

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 19 Выпуск 10/2024
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 19. Выпуск 10
2024**

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

Сквозной номер 191

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 19. Issue 10
2024**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	28.10.2024.
Подписан в свет	31.10.2024.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,52. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 326

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Дизайн и верстка: *Алина Юрьевна Байкова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	31.10.2024

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

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

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

М.Ю. Гайдук, А.С. Холманских
Реновация промышленных территорий в структуре сельских поселений (на примере керамического завода в д. Нижние Таволги) 1591

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

В.В. Надольский
Коэффициенты надежности для стальных элементов, проектируемых на основе компьютерных численных моделей 1606

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

М.Г. Ковалев, В.А. Швецова
Исследование свойств химического анкера на основе эпоксидной смолы 1617
Ю.В. Бикаева, Р.А. Ибрагимов, И.Д. Твердов
Структура и свойства магнезиального камня, полученного активацией каустического доломита 1629

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А.З. Тер-Мартirosян, Ч.М. Тхием
Теоретические основы количественной оценки расширения лидирующей скважины щебеночной буронабивной сваи в нелинейной постановке 1641

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Л. Торопов
Санитарно-гигиенические вопросы при проектировании индивидуальных систем теплоснабжения 1651

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.А. Латидус, А.Ю. Щукин
Применение функционально ориентированных систем моделирования при осуществлении строительного контроля 1666
Н.В. Розанцева, В.В. Золотарев
Формирование эффективного графика производства работ при строительстве монолитного железобетонного дома 1676
А.С. Павлов, Р.В. Островский
Методика расчета резервов времени при планировании продолжительности сооружения АЭС 1687
Д.Н. Коротких, О.А. Корнев, В.В. Белов, А.С. Силантьев, Д.Е. Капустин
Обзор опыта возведения АЭС с применением модульных конструкций с внешним листовым армированием 1696
Требования к оформлению научной статьи 1713

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Maria Yu. Gaydouk, Alice S. Holmanskih
Renovation of industrial areas in the structure of rural settlements (on the example of the ceramic factory in the village of Nizhnie Tavolgi) 1591

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

Vitali V. Nadolski
Reliability factors for steel elements designed on the basis of computer numerical models 1606

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Mikhail G. Kovalev, Victoria A. Shvetsova
Investigation of properties of chemical anchor on the basis of epoxy resin 1617
Yuliya V. Bikaeva, Ruslan A. Ibragimov, Iliya D. Tverdov
Structure and properties of magnesia stone obtained by activation of caustic dolomite 1629

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Armen Z. Ter-Martirosyan, Tran Manh Thiem
Theoretical basis for quantitative evaluation of the expansion of the leading hole of a crushed stone bored pile in a nonlinear setting 1641

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Alexey L. Toropov
Sanitary and hygienic issues in the design of individual heat supply systems 1651

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION.
ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Azariy A. Lapidus, Aleksei Yu. Shchukin
Application of function-oriented modelling systems in construction control implementation 1666
Nadezhda V. Ryazantseva, Vladimir V. Zolotarev
Formation of an effective schedule of work during the construction of a monolithic reinforced concrete house 1676
Alexander S. Pavlov, Roman V. Ostrovskii
Methodology of calculation of time reserves when planning the duration of NPP construction 1687
Dmitrii N. Korotkikh, Oleg A. Kornev, Vyacheslav V. Belov, Alexander S. Silantiev, Dmitrii E. Kapustin
Review of experience in the construction of NPP using modular structures with external sheet reinforcement 1696
Requirements for research paper design 1713

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 72.035

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1591-1605

Реновация промышленных территорий в структуре сельских поселений (на примере керамического завода в д. Нижние Таволги)

Мария Юрьевна Гайдук, Алиса Станиславовна Холманских

Тюменский индустриальный университет (ТИУ): г. Тюмень, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Реновация сохранившихся исторических промышленных территорий имеет большое значение как для развития сельских поселений, так и для региона в целом, где сохранилось значительное количество ныне малоиспользуемых и заброшенных предприятий периода XIX – начала XX в. Основная цель данного исследования — представить пример комплексного подхода к вопросу реновации территории, включающий все основные этапы от предпроектного и проектного анализа до разработки проектного предложения.

Материалы и методы. Изучение территории проектирования и объектов основывается на комплексном подходе, включающем анализ и использование советских и современных архивных, библиографических источников; сборе и обработке документов, графических и фотоматериалов, результатов натурного обследования (фотофиксация, обмеры); систематизации научно-исследовательских результатов.

Результаты. Целесообразность сохранения и практического использования промышленных предприятий проиллюстрирована на примере разработанного проектного предложения по реновации территории керамического завода в д. Нижние Таволги Свердловской области. Представлены возможные варианты функционального обновления объектов заводского комплекса под современные условия развития сельских поселений.

Выводы. Исследование, популяризация значимых объектов, формирующих архитектурный облик поселений, и включение их в современные реалии представляется важным и необходимым процессом как для создания разнообразной качественной среды, формирования идентичности места, так и просвещения в области отечественной истории и культуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: архитектура, сохранение наследия, промышленная архитектура, керамический завод, Нижние Таволги, сельские поселения Свердловской области

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гайдук М.Ю., Холманских А.С. Реновация промышленных территорий в структуре сельских поселений (на примере керамического завода в д. Нижние Таволги) // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 10. С. 1591–1605. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1591-1605

Автор, ответственный за переписку: Мария Юрьевна Гайдук, mary.gaydouk@mail.ru.

Renovation of industrial areas in the structure of rural settlements (on the example of the ceramic factory in the village of Nizhnie Tavolgi)

Maria Yu. Gaydouk, Alice S. Holmanskih

Industrial University of Tyumen (IUT); Tyumen, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Renovation of preserved historical industrial territories is of great importance both for the development of rural settlements and regions as a whole, where a large number of currently underutilized and abandoned enterprises of the period of XIX – early XX centuries have been preserved. The main objective of this study is to present an example of a comprehensive approach to the issue of territory renovation, including all the main stages from pre-project and design analysis to the development of a project proposal.

Materials and methods. The study of the design territory and objects is based on a comprehensive approach, including the analysis and use of Soviet and modern archival and bibliographic sources; collection and processing of documents, graphic and photographic materials, results of field survey (photo-fixation, measurements); systematization of research results.

Results. The expediency of preservation and practical use of industrial enterprises is illustrated on the example of the developed project proposal for the renovation of the ceramic factory complex in the village of Nizhnie Tavolgi, Sverdlovsk region. The research materials present the prospects of their functional renewal and renovation in the modern conditions of rural settlements development.

Conclusions. The research, popularization of significant objects that form the architectural appearance of settlements and their inclusion in modern realities is an important and necessary process both for the creation of a diverse quality environment, formation of place identity and education in the field of national history and culture.

