 344. (rus.).

29. Borovkov V.S., Bryansky I.A., Yumasheva M.A. Features of water cross-flow of different shaped bodies in presence of a screen. *Scientific Review*. 2017; 6:27-32. (rus.).

Received December 13, 2022.

Adopted in revised form on February 6, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

BIONOTES: **Dmitry Yu. Sherstnev** — postgraduate student 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; ID RSCI: 1036902; sherstnevdmittii@yandex.ru;

Ilya A. Bryansky — Candidate of Technical Sciences, lead engineer; **Lengipromrechtrans**; letter A, 29 Ivan Chernykh st., St. Petersburg, 198095, Russian Federation; ID RSCI: 981795, Scopus: 57204360762; bryansky.ilya@gmail.com;

Yuliya V. Bryanskaya — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, 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; ID RSCI: 280769, Scopus: 6505953432, ResearcherID: AAE-7741-2020, ORCID: 0000-0002-6233-3690; mgsu-hydraulic@yandex.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Обеспечение требуемого воздухообмена в помещениях при использовании компактных регенеративных теплоутилизаторов

Николай Николаевич Монаркин

Вологодский государственный университет (ВоГУ); г. Вологда, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В гражданских зданиях существуют проблемы вентиляции, связанные с нарушением требуемого воздухообмена и высокими потерями теплоты. Одним из решений таких проблем является применение децентрализованных компактных вентиляционных устройств с функцией утилизации теплоты вытяжного воздуха. К данным устройствам относятся стационарные переключающиеся регенеративные теплоутилизаторы (СПРТ). Они дают высокую степень энергосбережения при небольших расходах воздуха. Однако требуемый воздухообмен даже на одного человека может быть значительным. Проведено исследование по определению значений коэффициента энергетической эффективности теплоутилизатора для диапазона характерных расходов воздуха.

Материалы и методы. Выполнен анализ нормативных источников и научных работ, посвященных установлению необходимого воздухообмена для человека в помещениях. Воздухообмен в основном определен через рекомендованный уровень концентрации углекислого газа в помещении. Коэффициент энергетической эффективности СПРТ рассчитан с помощью математического моделирования процесса теплообмена в единичном канале регенеративной насадки.

Результаты. Приведены значения коэффициента энергетической эффективности СПРТ для широкого диапазона расходов воздуха. Показано снижение эффективности при повышении расхода воздуха через СПРТ, уменьшении длины насадки и повышении диаметра единичного канала. Даны рекомендации по конструкции регенеративной насадки, обеспечивающей высокую экономию тепловой энергии при значительных расходах воздуха через СПРТ.

Выводы. Учитывая широкий диапазон значений требуемого количества воздуха на одного человека, рекомендовано применение регулирования производительности СПРТ. Представленные результаты исследования могут быть использованы при модернизации существующих СПРТ и разработке новых конфигураций насадок для подобных теплоутилизаторов. Выявлено, что для оценки уровня генерируемого шума СПРТ, а также определения оптимальной конструкции насадки, снижающей риск закупоривания каналов, следует провести экспериментальные исследования для предложенных конфигураций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СПРТ, теплоутилизатор, регенеративная насадка, рекуперация, норма воздухообмена, углекислый газ, коэффициент энергетической эффективности

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00080 (URL: <https://rscf.ru/project/22-79-00080/>). Автор выражает благодарность анонимным рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Монаркин Н.Н. Обеспечение требуемого воздухообмена в помещениях при использовании компактных регенеративных теплоутилизаторов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 455–462. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.455-462

Автор, ответственный за переписку: Николай Николаевич Монаркин, nikolay-monarkin@yandex.ru.

Maintenance of the required indoor air exchange rate by using compact regenerative heat exchangers

Nikolay N. Monarkin

Vologda State University (VSU); Vologda, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Ventilation systems of civil buildings experience problems of air exchange interruption and high heat losses. A solution to this problem is the use of compact decentralized ventilation units with the function of heat recovery from exhaust air. They are called stationary switching regenerative heat exchangers (SSRHEs). SSRHEs ensure high energy saving at low air flow rates. However, the required air exchange rate can be substantial even for one person. Therefore, a study was conducted to determine values of the energy efficiency coefficient of SSRHEs for the range of characteristic air flow rates.

Materials and methods. The analysis of regulations and research papers, focused on determining the indoor air exchange required for one person was conducted. The air exchange rate is mainly determined through the recommended level of carbon dioxide concentration in a room. The energy efficiency coefficient of SSRHEs is determined by means of mathematical modeling of the heat exchange process in a single channel of a regenerative nozzle.

Results. Values of the energy efficiency coefficient of SSRHEs are provided for a wide range of air flow rates. Efficiency reduction, accompanied by an increase in the rate of the air flow through the SSRHE, as well as a decrease in the nozzle length and an increase in the diameter of a single channel are shown. Recommendations are provided on the design of a regenerative nozzle that ensures extensive thermal energy savings at high air flow rates through the SSRHEs.

Conclusions. Taking into account a wide range of values of the amount of air required per person, SSRHE capacity control is recommended. Research results can be used to modernize existing devices and develop new configurations of nozzles for such SSRHEs. The authors have found that experimental studies of the proposed configurations are needed to evaluate the level of noise generated by SSRHEs and the optimal nozzle design mitigating the risk of clogging.

KEYWORDS: SSRHE, heat exchanger, regenerative nozzle, recuperation, standard air exchange rate, carbon dioxide, energy efficiency coefficient

Acknowledgements. The research was funded from the proceeds of a grant issued by the Russian Science Foundation No. 22-79-00080 (URL: <https://rscf.ru/project/22-79-00080/>). The author expresses gratitude to anonymous reviewers.

FOR CITATION: Monarkin N.N. Maintenance of the required indoor air exchange rate by using compact regenerative heat exchangers. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):455-462. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.455-462 (rus.).

Corresponding author: Nikolay N. Monarkin, nikolay-monarkin@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В гражданских зданиях человек находится большую часть жизни, поэтому качество воздушной среды в помещениях таких зданий — важный фактор. По данным авторов работы [1], уровни загрязняющих веществ в помещениях могут быть в 100 раз выше, чем те же уровни на улице, и входят в пять основных экологических рисков для населения. Главный способ создания допустимого уровня качества воздуха в помещении — применение систем вентиляции, обеспечивающих требуемый воздухообмен, как правило, при минимальной обработке воздуха. Ключевым мероприятием по обработке выступает нагрев наружного воздуха в холодный период года. В северных регионах России и мира проблему обеспечения необходимых параметров микроклимата в помещениях тесно сопровождает проблема высоких тепловых затрат на вентиляцию, которые главным образом состоят из затрат на нагрев наружного воздуха и потерь теплоты с вентиляционными выбросами [2].

Для решения указанных проблем применяются системы вентиляции с рекуперацией тепловой энергии [3]. При этом использование рекуперации возможно только в механических системах ввиду высокого аэродинамического сопротивления теплообменными аппаратами.

Альтернативой громоздким протяженным и разветвленным центральным системам могут быть компактные децентрализованные вентиляционные устройства с функцией утилизации теплоты вытяжного воздуха. Наиболее энергетически совершенными являются устройства на базе регенеративного теплообменника, которые называют стационарными переключающимися регенеративными теплоутилизаторами (СПРТ) [4, 5]. Их существенный недостаток — возможность подмешивания вытяжного воздуха в приточный, что накладывает определенные ограничения. СПРТ устанавливаются в наружное ограждение здания (рис. 1). В них основным теплопередающим элементом служит

регенеративная насадка, представляющая собой цилиндр, пронизанный множеством мелких каналов для прохода воздуха (рис. 2). Прибор работает циклично, попеременно. На этапе вытяжки насадка нагревается теплым внутренним воздухом помещения, на этапе притока — наружный воздух нагревается от насадки.

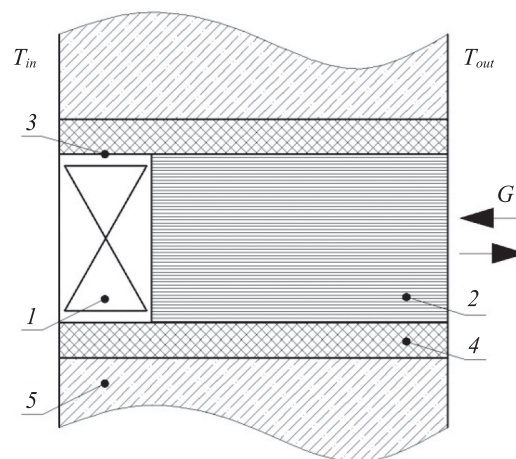


Рис. 1. Принципиальная схема СПРТ: 1 — реверсивный вентилятор; 2 — регенеративная насадка; 3 — корпус; 4 — теплоизоляция; 5 — наружная стена

Fig. 1. Schematic diagram of SSRHE: 1 — reversible fan; 2 — regenerative nozzle; 3 — case; 4 — thermal insulation; 5 — external wall

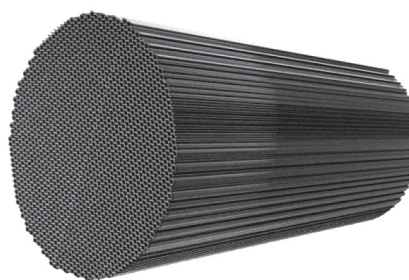


Рис. 2. Регенеративная насадка
Fig. 2. Regenerative nozzle

СПРТ способны возвращать в помещение свыше 90 % теплоты, теряемой с вытяжным воздухом. Устройства характеризуются низкой производительностью в режиме рекуперации, примерно до 100 м³/ч. Известно, что чем больше расход воздуха через СПРТ, тем ниже его энергетическая эффективность. При этом максимальный эффект от рекуперации возможен при производительности 30–50 м³/ч. Из-за разности плотностей внутреннего и наружного воздуха может наблюдаться дисбаланс между количеством приточного и вытяжного воздуха, что также снижает показатель энергосбережения [6].

Таким образом, важно проверить, отвечает ли нормативным требованиям и рекомендациям производительность компактных вентиляционных устройств типа СПРТ. Кроме того, следует определить, какое количество теплоты можно экономить при достаточном воздухообмене при использовании СПРТ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определение требуемой производительности СПРТ

Учитывая, что СПРТ характеризуются низкой производительностью воздуха, логично предположить, что их задача — это создание воздухообмена для одного-двух человек.

Для определения требуемой производительности вентиляции возможно обратиться к нормативным документам. Однако нормативы не всегда могут дать однозначный ответ по достаточному значению воздухообмена в конкретном помещении. Расчет воздухообмена по нормируемой кратности — самый простой метод, однако, задача нахождения нормы приточного воздуха неоднозначная. Сложность, помимо прочего, заключается в том, что в существующих нормативах даны значения нормируемой кратности воздухообмена не для всех помещений, характерных для рассматриваемого типа здания [7]. К тому же для некоторых помещений воздухообмен предписывается определять расчетом (СП 44.13330.2011¹).

Согласно СП 60.13330.2020² норма подачи наружного воздуха на одного человека, находящегося в помещении более двух часов непрерывно, составляет 40 и 60 м³/ч для помещений общественных и административно-бытовых зданий и 30 и 45 м³/ч для жилых помещений с естественным проветриванием и без него соответственно.

В стандартах Ассоциации американских инженеров норма воздухообмена на одного человека для общественных зданий составляет порядка

9–18 м³/ч (5–10 л/с) в соответствии с ASHRAE ANSI/ASHRAE Standard 62.1–2022³. Для жилых зданий необходимое количество воздуха определяется в зависимости от количества комнат (спален) в квартире или доме, например, для однокомнатной квартиры площадью от 47 до 93 м², рассчитанной на двух человек, требуемый воздухообмен составит 75,6 м³/ч (21 л/с) согласно Standard 62.2–2022⁴.

Норма воздухообмена на одного человека, как правило, рассчитывается исходя из разбавления углекислого газа CO₂ до допустимой концентрации. Для этого может быть использована простая формула:

$$L = \frac{M}{K(C_i - C_{in})}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1)$$

где M — количество вредного вещества (ВВ), выделяющегося в помещении, мг/ч; K — коэффициент неравномерности распределения ВВ по объему помещения; C_i — концентрация ВВ в удаляемом воздухе, мг/м³; C_{in} — концентрация ВВ в приточном воздухе, мг/м³.

Количество ВВ, выделяемого в помещении, будет зависеть от количества источников и интенсивности их выделения. Например, для углекислого газа определяющими факторами являются количество человек в помещении, объем легких каждого из присутствующих, интенсивность физической нагрузки. Коэффициент неравномерности K также называют коэффициентом эффективности воздухообмена. Он зависит от принятой в помещении схемы подачи и удаления воздуха.

Сложность определения расхода воздуха по формуле (1) заключается в том, что значения концентраций C_i и C_{in} неоднозначны. Например, значение предельно допустимой концентрации углекислого газа составляет 9000 мг/м³ или 4900 млн⁻¹ (частей на миллион). При этом значение концентрации CO₂ в помещении более 1000 млн⁻¹ отрицательно отражается на самочувствии человека [8–10]. При анализе публикаций российских и зарубежных исследователей рекомендуемый диапазон концентрации CO₂ — 600–1000 млн⁻¹ [8, 11–14]. Такой разброс даст значения расхода воздуха для одного человека $L = 40–90$ м³/ч при $K = 1$ и $C_i = 300$ млн⁻¹. Наиболее комфортной средой считается воздух с концентрацией CO₂ порядка 400 млн⁻¹ [15], которая практически соответствует составу наружного незагрязненного воздуха. Для такой концентрации получается воздухообмен $L = 270$ м³/ч.

³ ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality. URL: https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_62.1_2022

⁴ ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2022. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings. URL: https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_62.2_2022

¹ СП 44.13330.2011. Административные и бытовые здания. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084087>

² СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. URL: <https://docs.cntd.ru/>

Повышенная физическая активность, например в спортивных залах, будет требовать больших значений воздухообмена. В гражданских зданиях не только люди могут быть источником углекислого газа, так, CO_2 выделяется на кухнях при сгорании природного газа. Также характерными выделениями для гражданских зданий являются избыточная теплота и влага, формальдегид (HCHO), твердые частицы (PM), летучие (VOC) и полуметучие органические соединения (SVOC), устойчивые запахи, биологические загрязнения, включая грибки, плесень, бактерии, вирусы и др. [7, 16]. Наличие нескольких ВВ может требовать большего расхода воздуха, если такие вещества обладают суммацией действия (однонаправленное действие). Кроме того, используемая схема распределения и удаления воздуха повышает необходимый воздухообмен, снижая значение коэффициента K [17]. Все это может повышать требования к оптимальному значению воздухообмена одного человека, например, по данным работы [13], этот параметр может достигать $200 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Определение энергетической эффективности СПРТ

Для определения энергетической эффективности СПРТ используется математическое моделирование процесса теплообмена между воздухом и насадкой в единичном канале регенеративной насадки [4]. Рассматривается математическая модель (2)–(4), которая позволяет находить поля температуры насадки и воздуха в зависимости от координаты z и времени τ : $T_n(z, \tau)$, $T_v(z, \tau)$. Математическая модель реализована численно с помощью программного пакета MatLab:

$$c_n \rho_n S_n \frac{\partial T_n(z, \tau)}{\partial \tau} = \Pi \alpha (T_v(z, \tau) - T_n(z, \tau)), \quad (2)$$

$$0 < \tau < \tau_0, \quad 0 < z < L;$$

$$G c_v \frac{\partial T_v(z, \tau)}{\partial z} + \Pi \alpha (T_v(z, \tau) - T_n(z, \tau)) + c_v \rho_v S_v \frac{\partial T_v(z, \tau)}{\partial \tau} = 0, \quad 0 < \tau < \tau_0, \quad 0 < z < L; \quad (3)$$

$$T_v(0, \tau), \quad T_v(z, 0), \quad T_n(0, \tau), \quad T_n(z, 0), \quad (4)$$

где c_n , c_v — массовая теплоемкость насадки и воздуха соответственно, Дж/(кг·К); ρ_n , ρ_v — плотность насадки и воздуха соответственно, кг/м³; S_n , S_v — площадь поперечного сечения канала насадки и воздуха соответственно, м²; Π — периметр канала, м; α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $\tau_0 = \tau_{\text{акк}} + \tau_{\text{рег}}$ — длительность цикла работы регенератора, с; $\tau_{\text{акк}}$ и $\tau_{\text{рег}}$ — длительность этапа аккумуляции и регенерации соответственно, с; G — массовый расход воздуха в канале, кг/с.