KEYWORDS: architecture, heritage preservation, industrial architecture, ceramic factory, Nizhniye Tavolgi, rural settlements of the Sverdlovsk region

FOR CITATION: Gaydouk M.Yu., Holmanskih A.S. Renovation of industrial areas in the structure of rural settlements (on the example of the ceramic factory in the village of Nizhnie Tavolgi). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1591-1605. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1591-1605 (rus.).

Corresponding author: Maria Yu. Gaydouk, mary.gaydouk@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс реновации заводских территорий становится все более актуальным в условиях стремления к устойчивому развитию, эффективному использованию городского и сельского пространства и сохранению исторического наследия. Такой подход позволяет не только сохранять здания с исторической и архитектурной значимостью, но и «вдохнуть» в них новую жизнь, адаптируя под нужды современного общества и экономики [1, 2].

В последней четверти XX в., когда страны Европы начали переходить к постиндустриальному обществу, они стали уделять особое внимание сохранению индустриального наследия. За эти десятилетия эксперты накопили уникальный опыт в области выявления, исследования, охраны и адаптации объектов индустриального наследия, который может быть использован и в процессе создания программ развития исторически сложившихся промышленных регионов России [3, с. 67–75].

В настоящее время в России возрастает интерес к объектам промышленного наследия, примеры индустриально-промышленных объектов располагаются не только в больших городах, но и в исторических поселениях [4].

История керамики берет начало с древних времен и, продолжаясь тысячелетия, существует до сих пор. Первые следы керамических изделий были обнаружены в период неолита. В древних цивилизациях, таких как Египет, Месопотамия, Китай, керамика играла важную роль в повседневной жизни, здесь развивались технологии лепки, глазурования и обжига глиняных изделий.

В Средние века в Европе началось производство керамических изделий для потребностей широких слоев населения. Популярными стилями стали майолика и фаянс. В Китае появился фарфор, изысканный и дорогостоящий материал, который пользовался популярностью в Европе и других частях света [5].

В Российской империи в начале XIX в. запустились заводы Попова, братьев Корниловых, Батенина и другие, а также многочисленные мелкие заводы и мастерские. Широкое распространение получила и мелкая фарфоровая пластика с национальной жанровой тематикой.

Во второй половине XIX в. можно отметить большой скачок развития керамической промышленности, но снизились технологические и художественные показатели изделий. В связи с развитием такого стиля, как модерн, на рубеже XIX–XX вв. оживился творческий и художественный поиск керамистов.

Начиная с 50-х гг. XX в., в промышленной керамике наблюдалось активное стремление к функциональности назначения предмета: изделия обладали рациональной простотой форм и отвечали общему запросу тех времен. Декоративная керамика, напротив, являлась синтезом разнообразных техник, отражающих направления эпохи [6].

В 60-х гг. XX в. функциональность керамических изделий отошла на второй план, наблюдался отказ от рациональности, который привел керамистов к заводским станковым формам. Огромный вклад в развитие художественной росписи декоративных сосудов и создание монументальных панно внесли крупнейшие мировые художники и архитекторы, такие как: П. Пикассо, Ф. Леже, А. Гауди и др.

В настоящее время керамика является неотъемлемой частью как искусства, так и технической сферы. Благодаря открытию новых технологий, а соответственно появлению новых материалов, керамика становится все более разнообразной и функциональной. Если самая ранняя керамика использовалась как домашняя утварь из глины или бытовые предметы, то в настоящее время она применяется как художественный, индустриальный и строительный материал.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

История Невьянского края очень богатая, она берет начало в Российской империи. Деревни Нижние и Верхние Таволги образовались примерно в XVIII в. на р. Нейве, где было найдено месторождение красной глины, что послужило началом развития гончарных промыслов, прославивших Урал на всю страну. Деревня входила в состав Быньговской волости Екатеринбургского уезда.

Сейчас д. Нижние Таволги находится к северу от Екатеринбурга, к югу от Нижнего Тагила, в 14 км к северо-востоку от районного центра г. Невьянска и в 2 км от д. Верхние Таволги (рис. 1).