Уравнения (2) и (3) описывают температурные поля насадки и воздуха соответственно. Выражения (4) — это краевые условия задачи, которые задаются.

Для оценки энергетической эффективности СПРТ использовался следующий коэффициент:

$$E = \frac{\delta T}{\Delta T_{\text{max}}}, \quad (5)$$

где δT — охлаждение внутреннего воздуха в насадке в конце этапа аккумуляции или нагрев наружного воздуха в насадке в конце этапа регенерации, °С; $\Delta T_{\text{max}} = (T_{\text{in}} - T_{\text{out}})$ — максимально возможное охлаждение или нагрев воздуха в насадке от температуры внутренней среды T_{in} до наружной T_{out} , °С.

Изменение таких параметров, как диаметр каналов d , длина насадки l , длительность этапа, повлечет изменение величины δT . Коэффициент E может быть интерпретирован как термический КПД теплоутилизатора и не превышает 100 % [5].

Общий диаметр насадки регенератора ограничивается, исходя из конструктивных и дизайнерских соображений. Сохранение постоянным диаметра насадки является причиной уменьшения количества каналов в насадке при увеличении диаметра единичного канала. При увеличении диаметра канала d уменьшается суммарная площадь теплообмена в насадке регенератора, что вызывает снижение значений коэффициента E . Увеличение времени этапа также снижает E . Длина насадки может соответствовать толщине стены, в которой устанавливается СПРТ. При этом увеличение длины насадки повышает энергоэффективность СПРТ.

Увеличение длины насадки l и уменьшение диаметра единичного канала d повысит гидравлическое сопротивление насадки, но, как показывают исследования [18], это не потребует значительной мощности вентилятора. Однако сильное сужение каналов может стать проблемой их закупоривания льдом [19].

Необходимо отметить, что повышение производительности вызовет серьезное увеличение шума от СПРТ [9, 20]. Данная проблема может быть решена путем включения шумоглушителя в состав СПРТ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Учитывая широкий диапазон рекомендуемых значений оптимального воздухообмена на одного человека, определены значения коэффициента энергоэффективности СПРТ E для расходов воздуха от 30 до $200 \text{ м}^3/\text{ч}$ (табл.). Следующие параметры теплоутилизатора были приняты постоянными: общий диаметр насадки $D = 200 \text{ мм}$, время одного этапа $\tau_{\text{акк}} = \tau_{\text{рег}} = 40 \text{ с}$, плотность материала насадки $\rho_n = 1400 \text{ кг/м}^3$, удельная массовая теплоемкость

материала насадки $c_n = 2000$ Дж/(кг·К). Варьировались длина и диаметр единичного канала насадки.

По данным таблицы построена гистограмма, приведенная на рис. 3. Над столбиками указаны значения коэффициента E , представленного в долях от единицы. Значения коэффициента E в каждом из используемых диапазонов расхода воздуха не являются постоянными, а рассчитаны для отдельных расходов воздуха, однако такая визуализация более наглядна.

На рис. 3 явно заметно снижение коэффициента E при повышении расхода воздуха через СПРТ L ,

уменьшении длины насадки l и повышении диаметра единичного канала d . Видно, что максимальная длина и минимальный диаметр единичного канала насадки дают наибольшую экономию тепловой энергии и позволяют увеличивать производительность устройства при незначительной потере эффективности. Остальные конфигурации не дают такой устойчивости, повышение диаметра d на один размер при той же длине l уже дает снижение коэффициента E около 20 %. Следующие конфигурации показывают еще более сильное снижение эффективности.

Значения коэффициента E от длины и диаметра канала насадки

Values of the energy efficiency coefficient from the length and channel diameter of the nozzle

Расход воздуха L , м³/ч Airflow rate L , m³/h	Длина насадки $l_1 = 0,2$ м при диаметре d , мм Nozzle length $l_1 = 0.2$ m with a diameter d , mm			Длина насадки $l_2 = 0,4$ м при диаметре d , мм Nozzle length $l_2 = 0.4$ m with a diameter d , mm			Длина насадки $l_3 = 0,64$ м при диаметре d , мм Nozzle length $l_3 = 0.64$ m with a diameter d , mm		
	1,6	4,0	5,8	1,6	4,0	5,8	1,6	4,0	5,8
30	0,89	0,82	0,79	0,91	0,86	0,83	0,94	0,90	0,87
50	0,80	0,76	0,72	0,87	0,82	0,78	0,93	0,88	0,84
80	0,70	0,68	0,62	0,82	0,78	0,72	0,92	0,85	0,79
100	0,62	0,62	0,56	0,78	0,74	0,68	0,91	0,83	0,76
120	0,55	0,58	0,50	0,75	0,71	0,64	0,91	0,80	0,73
150	0,44	0,49	0,41	0,69	0,66	0,57	0,90	0,77	0,69
200	0,26	0,36	0,24	0,60	0,59	0,47	0,89	0,71	0,61

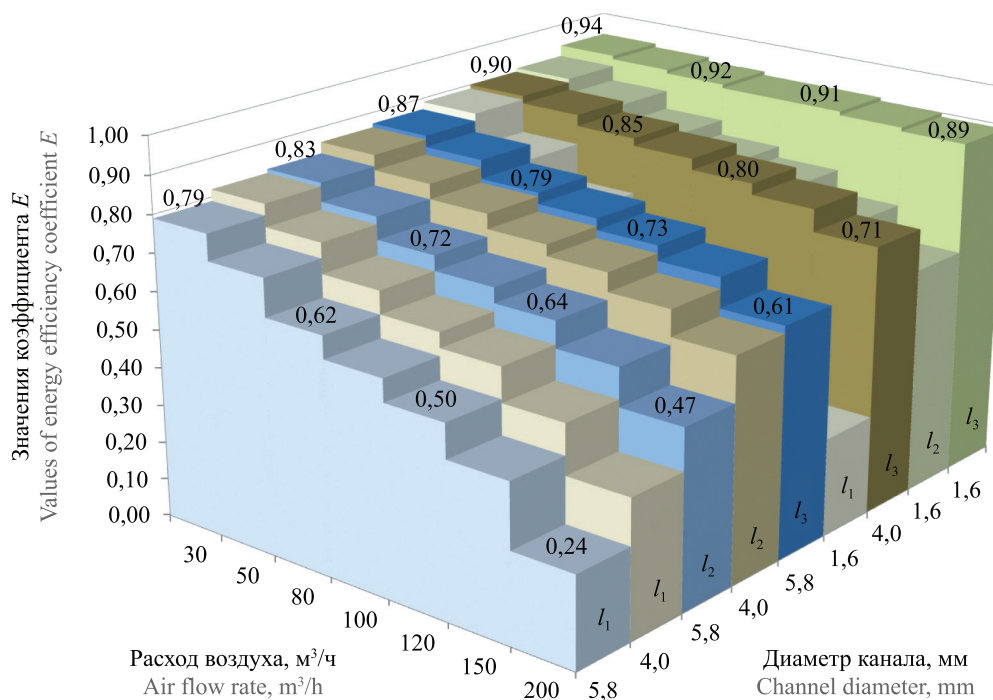


Рис. 3. Зависимость коэффициента энергетической эффективности E теплоутилизатора от расхода воздуха, длины и диаметра единичного канала насадки

Fig. 3. Dependence of the energy efficiency coefficient of SSRHE on the air flow rate, length and diameter of a single nozzle channel

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

С целью обеспечения оптимального воздухообмена в конкретном помещении для конкретного человека необходимо учитывать большое количество факторов: от индивидуальных особенностей организма до принятой схемы воздухообмена. Это требует существенного расширения диапазона значений производительности вентиляционных устройств. Целесообразным будет применение функции регулирования производительности, чтобы подстроиться под требования отдельных помещений. Учитывая то, что рекомендуемые значения воздухообмена могут быть значительными, а также то, что в большинстве случаев в помещениях находится несколько человек, целесообразно увеличивать производительность СПРТ. Рекомендуются значения воздухообмена 150–200 м³/ч.

Для теплоутилизаторов повышение производительности ведет к снижению эффективности их работы. Компенсировать такой негативный эффект

можно с помощью увеличения площади теплообмена путем изменения геометрии насадки. Однако при значительной длине и слишком малом диаметре единичного канала насадки существенно повышается ее аэродинамическое сопротивление, а также возникает риск закупоривания каналов льдом и пылью. К тому же увеличение расхода воздуха будет повышать уровень генерируемого устройством шума. Компромиссным вариантом конструкции насадки здесь может стать конфигурация с достаточной пропускной способностью, например при $l = 0,64$ м и $d = 4$ мм.

Представленные результаты исследования могут быть использованы при модернизации существующих СПРТ и разработке новых конфигураций насадок для подобных теплоутилизаторов.

Для оценки уровня генерируемого шума СПРТ, а также для определения оптимальной конструкции насадки, снижающей риск закупоривания каналов, необходимо провести экспериментальные исследования для предложенных конфигураций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Seguel J.M., Merrill R., Seguel D., Campagna A.C. Indoor air quality // *American Journal of Lifestyle Medicine*. 2017. Vol. 11. Issue 4. Pp. 284–295. DOI: 10.1177/1559827616653343
2. Шубин И.Л., Спиридонов А.В. Проблемы энергосбережения в российской строительной отрасли // *Энергосбережение*. 2013. № 1. С. 15–21.
3. Zender-Świercz E. A review of heat recovery in ventilation // *Energies*. 2021. Vol. 14. Issue 6. P. 1759. DOI: 10.3390/en14061759
4. Monarkin N., Monarkina T. Experimental research of a regenerative heat exchanger // *Processes*. 2022. Vol. 10. Issue 1. P. 100. DOI: 10.3390/pr10010100
5. Monarkin N., Sinitsyn A., Pavlov M., Akhmetov T. The influence of main parameters of regenerative heat exchanger on its energy efficiency // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 178. P. 01024. DOI: 10.1051/e3sconf/202017801024
6. Penev A., Tsokov L. The effect of buoyancy forces in buildings on the efficiency of unbalanced regenerative air handling units // *2021 6th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA)*. 2021. DOI: 10.1109/EFEA49713.2021.9406233
7. Baeza-Romero M.T., Dudzinska M.R., Torkmahalleh M.A., Barros N., Coggins A.M., Ruzgar D.G. et al. A review of critical residential buildings parameters and activities when investigating indoor air quality and pollutants // *Indoor Air*. 2022. Vol. 32. Issue 11. DOI: 10.1111/ina.13144
8. Агафонова В.В. Оценка качества воздуха в помещении офисного здания // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2019. № 3. С. 61–64.
9. Catalina T., Lungu C. Influence of a decentralized ventilation system on the indoor air quality of a primary school classroom // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 664. Issue 1. P. 012039. DOI: 10.1088/1755-1315/664/1/012039
10. Wargocki P., Wyon D.P. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective // *Building and Environment*. 2013. Vol. 59. Pp. 581–589. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.10.007
11. Zender-Swiercz E. Assessment of indoor air parameters in building equipped with decentralised facade ventilation device // *Energies*. 2021. Vol. 14. Issue 4. P. 1176. DOI: 10.3390/en14041176
12. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Воронов В.А., Логинова С.А., Емелин В.А. Комплексное теплообеспечение и устойчивое состояние тепловлажностной среды внутри помещения с уровнем качества CO₂ // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2022. № 1 (69). С. 76–82. DOI: 10.6060/snt.20226901.00010
13. Губернский Ю.Д., Шилькрот Е.О. Сколько воздуха нужно человеку для комфорта? // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2008. № 4. С. 4–12.
14. Наумов А.Л., Канко Д.В. CO₂: критерий эффективности систем вентиляции // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха,*

теплоснабжение и строительная теплофизика. 2015. № 1. С. 12–21.

15. Мансуров П.Ш., Гурин М.А., Рубель Е.В. Влияние концентрации углекислого газа на организм человека // *Universum: технические науки*. 2017. № 8 (41). С. 20–23.

16. Sharma S., Bakht A., Jahanzaib M., Lee H., Park D. Evaluation of the effectiveness of common indoor plants in improving the indoor air quality of studio apartments // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. Issue 11. P. 1863. DOI: 10.3390/atmos13111863

17. Meiss A., Padilla-Marcos M.A., Poza-Casado I., Alvaro-Tordesillas A. A graphical tool to estimate the air change efficiency in rooms with heat recovery systems // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 3. P. 1031. DOI: 10.3390/su12031031

18. Monarkin N., Lukin S., Anurov Yu.M., Tihomirov B.A., Agasians G.A., Galileev S.M. et al. Thermal and aerodynamic efficiency of a stationary switching regenerative heat exchanger // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 337. Issue 1. P. 012067. DOI: 10.1088/1755-1315/337/1/012067

19. Adamski M., Kiszkiel P. Condensation phenomena and frost problems in the air heat recuperators // *MATEC Web of Conferences*. 2014. Vol. 18. P. 01001. DOI: 10.1051/mateconf/20141801001

20. Монаркин Н.Н., Монаркина Т.В., Лукин С.В., Кочкин А.А. Экспериментальное исследование уровня шума регенеративного теплоутилизатора // *Приволжский научный журнал*. 2021. № 4 (60). С. 100–106.

Поступила в редакцию 18 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Николай Николаевич Монаркин** — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 831464, ORCID: 0000-0002-4411-5753, ResearcherID: O-9932-2017, Scopus: 56027718900; nikolay-monarkin@yandex.ru.

REFERENCES

1. Seguel J.M., Merrill R., Seguel D., Campagna A.C. Indoor Air Quality. *American Journal of Lifestyle Medicine*. 2017; 11(4):284-295. DOI: 10.1177/1559827616653343

2. Shubin I.L., Spiridonov A.V. Problems of energy saving in the Russian construction industry. *Energoberezhenie*. 2013; 1:15-21. (rus.).

3. Zender-Świercz E. A review of heat recovery in ventilation. *Energies*. 2021; 14(6):1759. DOI: 10.3390/en14061759

4. Monarkin N., Monarkina T. Experimental Research of a Regenerative Heat Exchanger. *Processes*. 2022; 10(1):100. DOI: 10.3390/pr10010100

5. Monarkin N., Sinitsyn A., Pavlov M., Akhmetov T. The influence of main parameters of regenerative heat exchanger on its energy efficiency. *E3S Web of Conferences*. 2020; 178:01024. DOI: 10.1051/e3sconf/202017801024

6. Penev A., Tsokov L. The effect of buoyancy forces in buildings on the efficiency of unbalanced regenerative air handling units. *2021 6th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA)*. 2021. DOI: 10.1109/EFEA49713.2021.9406233

7. Baeza-Romero M.T., Dudzinska M.R., Torkmahalleh M.A., Barros N., Coggins A.M., Ruzgar D.G. et al. A review of critical residential buildings parameters and activities when investigating indoor air quality

and pollutants. *Indoor Air*. 2022; 32(11). DOI: 10.1111/ina.13144

8. Agafonova V.V. Indoor air quality assessment in office buildings. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2019; 3:61-64. (rus.).

9. Catalina T., Lungu C. Influence of a decentralized ventilation system on the indoor air quality of a primary school classroom. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 664(1):012039. DOI: 10.1088/1755-1315/664/1/012039

10. Wargocki P., Wyon D.P. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*. 2013; 59:581-589. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.10.007

11. Zender-Świercz E. Assessment of indoor air parameters in building equipped with decentralised facade ventilation device. *Energies*. 2021; 14(4):1176. DOI: 10.3390/en14041176

12. Fedosov S.V., Fedoseev V.N., Voronov V.A., Loginova S.A., Emelin V.A. Integrated heat supply and stable condition of the heat and humidity environment indoors with a quality level. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2022; 1(69):76-82. DOI: 10.6060/snt.20226901.00010 (rus.).

13. Shil'krot E.O., Gubernskiy Yu.D. How much air does a person need for comfort? *ABOK Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-*

Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics. 2008; 4:4-12. (rus.).

14. Naumov A.L., Kapko D.V. CO₂: criterion of efficiency of ventilation systems. *ABOK Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics*. 2015; 1:12-21. (rus.).

15. Mansurov R., Gurin M., Rubel E. The effect of carbon dioxide concentration on the human body. *Universum: Technical Sciences*. 2017; 8(41):20-23. (rus.).