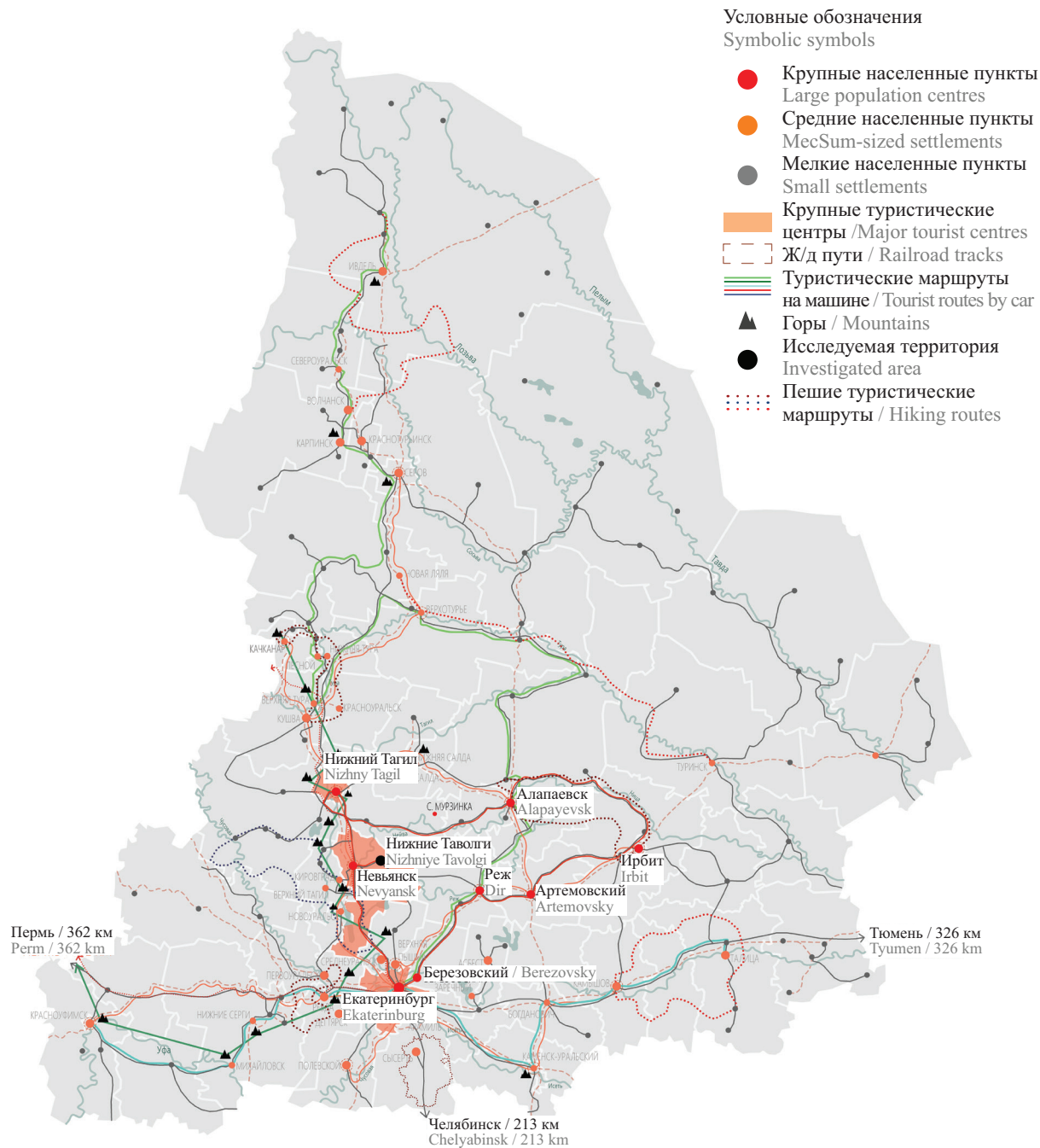


Рис. 1. Ситуационная схема. Исследуемый район в структуре каркаса Свердловской области

Fig. 1. Situation diagram. The studied area in the structure of the Sverdlovsk region

На Урале суровый климат, не располагающий к земледелию, поэтому после обнаружения богатых залежей красной и белой глины в устье р. Нейвы местные жители стали осваивать гончарное дело и зарабатывать этим на хлеб. Посуда из глины была прочнее и надежнее посуды из бересты, в ней можно было доставлять груз на дальние расстояния. В период XIX–XX вв. десятки семей промышляли гончарным делом, отправляя продукцию в Пермь, Екатеринбург, Невьянск, Нижний Тагил, а также на различные ярмарки, в том числе и на Ирбитскую ярмарку.

Более 300 лет развивался гончарный промысел на невянской земле. Одним из основных источников, фиксирующих существование керамических мастерских и заводов, являются уральские справочные издания XIX – начала XX вв., по которым можно проследить количественный состав гончарных мастерских и уровень развития керамического производства региона. По статистическим данным 1887 г. в Нижних Таволгах зафиксировано 59 мастерских, в которых трудились 108 человек [7].

Даже после Первой мировой войны гончарное ремесло не утратило своей актуальности, в начале

XX в. в окрестностях Невьянского района насчитывалось около 50 гончарных фабрик, половина из них располагалась в д. Нижние Таволги.

Новая экономическая политика СССР, безработица и разорение дореволюционных предприятий способствовали мощному подъему кустарных промыслов, которые впоследствии решили объединиться в одну производственную артель под названием «Гончар» [8].

К началу 1930-х гг. артель «Гончар» распалась, не выдержав темпа новой политики «пятилеток», но А.Е. Заворохин — организатор первой артели не хотел оставлять гончарное дело, долгие годы вместе со своими коллегами по цеху он экспериментировал, пытаясь создать керамику, отвечающую всем запросам того времени. Таким образом, спрос на нее в 30–40 гг. еще больше возрос, после этого в 1934 г. была организована артель «Новый путь», а в 1940 г. — кооперативная промыслово-производственная артель «Керамик» [9]. Однако спустя 15 лет, благодаря упорному труду Заворохина, обе артели «Новый путь» и «Керамик» были объединены. Так и появился «Невьянский завод художественной керамики», который базировался не только на создании промышленных и бытовых изделий, но и создавал уникальные керамические изделия, за их изготовление отвечала группа таволжских гончаров: Я.А. Жданов, Л.Л. Грошева, Н.А. Кузнецов, Е.А. Чебакова и др. (рис. 2).

На заводе трудились около 200 рабочих, на сегодняшний день завод прекратил свою деятельность в столь крупных масштабах, сейчас в штате сотрудников — 7 человек.

Исторически сформировавшиеся приемы и техники мастеров сделали продукцию завода индивидуальной и узнаваемой. Традиционной керамикой для Нижних Таволг является:

- 1) керамика с ангобной росписью методом фляндровки, разработанным в XX в.;
- 2) керамика с изумрудной глазуровкой, разработанная в XIX в.;
- 3) чернолощеная керамика, разработанная по рецепту XVIII–XIX вв.



Рис. 2. Коллектив завода в период СССР

Fig. 2. The staff of the plant in the USSR period

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предпроектный анализ

Деревня Нижние Таволги имеет хорошую транспортную доступность, ул. Куйбышева связывает с федеральной трассой 65К-1502000 и другими близлежащими населенными пунктами д. Верхние Таволги, д. Сербишино. В деревне слабо развита транспортная инфраструктура, только центральная улица имеет асфальтовое покрытие и практически отсутствуют пешеходные тротуары. Однако в деревне функционирует общественный транспорт и есть автобусные остановки (Нижние Таволги – 1, Нижние Таволги – 2, Нижние Таволги – 3). В непосредственной близости к деревне находится г. Невьянск, в котором есть железнодорожный вокзал, а также автостанция (рис. 3).

Застройка д. Нижние Таволги по большей мере представлена жилыми усадьбами, представляющими историко-архитектурную ценность, как примеры характерного типа региональной архитектуры. Территория проектирования расположена на окраине поселения, застройка представлена двумя складскими объектами, Невьянским заводом художественной керамики, двумя жилыми гостевыми домами, баней, сценой для мероприятий.

В рамках исследования была проведена работа по изучению среды поселения с разных ее аспектов. Территория площадью 9677 м² представляет собой холмистый ландшафт с плавным спуском к реке. Фотофиксация территории керамического завода произведена в летнее и зимнее время для оценки возможностей использования территории в разное время года, а также для составления различных сценариев предлагаемой функциональной концепции (рис. 4).

Натурные исследования территории керамического завода позволили выявить несколько функциональных зон:

- входная группа с небольшой зоной отдыха;
- выставка уральских минералов с тотемом в центре;
- территория завода с техническими помещениями;