16. Sharma S., Bakht A., Jahanzaib M., Lee H., Park D. Evaluation of the effectiveness of common indoor plants in improving the indoor air quality of studio apartments. *Atmosphere*. 2022; 13(11):1863. DOI: 10.3390/atmos13111863

17. Meiss A., Padilla-Marcos M.A., Poza-Casado I., Alvaro-Tordesillas A. A graphical tool to es-

timate the air change efficiency in rooms with heat recovery systems. *Sustainability*. 2020; 12(3):1031. DOI: 10.3390/su12031031

18. Monarkin N., Lukin S., Anurov Yu.M., Timomirov B.A., Agasians G.A., Galileev S.M. et al. Thermal and aerodynamic efficiency of a stationary switching regenerative heat exchanger. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 337(1):012067. DOI: 10.1088/1755-1315/337/1/012067

19. Adamski M., Kiszkiel P. Condensation phenomena and frost problems in the air heat recuperators. *MATEC Web of Conferences*. 2014; 18:01001. DOI: 10.1051/mateconf/20141801001

20. Monarkin N.N., Monarkina T.V., Lukin S.V., Kochkin A.A. Experimental study of the noise level of a regenerative heat exchanger. *The Privolzhsky Scientific Journal*. 2021; 4(60):100-106. (rus.).

Received January 18, 2023.

Adopted in revised form on February 6, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

BIONOTES: **Nikolay N. Monarkin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of the Heat and Gas and Water Supply; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenina st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RSCI: 831464, ORCID: 0000-0002-4411-5753, ResearcherID: O-9932-2017, Scopus: 56027718900; nikolay-monarkin@yandex.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

RESEARCH PAPER / НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

UDC 69.055

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.463-470

Modeling the residential buildings erection of large-sized blocks

Pavel P. Oleynik, Liliya A. Pakhomova

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

ABSTRACT

Introduction. The development analysis of domestic residential building construction of volumetric blocks, starting from the 60s of the twentieth century to the present time, is given. It is noted the innovative nature of the transition from low-volume blocks to large-sized blocks of high and full factory readiness. The problems that have arisen in this case are indicated, of which one of the most acute is the determination of organizational and technological parameters for the construction of residential buildings.

Materials and methods. The role of organizational and technological parameters of the objects' construction is described — the duration of construction and its stages, the complexity of work, the number of workers. The content of the timing carried out by the MonArch Group of Companies for the installation of large-sized volumetric blocks of a four-story residential building in Yakovlevo–2 village (New Moscow) is revealed. The main installation operations are analyzed with an indication of the time spent on each floor and the roof arrangement.

Results. Based on the final results of the timekeeping materials generalization, three estimates of the duration of a building construction of large-sized blocks are proposed — pessimistic, satisfactory, optimistic. The found dependences "duration of building construction — the number of large-sized blocks installed taking into account the roof arrangement" are revealed with the corresponding calculation formulas. The formula for calculating the labor intensity of installers work and crane maintenance workers is also given.

Conclusions. The prospects for the innovative technology development for the construction of residential buildings of large-sized blocks are substantiated, provided that capital investments are allocated and the efforts of research and design organizations are combined to comprehensively solve the problems that have arisen. To solve the problematic tasks of determining the indicators of organizational and technological parameters of buildings construction of large-sized blocks, an approach and methods for assessing the duration of construction and the complexity of installation work on the assembly of buildings are proposed.

KEYWORDS: buildings erection of blocks, large-sized blocks, construction duration, labor intensity of work, timing of building erection, installation operations, operation execution time, pessimistic assessment, satisfactory assessment, optimistic assessment

Acknowledgements. The authors of the article express their gratitude to the head of the MonArch Group of Companies, Professor, Doctor of Technical Sciences Sergey Aleksandrovich Ambartsumyan for the constant attention and support of scientific maintenance for buildings construction of large-sized blocks.

FOR CITATION: Oleynik P.P., Pakhomova L.A. Modeling the residential buildings erection of large-sized blocks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):463-470. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.463-470 (rus.).

Corresponding author: Liliya A. Pakhomova, liliya_7172@mail.ru.

Моделирование возведения жилых зданий из крупногабаритных блоков

Павел Павлович Олейник, Лилия Алексеевна Пахомова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Приводится анализ развития отечественного домостроения из объемных блоков, начиная с 60-х гг. XX в. до настоящего времени. Отмечается инновационный характер перехода от малообъемных блоков на крупногабаритные блоки высокой и полной заводской готовности. Указывается на возникшие при этом проблемы, из которых одной из наиболее острых является определение организационно-технологических параметров возведения жилых зданий.

Материалы и методы. Описывается роль организационно-технологических параметров возведения объектов — продолжительность строительства и его этапов, трудоемкость работ, численность рабочих кадров. Раскрывается содержание проведенного ГК «МонАрх» хронометража по монтажу крупногабаритных объемных блоков четырехэтажного жилого здания в деревне Яковлево-2 (Новая Москва). Анализируются основные монтажные операции с указанием затраченного времени на каждом этаже и устройстве крыши.

Результаты. На основе итоговых результатов обобщения материалов хронометража предложены три оценки продолжительности возведения здания из крупногабаритных блоков — пессимистическая, удовлетворительная, оптимистическая. Раскрываются найденные зависимости «продолжительность возведения здания — количество смонтированных крупногабаритных блоков с учетом устройства крыши» с приведением соответствующих расчетных формул. Приводится также формула подсчета трудоемкости работ монтажников и обслуживающих кран рабочих.

Выводы. Обоснованы перспективы развития инновационной технологии возведения жилых зданий из крупногабаритных блоков при условии выделения капитальных вложений и объединения усилий научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций для комплексного решения возникших проблем. Для решения проблемных задач определения показателей организационно-технологических параметров возведения зданий из крупногабаритных блоков предложен подход и способы оценки продолжительности строительства и трудоемкости монтажных работ по сборке зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: возведение зданий из блоков, крупногабаритные блоки, продолжительность строительства, трудоемкость работ, хронометраж возведения здания, монтажные операции, время выполнения операции, пессимистическая оценка, удовлетворительная оценка, оптимистическая оценка

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководителю ГК «МонАрх», профессору, доктору технических наук Сергею Александровичу Амбарцумяну за постоянное внимание и поддержку научного сопровождения возведения зданий из крупногабаритных блоков.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Олейник П.П., Пахомова Л.А. Modeling the residential buildings erection of large-sized blocks // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 463–470. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.463-470

Автор, ответственный за переписку: Лилия Алексеевна Пахомова, liliya_7172@mail.ru.

INTRODUCTION

The beginning of residential buildings construction of the fifth industrial generation is characterized by the emergence of innovative technology of their conveyor assembly on construction sites from large-sized volumetric blocks of full factory readiness. The transfer of main volumes of work from construction production to industrial production will qualitatively change the entire system of reproduction of the housing stock, including the design, construction and operation of residential buildings [1].

The residential buildings erection from volumetric blocks began in the second half of the 60s of the twentieth century. By number of research and design organizations — the Central Research Laboratory (TSNIL-3) of Glavstroy (Moscow), the Research Institute of Construction and Architecture (Minsk), Gidroproekt (Moscow), Dalmorproekt (Artem), etc. in the period 1956–1958, a number of new projects were developed for the construction of residential buildings from volumetric blocks. Most of these projects provided for the use of volumetric blocks in the form of a block room, a block for two rooms, block apartments and block sections. For example, a block-room was a reinforced concrete box with dimensions from 2.4×4.8 m to 3.6×6.0 m and a weight of 6–10 tons, and a block for two rooms had a length of 6–10 m and a width of 6 m with a weight of 20–30 tons. Structural schemes of residential buildings made of volumetric blocks provided for three options — panel-block, frame-block and block. In 1959, the first experimental building was built in Lublino, Moscow region, in which block rooms were assembled

from leca flat panels in a special conductor with their fixing by welding together.

Widespread construction of residential buildings of volumetric blocks began in 1961 in Krasnodar, Minsk, etc. In Krasnodar, residential 5-storey buildings were erected according to the GPI-5 project (Moscow) from block rooms consisting of monolithically connected three walls and a bottom in the form of ribbed slabs 10 cm thick for the walls and 12 cm for the bottom. The block rooms of the Minsk variant differed in that they consisted of four walls, but without a bottom. Since 1963, according to the project by Permproject, 5-storey buildings made of leca block boxes have been built in Perm. All blocks were divided into three types — residential, sanitary-kitchen and staircase with the same size of $3.2 \times 5.2 \times 2.7$ m [2].