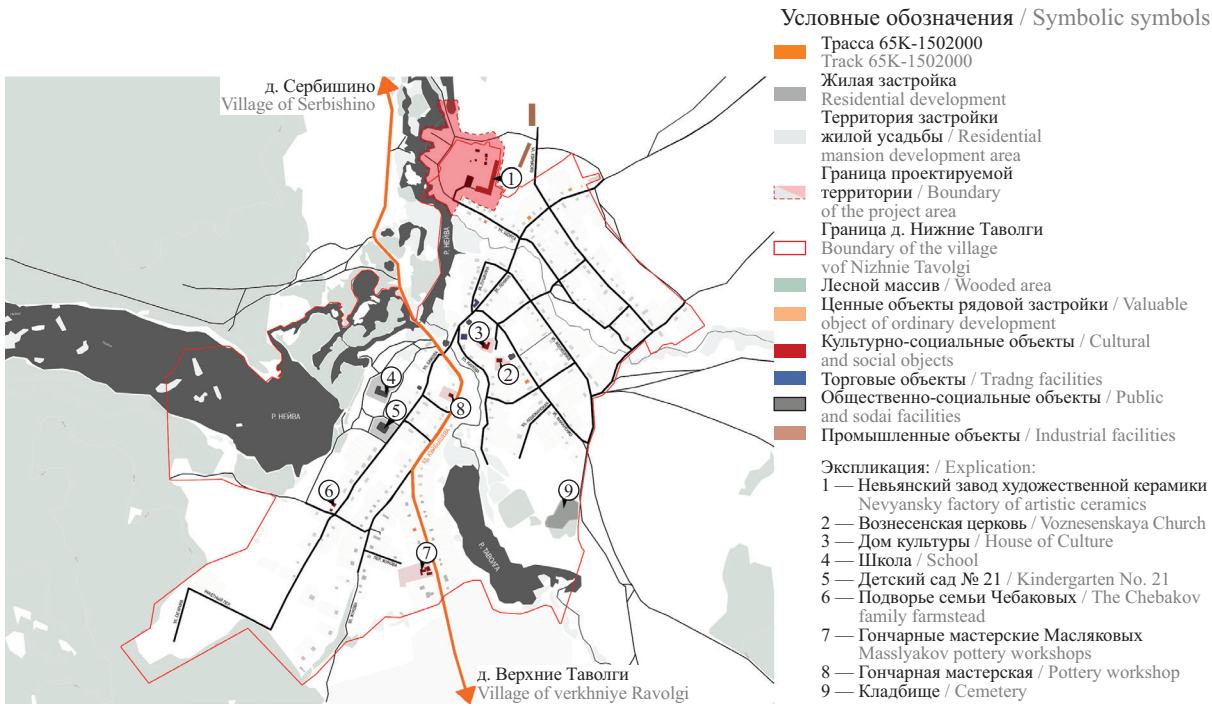


Рис. 3. Опорный план д. Нижние Таволги

Fig. 3. Reference plan of Nizhnie Tavolgi village

- гостевые дома с банnym комплексом;
 - пляжная зона у р. Нейвы.

Проведенные натурные исследования дали возможность определить недостатки:
- неудовлетворительное состояние качества объектов и исследуемой территории;
 - отсутствие четкого функционального зонирования территория, инфраструктуры для развития





Рис. 4. Фотофиксация территории завода: *a* — главный вход на территорию; *b* — выставка уральских минералов; *c* — территория завода со стороны гостевого комплекса; *d* — береговая зона р. Нейвы; *e* — летняя сцена; *f* — гостевой домик; *g* — банный комплекс; *h* — техническая зона

Fig. 4. Photofixation of the territory of the plant: *a* — main entrance to the territory; *b* — exhibition of Ural minerals; *c* — territory of the plant from the side of the guest complex; *d* — coastal zone of the Neiva River; *e* — summer stage; *f* — guest house; *g* — bath complex; *h* — technical zone

как в промышленном направлении, так и в туристской отрасли.

В ходе исследований установлены и достоинства территории: богатое историко-культурное наследие края, наличие уникального природного ландшафта, безотходное уникальное производство.

На основе выявленных недостатков и достоинств территории разработаны проектные предложения, направленные на создание комфортной, доступной, современной среды, направленной на возобновление работы завода по его первоначальному назначению, а также развитие инфраструктуры заводской территории под запросы туристской отрасли.

Перепрофилирование промышленных зданий в различные музейные, художественные, развлекательные и деловые центры — тенденция, получившая за последние полвека широкое распро-

странение во всем мире [10, 11]. Яркие примеры применения такого подхода к промышленным территориям как в зарубежной, так и в отечественной практике приведены на рис. 5.

Основываясь на предпроектных исследованиях и анализе аналогов, определены и разработаны основные принципы пространственной организации территории, нашедшие отражение в проектном предложении.

Проектное предложение

В рамках реновации территория Невьянского завода художественной керамики была разделена на несколько функциональных зон:

- заводская территория;
- ландшафтный парк, включающий пешеходный бульвар;
- этнодеревня;



Рис. 5. Здание бывшей электростанции — галерея Tate Modern, г. Лондон, Англия (*a*); многофункциональный район HafenCity, г. Гамбург, Германия [12] (*b*); дизайн-завод «Фабрика», г. Москва, Россия [16] (*c*); Севкабель Порт, г. Санкт-Петербург, Россия [13–15] (*d*)

Fig. 5. Former power station building — Tate Modern Gallery, London, England (*a*); HafenCity mixed-use neighborhood, Hamburg, Germany [12] (*b*); design Factory “Fabrika”, Moscow, Russia [16] (*c*); Sevkaabel Port, St. Petersburg, Russia [13–15] (*d*)



Рис. 6. Генеральный план территории проектирования: 1 — завод; 2 — амфитеатр; 3 — центральная площадь завода и бульвар; 5 — Таволжские сады; 6 — ландшафтный парк; 7 — визит-центр; 13 — гостиничный комплекс; 14 — ресторан; 15 — этнодеревня; 16 — банный комплекс (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 6. Master-plan of the project area: 1 — factory; 2 — amphitheatre; 3 — central square of the factory and boulevard; 5 — Tavolzhskie Gardens; 6 — landscape park; 7 — visit centre; 13 — hotel complex; 14 — restaurant; 15 — ethno-village; 16 — bath complex (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmanskih, supervisor M.Yu. Gaydouk)



Рис. 7. Концептуальная объемно-пространственная схема (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 7. Conceptual volumetric and spatial scheme (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmanskih, supervisor M.Yu. Gaydouk)

- гостиничный и банный комплексы;
- ресторанный комплекс.

Функциональное наполнение выделенных зон зависит от времени года и решено с учетом региональных особенностей. Центром проектируемой территории является один из сохранившихся корпусов керамического завода советской эпохи (рис. 6).

В проектном предложении решается проблема функционального зонирования территории и наполнения объектами, формирующими комфортную среду (рис. 7). Входная группа сформирована визит-центром, гостевой парковкой, автобусной парковкой для туристических групп. В визит-центре гости могут получить обзорную информацию о комплексе, навигацию по территории. Для гостей, приехавших на несколько дней, предусмотрен трансфер, который доставит багаж и посетителей в место назначения — данный факт позволяет сохранить экологическую составляющую территории, исключив личный транспорт с рекреационной территории.

В проектных предложениях авторами предлагается реконструкция существующего корпуса керамического завода: разработана новая планировочная структура завода, отвечающая современным требованиям, нормам пожарной безопасности и осуществлению непрерывных технологических процессов, а также для организации досуговых мероприятий для туристов — мастер-классы, лекции, коворкинг-зоны и другое (рис. 8, 9) [16, 17].

Проектом предусмотрен вариант реконструкции фасадов с применением керамического кирпича (рис. 10, 11). Объемная композиция дополнена трубами — характерный элемент промышленной архитектуры XIX–XX вв. как в утилитарных целях, так и для усиления образной составляющей комплекса.

Проектное планировочное решение разделяет здание завода на гостевую и рабочую зоны, благодаря чему завод может функционировать, совмещая множество процессов различного характера. Экскурсии, мастер-классы, выставки, фестивали могут проводиться параллельно с основной функцией завода, не нарушая технологический процесс создания неповторимой уральской керамики.

Территория предлагаемого комплекса гармонично взаимодействует с природным ландшафтом, который дополняется скульптурными композициями и арт-объектами, отражающими общую тематику керамического завода. Особое внимание уделено амфитеатру на месте полуразрушенного одного из заводских корпусов. Амфитеатр сочетает в себе функцию арт-объекта и локации для проведения мероприятий, сохраняя при этом дух места (рис. 12, 13).

Амфитеатр может использоваться как в летнее время в качестве теневого острова и сцены для представлений, так и в зимнее время — павильон для организации ярмарки (рис. 14).

В рамках развития туристской привлекательности территории керамического завода проектом предполагается создание гостиничного комплекса

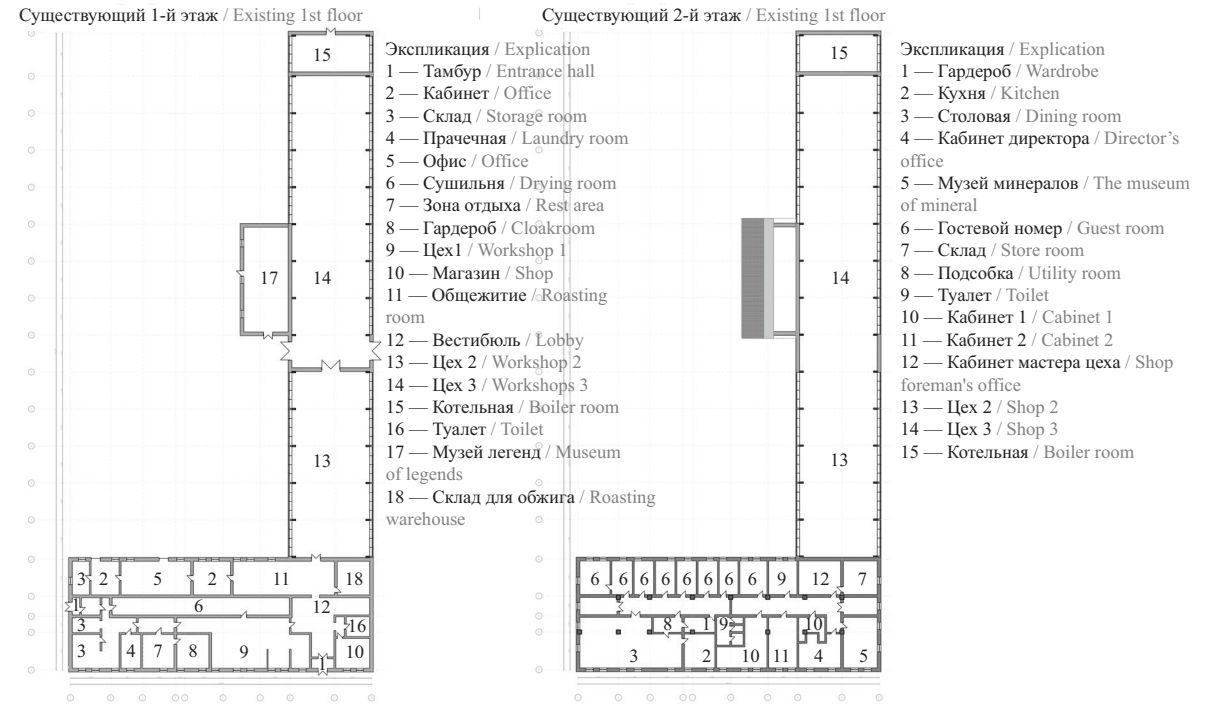


Рис. 8. План 1-го, 2-го этажей корпуса завода до реконструкции (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 8. Plan of the 1st, 2nd floors of the factory building before reconstruction (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmanskih, supervisor M.Yu. Gaydouk)

с рестораном у р. Нейвы (рис. 15). Комплекс включает ресторан с небольшой террасой у реки; спуск к реке, который продолжается экотропами; а также два типа гостевых домиков, рассчитанных на разное количество посетителей.

Площадка ресторана и гостиничного комплекса взаимодействует с плавными линиями пешеходных троп, растянутых вдоль берега, окаймленными растительными насаждениями, создавая впечатления лесной аллеи. Пешеходные тропы, выполненные деревянным дощатым мощением, ведут к смотровым площадкам, с которых открываются впечатляющие видовые перспективы на комплекс. Тропы приводят к гостевому и банному комплексам, этнодеревне, таким образом «закольцовывая» пространство.