It should be noted that all the volumetric blocks used had a high factory readiness. In particular, glazed windows, doors and wall cabinets were installed in them, engineering networks with full wiring, plumbing and electrical appliances were installed. The finished blocks were installed by cranes equipped with balancing traverses on trailer platforms. The blocks were installed, as a rule, from wheels. The timing carried out at that time allowed one to establish that the costs of manufacturing and completing the blocks came to about 75–85 %, reducing the consumption of concrete by 25–28 %, reducing the duration of construction by 3–4 times. The installation time of one unit in the design position was 20–30 minutes. During one shift, from 7 to 10 blocks were installed, and in 10–12 working days, with three shifts, a five-story residential building for 60 apartments was erected [3–8].

Modern technology of residential buildings erection of volumetric blocks is characterized by the transition to large-sized blocks of full factory readiness [9–15]. Conducted at the present time by the MonArch Group of Companies (Moscow) a unique experiment includes the construction of an enterprise for the manufacture and assembly of large-sized object blocks, consisting of an experimental workshop of 186.6×150.8 m, equipped with innovative technological equipment, the manufacture of large-sized blocks of full factory readiness weighing up to 65 tons, the residential buildings assembly of large-sized blocks in sizes up to $15.5 \times 7.5 \times 3.3$ m. The results obtained during the experiment confirm the large-scale prospects for the development of this direction as a highly industrial conveyor method of assembling residential buildings with high productivity and minimum erection duration [16].

At the same time, due to the pioneering nature, problems have been revealed at almost all stages of this technology for the construction of residential buildings, requiring their resolution by the integrated forces of research, design and construction organizations. Especially difficult are the tasks of forming the type of unified large-sized volumetric blocks, the development of modern space-planning solutions for buildings with the layout of large-sized blocks, the reasonable selection of their rational options for standard series, the use of high-performance automated means of mechanization of assembly operations, the creation of reliable and safe technological equipment for the stable positioning of blocks. To date, a clear methodology for modeling residential buildings erection of large-sized volumetric blocks has not been developed, linking the solutions to the above-mentioned tasks. But for this, first of all, it is necessary to determine the organizational and technological parameters that characterize the development of the technological process of erecting residential buildings of large-sized blocks, both as a whole and its individual operations [17, 18].

MATERIALS AND METHODS

The main organizational and technological parameters of an object erection are the total duration of construction, the duration of individual stages (periods) of construction, the labor intensity and machine intensity of work, the number of workers. These indicators are mandatory as part of construction organization projects and are determined by federal and territorial standards and indicators, and in some cases by analogous objects. For work production projects, the organizational and technological indicators given in construction organization projects are directive and represent the final technical and economic indicators of an object construction. Their calculation is based on determining the scope of work according to working drawings and estimates in units of measurement adopted in the estimated norms and prices [19].

Regarding the technology of residential buildings erection of volumetric large-sized blocks, the regulatory framework is just beginning to be formed, and therefore the definition of organizational and technological parameters and ranges of changes in their indicators depending on the conditions of work requires a special approach. Such an approach should be based on the generalization of the experience of the past years and the experiments currently being conducted, the accumulation and processing of the received statistical information with its subsequent correction as a result of the influence of scientific and technological progress [20, 21].

In order to determine the indicators of organizational and technological parameters of buildings erection of volumetric large-sized blocks, the MonArch group of companies carried out the timing of the installation of a residential building in the Desenovskoye settlement of Yakovlevo–2 village on the territory of the New Moscow (Fig. 1).



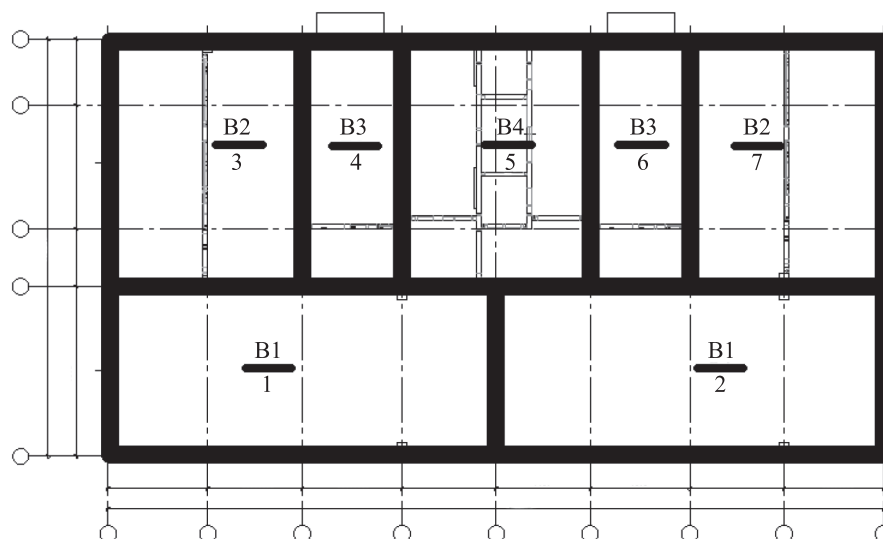
Fig. 1. General view on a building of large-sized volumetric blocks

This object is a four-story building with a plan size of 28.8×15.5 m. The building's volume and planning solutions form 7 blocks each, of which blocks B1, B2 and B3 are presented in 2 copies, and block B4 in one copy (Table 1), the height of all blocks is 3.3 m. The location of the blocks and the sequence of their installation on the ground floor are shown in Fig. 2, in which the fraction is indicated — in the numerator the number of the block, in the denominator — the number of its installation.

On all subsequent floors, the arrangement and installation sequence of blocks is similar to the scheme of the first floor (Table 2).

Table 1. Characteristics of large-sized volumetric blocks

Block's number	Quantity of blocks, pcs	Blocks' parameters		
		Block's size, m	Block's volume, m ³	Block's weight, ton
B1	2	14.4 × 6.3	301.0	50.9
B2	2	9.2 × 8.0	245.0	43.9
B3	2	9.2 × 3.7	113.0	22.6
B4	1	9.2 × 7.0	215.0	42.7

**Fig. 2.** Arrangement and sequence of installation of large-sized blocks**Table 2.** The sequence of floor-by-floor installation of large-sized blocks

Block's number	On-floor block installation number			
	1 floor	2 floor	3 floor	4 floor
B1	1.2	8.9	15.16	22.23
B2	3.7	10.14	17.21	24.28
B3	4.6	11.13	18.20	25.27
B4	5	12	19	26

A Liebherr LTM 1650 crane with a maximum lifting capacity of 650 tons was used as a lifting-and-carry vehicle. The telescopic boom of the crane has a length from 16.7 to 80 m. The crane was used in modification T3, T3Y. Modification of the crane T3Y has a telescopic boom from 33.9 to 54 m. At $R_{\min} = 5$ m, $L_{\text{boom}} = 33.9$ m, and at $R_{\max} = 52$ m, $L_{\text{boom}} = 54$ m¹. The advantages of this powerful crane should also include high maneuverability and a large service area.

The main installation operations included:

- rigging, related to block preparation for lifting (traverse preparation, slinging);
- mounting, consisting of lifting (moving), aiming, orientation, installation, alignment, block fixing.

¹ URL: <https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/d0979887-cb7a-4e99-b4fb-d3cbea406b3e-6/liebherr-275-ltm-1650-8-1-td-275-05-defisr12-2021.pdf>

All information on the installation processes timing was summarized in the form of a report, a fragment of which is given in Table 3.

In work production process, rigging operations included slinging blocks (3–15 min), lowering and uncoupling the traverse grips (3–17 min), bringing the traverse to the storage area for unslinging the four extreme slings (4–10 min).

When performing the actual installation operations, the time spent was distributed as follows: bringing a block to installation location into design position (10–27 min), lowering the block (8–17 min), boom lifting with a turn to a location of a block (5–8 min), block lifting and turning (3–6 min).

A certain amount of time was spent on related operations, such as beating off swells on the supporting embedded parts (9–27 min), screwing — unscrewing fittings and tensioning chain slings to determine the center of gravity of a block (26 min). Unforeseen circumstances also arise related to difficulties in block installing into design position, for example, due to loose communication (27 min).

As a result, the duration of installation of large-sized volumetric block per floor was:

- 1st floor — 5.0 hours;
- 2nd floor — 4.7 hours;
- 3rd floor — 3.4 hours;
- 4th floor — 3.1 hours.

Table 3. Report on the timing of a residential building erection (fragment)

Number	Operation	Start of operation, time	End of operation, time	Duration, min	Comments
54	Slings of block B2	17–47	17–51	4	–
55	Feeding of B2 block to installation location into design position	17–51	18–02	11	–
56	Removal of slings of B2 and turn the crane boom to the next block	18–02	18–10	8	–
57	Slings and lifting of block B3 to installation location into design position	18–10	18–29	19	–
58	Removal of slings of B3 and turn the crane boom to the next block	18–29	18–36	7	–
59	Slings of block B4 “from wheels”	18–36	–	–	–
60	Break	Till	18–50	14	–
61	Feeding of B4 block to installation location into design position	18–50	19–20	30	–
62	Removal of slings of B4 and turn the crane boom to the next block	19–20	19–27	7	–

The roof installation of a building consisted of installing four covers in 1.1 hours.

Thus, the total duration of installation of the four-story building was 17.3 hours.

RESULTS OF THE RESEARCH

The final results of the timing showed that, despite the floor-by-floor use of identical types of large-sized blocks, their symmetrical arrangement and the same sequence of installation, as well as absolutely equal working conditions, there is a significant variation in floors arrangement duration. So, the maximum installation time of one floor is 5.0 hours (1st floor), and the minimum time is 3.1 hours (4th floor). The analysis made it possible to establish that the main reason for such a spread of duration indicators is mainly due to non-compliance with a clear sequence of installation operations and lack of practical experience. A certain negative role was played by the use of a non-automatic traverse, which slightly increased labor costs. At the same time, it should be borne in mind that the duration of installation of the 1st floor will be slightly higher than the duration of installation of each subsequent floor due to the specific conditions of installation of blocks on the foundation of the underground part of a building.

The materials of this timing are the first statistical data, based on which it is possible to deduce the dependence “the building erection duration — the number of large-sized blocks installed, taking into account the roof arrangement”. Such dependence, of course, reflects the features and conditions of work production on erection of this particular building, but it can also serve as a predictive guideline for further solving scientific and practical problems.

It is advisable to present three estimates of building erection duration of large-sized volumetric blocks, which will be able to take into account a wide variety

of work options. Such assessments are pessimistic, satisfactory, optimistic.

The pessimistic assessment provides for the most unfavorable working conditions — lack of practical experience, use of mechanical technological equipment, displacement of gravity center and blocks offset, tightness on a floor, cutting of concrete flows, etc.

The duration of a block installation is defined as:

$$t' = \frac{t_{\max} m + \tau}{N} = \frac{5 \cdot 4 + 1.13}{28} = 0.76 \text{ hour}, \quad (1)$$

here t' — duration of a block installation, hour (with a pessimistic assessment); $t_{\max}$ — maximum duration of blocks installation per floor, hour; m — number of floors; τ — duration of roof arrangement, hour; N — number of blocks for a building.

Then the indicator of the pessimistic assessment of the duration of a building installation, floor(s) arrangement will be:

$$T' = 0.76n, \quad (2)$$

here T' — duration of a building, floor(s) installation, hour (with a pessimistic assessment); n — number of blocks per building, floor(s).

A satisfactory assessment is focused on normal working conditions, but with the possible appearance of difficulties that cause additional labor and time costs. The duration of a block installation is equal to:

$$t'' = \frac{\sum_{j=1}^m t_j + \tau}{N} = \frac{(5.0 + 4.7 + 3.4 + 3.1) + 1.13}{28} = 0.62 \text{ hour}, \quad (3)$$

here t'' — duration of a block installation, hour (with a satisfactory assessment).

An indicator of satisfactory assessment of duration of a building, floor(s) installation will be:

$$T'' = 0.62n, \quad (4)$$

here T'' — duration of a building, floor(s) installation, hour (with a satisfactory assessment).

An optimistic assessment is calculated for the clear implementation of technological operations of the installation process during the entire duration of an object erection. The indicator of the duration of a block installation is expressed as:

$$t''' = \frac{t_{\min} m + \tau}{N} = \frac{3.1 \cdot 4 + 1.13}{28} = 0.48 \text{ hour}, \quad (5)$$

here t''' — duration of a block installation, hour (with an optimistic assessment); $t_{\min}$ — minimum duration of blocks installation per a floor, hour.

The indicator of an optimistic assessment of the duration of building, floor(s) installation is determined by an expression of the form:

$$T''' = 0.48n, \quad (6)$$

here T''' — duration of building, floor(s) installation, hour (with an optimistic assessment).

The labor intensity of large-sized volumetric blocks installation includes the total labor costs associated with the installation process, and it is recommended to determine it by the formula:

$$Q = (q_1 + q_2)p + q_3 + \sum_{j=1}^m q_{4j}, \quad (7)$$

here Q — labor intensity of blocks installation, man hours; q_1 — labor costs for a crane delivery to site, man hours; q_2 — labor costs of machinists and crane maintenance workers, man hours; p — number of cranes; q_3 — labor costs of installers for preparation of technological equipment, man hours; q_{4j} — labor costs of installers for blocks installation on the j -th floor, man hours.

CONCLUSIONS AND DISCUSSION

Long-term construction practice has confirmed the technical feasibility and economic efficiency of residential buildings erection of volumetric blocks of high or full factory readiness as an important highly industrial direction of housing stock reproduction. In this regard, industrial production and conveyor assembly on construction sites of large-sized volumetric blocks should receive mass development, allowing to solve large-scale housing construction tasks in any natural and climatic conditions in a short time and with high quality.

At the same time, the development of building construction of large-sized volumetric blocks will require huge capital investments and, first of all, the formation of integrated efforts of research and design organizations to create appropriate industrial enterprises equipped with advanced robotic technology, and system solutions for the typification and unification of blocks, the development of modern volume planning and structural solutions of buildings, the creation of specialized transport and installation equipment and reliably positioned technological equipment.

The first steps, which have no analogues in the world, were taken by the MonArch group of companies, who took upon themselves the pioneering development of this technology of the future and at the same time revealed the entire complex of operational tasks, the solution of which will allow the construction industry to switch to buildings erection of large-sized blocks. One of such key tasks is the development of adequate organizational and technological solutions, as a decisive factor in the high efficiency of construction production. The approaches proposed in the article to determining the parameters of such organizational and technological solutions are initial and at the same time reflect the achieved level of production in this area, and they can be extended to other regions that have begun the construction of buildings of large-sized blocks.

REFERENCES

1. Pakhomova L.A., Oleinik P.P. Comfortable housing of the new industrial generation. *Construction Production*. 2020; 2:23-28. (rus.).
2. Abrahamyan S.G., Burlachenko O.V., Galda Z.Yu. Volumetric block modules as a kind of modular structures of prefabricated building systems. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series : Construction and Architecture*. 2021; 1(82):5-13. (rus.).
3. Abramyan S.G., Ulanovskiy I.A. Modular construction and opportunities to use of modular structures in building superstructures. *Engineering Journal of Don*. 2018; 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5371> (rus.).
4. Kazakov Yu.N. Prefabricated buildings: foreign experience. *Stroyprofil*. 2004; 4. (rus.).
5. Asaul A.N., Kazakov Yu.N., Knyaz I.P., Erofeev P.Yu. *Theory and practice of using prefabricated buildings in normal conditions and emergency situations in Russia and abroad*. St. Petersburg, Humanistics, 2004; 464. (rus.).
6. Gao Y., Tian X.-L. Prefabrication policies and the performance of construction industry in China. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 253:120042. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120042
7. Akinradewo O., Aigbavboa C., Aghimien D., Oke A., Ogunbayo B. Modular method of construction in developing countries: the underlying challenges. *International Journal of Construction Management*. 2021; 1-11. DOI: 10.1080/15623599.2021.1970300
8. Pittau F., Malighetti L.E., Iannaccone G., Masera G. Prefabrication as large-scale efficient strat-

egy for the energy retrofit of the housing stock: An Italian case study. *Procedia Engineering*. 2017; 180:1160-1169. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.276

9. Cao J., Zhao P., Liu G. Optimizing the production process of modular construction using an assembly line-integrated supermarket. *Automation in Construction*. 2022; 142:104495. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104495

10. Chatzimichailidou M., Ma Y. Using BIM in the safety risk management of modular construction. *Safety Science*. 2022; 154:105852. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105852

11. Arashpour M., Kamat V., Bai Y., Wakefield R., Abbasi B. Optimization modeling of multi-skilled resources in prefabrication: Theorizing cost analysis of process integration in off-site construction. *Automation in Construction*. 2018; 95:1-9. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.07.027

12. Oleynik P.P. *Industrial-mobile methods of construction of enterprises, buildings and structures : monograph*. Moscow, ASV Publishing House, 2021; 488. (rus.).