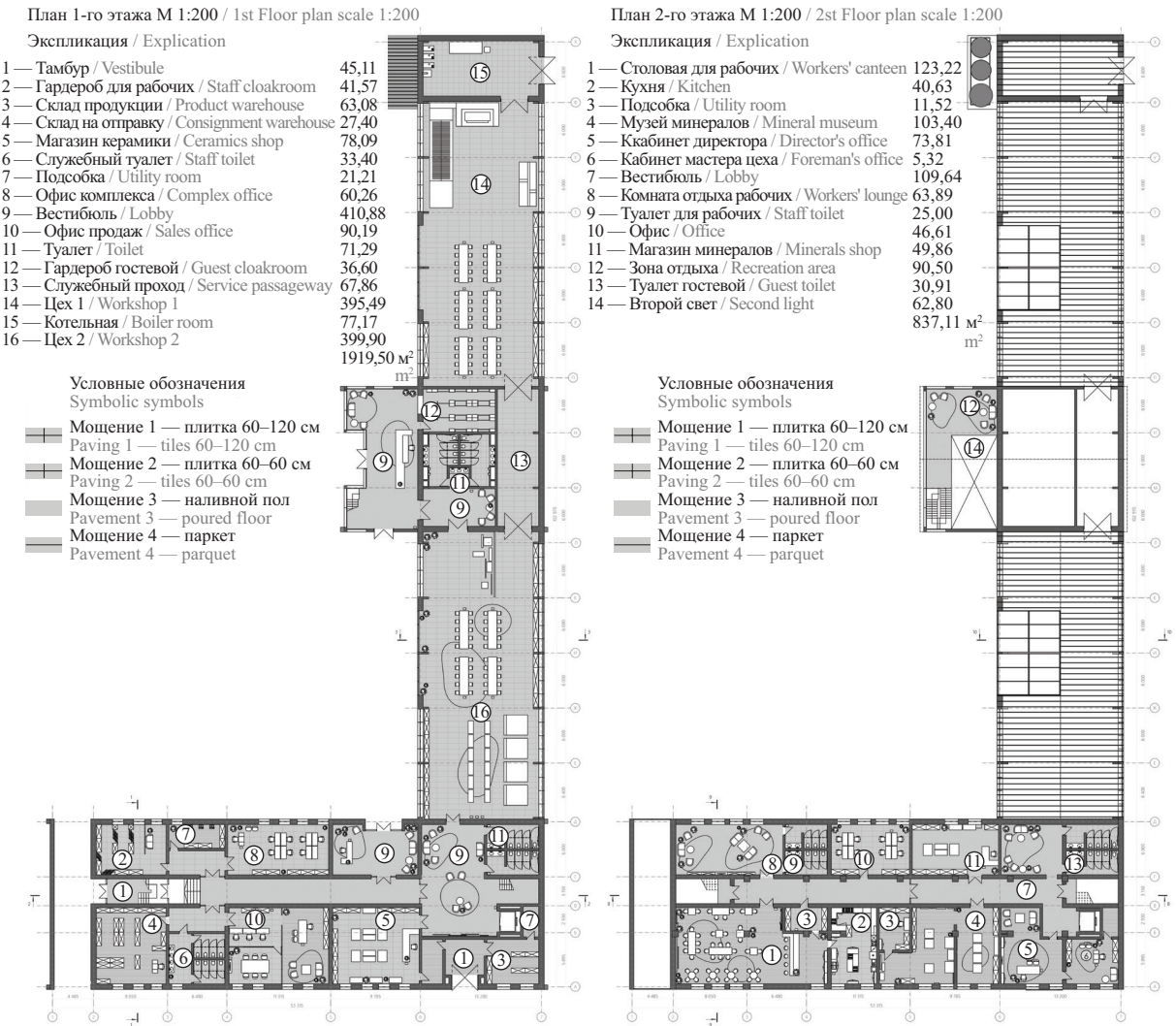
Проектом предусмотрен свободный доступ к реке в различных зонах, одна из площадок зимой превращается в зону активного отдыха для детей и их родителей — катание с горок, каток (рис. 16).

В состав гостевого дома входят основные, необходимые для организации досуга помещения: компактная кухня, гостиная с электрическим камином, спальня, ванная комната и выход на террасу. Есть ва-

рианты гостевых домов с сауной и собственной террасой, с которой организован спуск к воде (рис. 17). В центре гостевого комплекса расположена детская площадка для гостей с детьми.

Проектом предусмотрены разные типы гостиничных комплексов: современные жилые дома с комфортными условиями для отдыха и исторические дома, расположенные в этнодеревне, позволяющие погрузиться в историю, познакомиться с культурой и бытом наших предков [18–20]. Этнодеревня представлена двумя типами усадебных комплексов: первый — демонстрационная усадьба-музей, второй — жилая усадьба. Усадьбы оснащены необходимыми удобствами для комфортного проживания, все убранство в избах отражает жизнь крестьян XVIII–XIX вв. (рис. 18).

По всей территории завода осуществляется трансфер для перевозки гостей с багажом, а также для технического обслуживания объектов (ресторан, банный и гостиничный комплексы, объекты этнодеревни). Транспортная система внутри комплекса разработана с учетом комфортного тихого отдыха на природе, поэтому все асфальтированные дороги проходят до границ комплекса, дорога для трансфера выполнена с по-



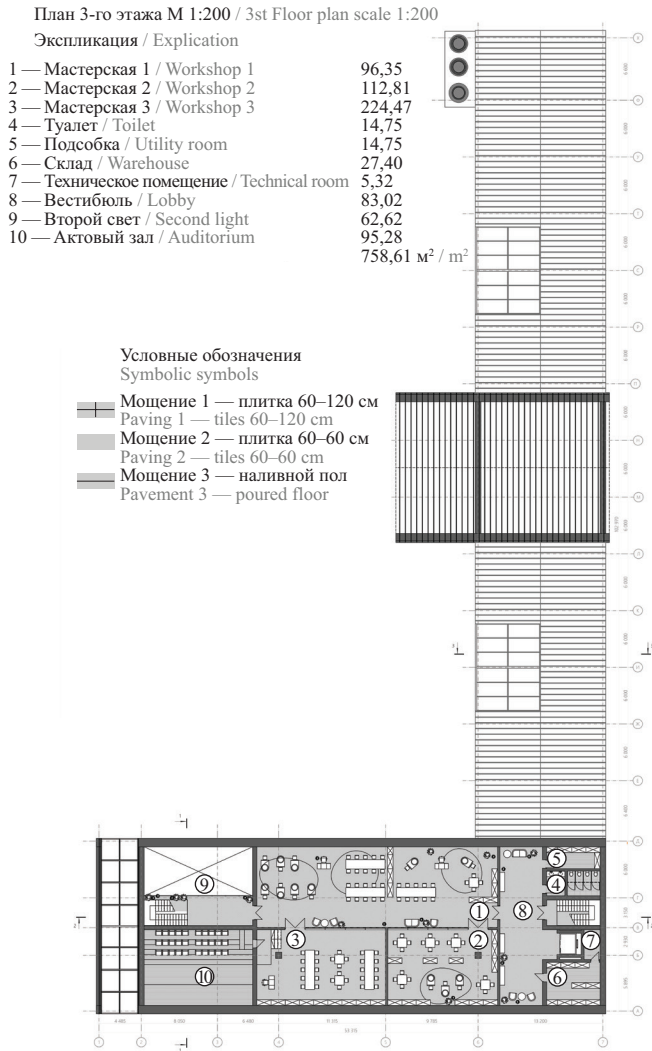


Рис. 9. План 1-го, 2-го мансардного этажей корпуса завода после реконструкции (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 9. Plan of the 1st, 2nd, attic floors of the plant building after reconstruction (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmanskih, supervisor M.Yu. Gaydoug)

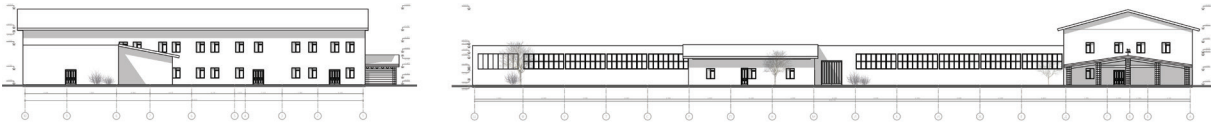


Рис. 10. Фасады корпуса завода до реконструкции (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 10. Facades of the factory building before reconstruction (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmanskih, supervisor M.Yu. Gaydoug)



Рис. 11. Фасады корпуса завода после реконструкции (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 11. Facades of the factory building after reconstruction (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmanskih, supervisor M.Yu. Gaydoug)