13. Shin J., Moon S., Cho B., Hwang B., Choi B. Extended technology acceptance model to explain the mechanism of modular construction adoption. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 342:130963. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130963

14. Bhandari S., Riggio M., Jahedi S., Fischer E.C., Muszynski L., Luo Z. A review of modular cross lami-

nated timber construction: Implications for temporary housing in seismic areas. *Journal of Building Engineering*. 2023; 63:105485. DOI: 10.1016/j.job.2022.105485

15. Sychev S.A. *High-tech installation of prefabricated transformable buildings in the conditions of the Far North : monograph*. St. Petersburg, SPbGASU, 2017; 356. (rus.).

16. Shepeleva E.A., Shepelev A.L. *Organization of construction of production facilities by the complete-block method*. Arkhangelsk, SAFU, 2013; 139.

17. Sychev S.A. Alternative projecting technique of technologies for erecting buildings and structures from prefabricated modules. *Bulletin of Civil Engineers*. 2015; 5(52):119-125. (rus.).

18. Kozachun G.U. *Types of residential buildings*. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2011; 398. (rus.).

19. Goh M., Goh Ya.M. Lean production theory-based simulation of modular construction processes. *Automation in Construction*. 2019; 101:227-244. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.12.017

20. Oleynik P.P. *Scientific and technical progress in construction production : monograph*. Moscow, ASV Publishing House, 2019; 442. (rus.).

21. Rybakova A.O. Evaluating the efficiency of modular design based on prefabricated elements. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2022; 12(3):9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/23055502.2022.3.9 (rus.).

Received December 12, 2022.

Adopted in revised form on February 7, 2023.

Approved for publication on March 9, 2023.

B I O N O T E S: **Pavel P. Oleynik** — Doctor of Technical Sciences, Professor 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; ID RSCI: 399946, Scopus: 10043771900, ResearcherID: X-4463-2019, ORCID: 0001-8425-2974; cnioimp@mail.ru;

Liliya A. Pakhomova — senior lecturer, postgraduate student 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; ID RSCI: 1035400, Scopus: 57205446200, ORCID: 0002-1347-3355; liliya_7172@mail.ru.

Contribution of the authors:

Pavel P. Oleynik — scientific guidance, formation of a methodology for modeling parameters, preparation of conclusions, writing a text.

Liliya A. Pakhomova — analysis of the state of the problem, research of technological processes, development of modeling stages, establishing of parameter estimates, writing a text.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пахомова Л.А., Олейник П.П. Комфортное жилье нового индустриального поколения // Строительное производство. 2020. № 2. С. 23–28.

2. Абрамян С.Г., Бурлаченко О.В., Галда З.Ю. Объемные блок-модули как разновидность модуль-

ных конструкций быстровозводимых строительных систем // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия : Строительство и архитектура. 2021. № 1 (82). С. 5–13.

3. Абрамян С.Г., Улановский И.А. Модульное строительство и возможность применения модульных конструкций при надстройке зданий // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5371>

4. Казаков Ю.Н. Быстровозводимые здания: зарубежный опыт // Стройпрофиль. 2004. № 4.

5. Асаул А.Н., Казаков Ю.Н., Князь И.П., Ерофеев П.Ю. Теория и практика использования быстровозводимых зданий в обычных условиях и чрезвычайных ситуациях в России и зарубежом. СПб. : Гуманистика, 2004. 464 с.

6. Gao Y., Tian X.-L. Prefabrication policies and the performance of construction industry in China // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 253. P. 120042. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120042

7. Akinradewo O., Aigbavboa C., Aghimien D., Oke A., Ogunbayo B. Modular method of construction in developing countries: the underlying challenges // International Journal of Construction Management. 2021. Pp. 1–11. DOI: 10.1080/15623599.2021.1970300

8. Pittau F., Malighetti L.E., Iannaccone G., Masera G. Prefabrication as large-scale efficient strategy for the energy retrofit of the housing stock: An Italian case study // Procedia Engineering. 2017. Vol. 180. Pp. 1160–1169. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.276

9. Cao J., Zhao P., Liu G. Optimizing the production process of modular construction using an assembly line-integrated supermarket // Automation in Construction. 2022. Vol. 142. P. 104495. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104495

10. Chatzimichailidou M., Ma Y. Using BIM in the safety risk management of modular construction // Safety Science. 2022. Vol. 154. P. 105852. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105852

11. Arashpour M., Kamat V., Bai Y., Wakefield R., Abbasi B. Optimization modeling of multi-skilled resources in prefabrication: Theorizing cost analysis of process integration in off-site construction // Automation in Construction. 2018. Vol. 95. Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.07.027

12. Олейник П.П. Индустриально-мобильные методы возведения предприятий, зданий и сооружений : монография. М. : Изд-во АСВ, 2021. 488 с.

13. Shin J., Moon S., Cho B., Hwang B., Choi B. Extended technology acceptance model to explain the mechanism of modular construction adoption // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 342. P. 130963. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130963

14. Bhandari S., Riggio M., Jahedi S., Fischer E.C., Muszynski L., Luo Z. A review of modular cross laminated timber construction: Implications for temporary housing in seismic areas // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 63. P. 105485. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105485

15. Сычев С.А. Высокотехнологичный монтаж быстровозводимых трансформируемых зданий в условиях Крайнего Севера : монография. СПб. : СПбГАСУ, 2017. 353 с.

16. Шепелева Е.А., Шепелев А.Л. Организация строительства производственных объектов комплексно-блочным методом. Архангельск : САФУ, 2013. 139 с.

17. Сычев С.А. Методика вариантного проектирования технологий возведения зданий и сооружений из модулей заводской готовности // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5 (52). С. 119–125.

18. Казачун Г.У. Типы жилых зданий. Ростов н/Д : Феникс, 2011. 398 с.

19. Goh M., Goh Ya.M. Lean production theory-based simulation of modular construction processes // Automation in Construction. 2019. Vol. 101. Pp. 227–244. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.12.017

20. Олейник П.П. Научно-технический прогресс в строительном производстве : монография. М. : Изд-во АСВ, 2019. 442 с.

21. Рыбакова А.О. Оценка эффективности проектирования на основе модульных элементов максимальной готовности // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 3. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.3.9

Поступила в редакцию 12 декабря 2022 г.

Принята в доработанном виде 7 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 9 марта 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Павел Павлович Олейник — доктор технических наук, профессор кафедры технологий и организации строительного производства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 399946, Scopus: 10043771900, ResearcherID: X-4463-2019, ORCID: 0001-8425-2974; spiomtp@mail.ru;

Лилия Алексеевна Пахомова — старший преподаватель, аспирант кафедры технологий и организации строительного производства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1035400, Scopus: 57205446200, ORCID: 0002-1347-3355; liliya_7172@mail.ru.

Вклад авторов:

Олейник П.П. — научное руководство, формирование методологии моделирования параметров, подготовка выводов, написание текста.

Пахомова Л.А. — анализ состояния проблемы, исследование технологических процессов, разработка этапов моделирования, установление оценок параметров, написание текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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 ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников *на русском языке* оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников *на английском языке* (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 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 языке

¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

В **ionotes**: **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

032146430000000017300

(ИНН получателя платежа)

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

БИК004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК

000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.

подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2023 г.

Вестник МГСУ

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

за

Сумма

платежа

6 880

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

032146430000000017300

(ИНН получателя платежа)

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

БИК004525988

(наименование банка получателя платежа)

КБК

000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.

подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2023 г.

Вестник МГСУ

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

за

Сумма

платежа

6 880

руб.

00

коп.

услуги

руб.

коп.

Итого

руб.

коп.

«

»

20

г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