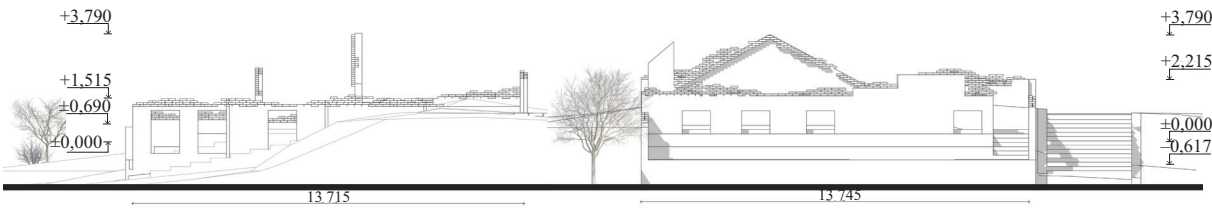


Рис. 12. Фасады амфитеатра на руинах до реконструкции (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 12. The facades of the amphitheatre on the ruins before reconstruction (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmanskih, supervisor M.Yu. Gaydouk)

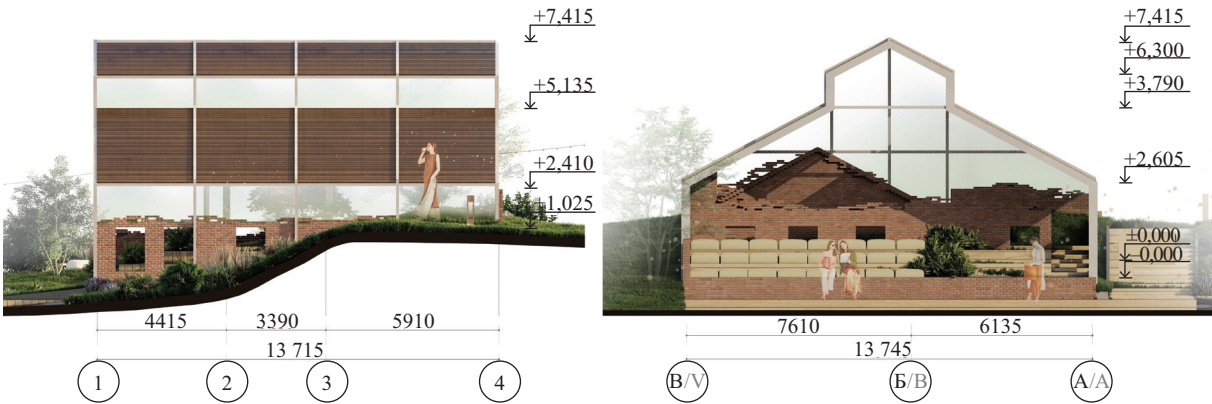


Рис. 13. Фасады амфитеатра на руинах после реконструкции (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 13. The facades of the amphitheatre on the ruins after reconstruction (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmanskih, supervisor M.Yu. Gaydouk)

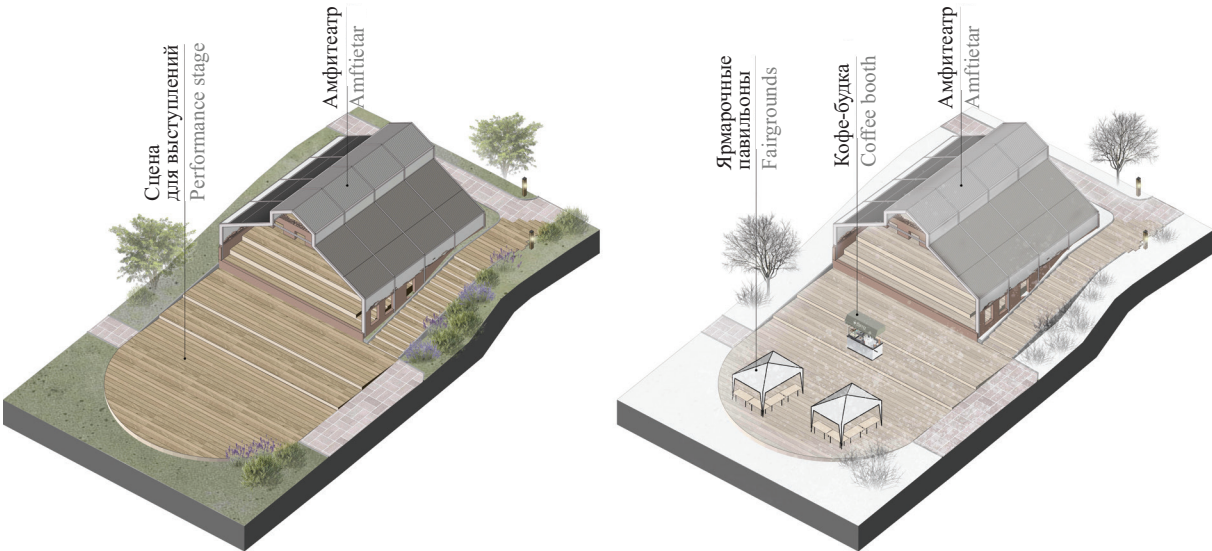


Рис. 14. Амфитеатр. Варианты использования в летнее и зимнее время (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 14. Amphitheatre. Summer and winter use options (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmanskih, supervisor M.Yu. Gaydouk)



Рис. 15. Перспективный вид на ресторан (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 15. Perspective view of the restaurant (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmanskih, supervisor M.Yu. Gaydouk)

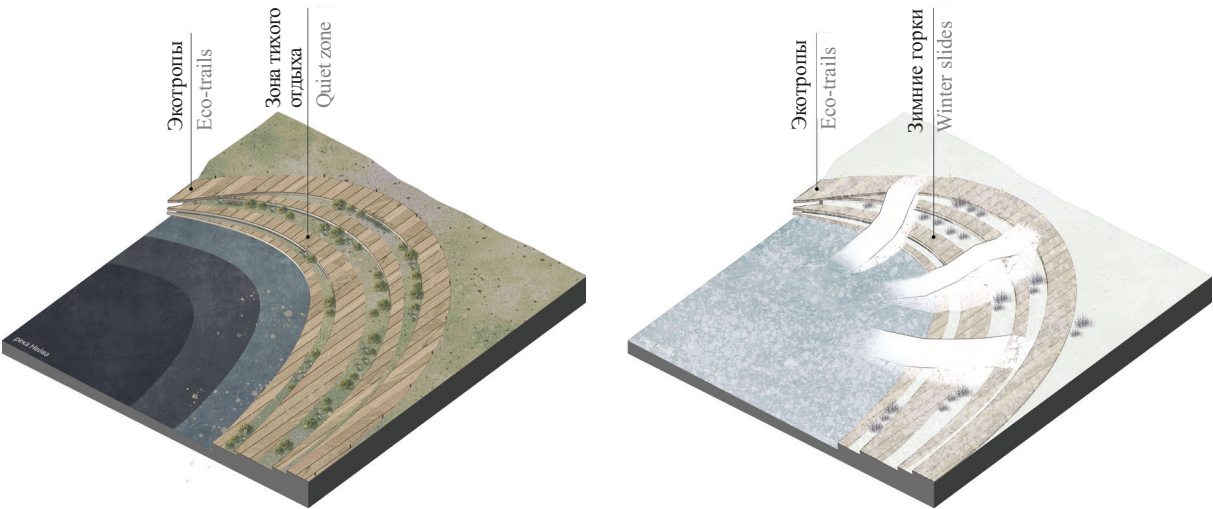


Рис. 16. Спуск к реке. Варианты использования в летнее и зимнее время года (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 16. Descending to the river. Options for use in summer and winter seasons (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmanskih, supervisor M.Yu. Gaydouk)



Рис. 17. Общий вид на гостиничный комплекс (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 17. General view of the hotel complex (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmanskih, supervisor M.Yu. Gaydouk)

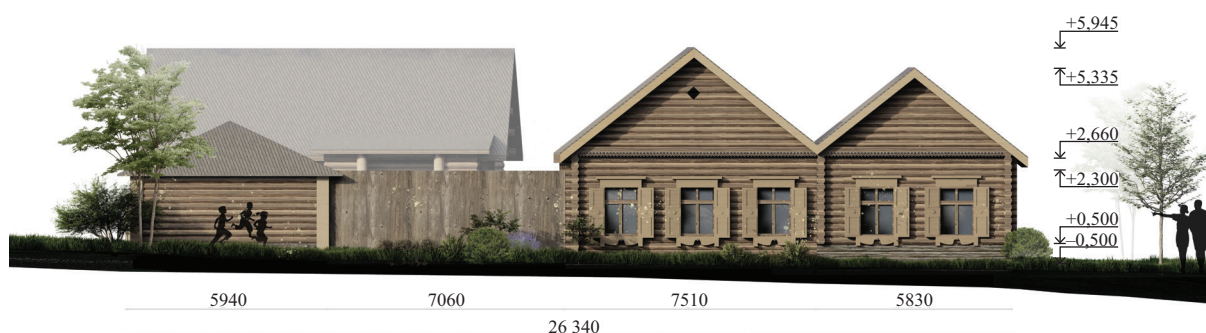


Рис. 18. Вариант одной из усадеб в этнодеревне (проектное предложение ТИУ АРХИД, автор — А.С. Холманских, руководитель — М.Ю. Гайдук)

Fig. 18. A variant of one of the estates in the ethno-village (project proposal of IUT ARHID — author A.S. Holmansikh, supervisor M.Yu. Gaydouk)

мощью укрепленного мощения и предназначена только для внутреннего специализированного транспорта.

На основании результатов предпроектного исследования было сформировано проектное предложение, в рамках которого решены следующие проблемы:

- разработан новый функциональный каркас территории, который тактично взаимодействует с естественным ландшафтом;
- предусмотрена инфраструктура, отвечающая на главные запросы туристской отрасли (комфортные условия пребывания, обширная программа посещения комплекса с различными сценариями);
- проведена реконструкция керамического завода (предложены объемно-планировочные и архитектурно-художественные решения).

Решения поставленных задач позволили создать гармоничное и благоустроенное общественное пространство. Все действия, направленные на развитие данного комплекса, благоприятно отразятся и на д. Нижние Таволги, что в свою очередь повлечет рост экономического уровня края в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный вариант использования потенциала одного из сельских поселений на примере д. Нижние Таволги позволяет убедиться в целесообразности предлагаемых проектных решений, подчеркивает реальность их воплощения, демонстрирует возможность развития территорий на основе наследия, что обеспечивает высокую экономическую эффективность для региона в целом. Все факторы, отмеченные по результатам предпроектных исследований, подтверждают высокий потенциал рассматриваемой территории керамического завода и возможность развития территории по разнообразным направлениям туристской отрасли: культурно-познавательное, промышленно-индустриальное, рекреационно-оздоровительное. Формируя подобные ядра притяжения, туристская сеть региона расширяется, что обеспечивает разнообразие туристских впечатлений и позволяет выстроить многодневный туристский маршрут с учетом интересов различных потребителей, сохранять архитектурное наследие, а также историю и культуру края.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Celani A., Ciaramella A., Dettwiler P. Identification of vacant space; a prerequisite for industrial and societal development // CIB World Building Congress 2016 WBC16 “Creating built environments of new opportunities”. 2016. Vol. 1. Pp. 185–196.
2. Topchiy D., Yurgaytis A., Babushkin E., Zueva D. Construction supervision during capital construction, reconstruction and re-profiling // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 265. P. 07022. DOI: 10.1051/matec-conf/201926507022
3. Аванесов А.Д., Болобошко Д.С., Ланин Е.Б., Огурцов Г.К. Обзор отечественного и зарубежного опыта реновации производственных зданий // Научные исследования. 2017. № 1 (12). С. 98–100. EDN XIFYKT.
4. Цитман Т.О., Богатырева А.В. Реновация промышленной территории в структуре городской среды // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2015. № 4 (14). С. 29–35. EDN VMFWSL.
5. Муртазина С.А. Технология развития керамических изделий и материалов // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 16. С. 169–172. EDN UNGTMI.
6. Чарлыев С.Г., Мамедов Ы.А., Мырадов Б.Г. История развития и свойства керамических материалов и изделий // Вестник науки. 2024. Т. 3. № 3 (72). С. 502–505. EDN CQMCTD.
7. Шипицына О.А. История промышленного зодчества Урала: эволюция научных исследований //

История и современное мировоззрение. 2020. Т. 2. № 1. С. 67–75. EDN PWXIZW.

8. Белобородов С.А., Боровик Ю.В. Староверы горнозаводского Урала: страницы истории согласия беглопоповцев/часовенных XVIII – начала XX в. : монография. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2017. 382 с. EDN YVLIUQ.

9. Шабалина Н.М. Традиционные центры народного гончарства и изразцового производства на Южном Урале // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Социально-гуманитарные науки. 2010. № 28 (204). С. 114–121. EDN NBPRRB.

10. Semko O.V., Voskobiynik Ye.P. Analysis of the industrial objects renovation experience // ACADEMIC JOURNAL Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. 2017. Vol. 1. Issue 48. Pp. 226–237. DOI: 10.26906/znpr.2017.48.804

11. Малая Е.В. Возрождение предприятий легкой промышленности (на примере шелкоткацких фабрик Щелково) // Архитектура и современные информационные технологии. 2020. № 2 (51). С. 57–68. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15104. EDN GWSVHS.

12. Зима А.Г., Кожемяченко Ю.А. Прибрежные территории Гамбурга. Опыт реновации (1990–2010 годы) // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. № 7 (58). С. 7–10. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-7-7-10. EDN ZWERDZ.

13. Марьина Л.П., Амеличева Д.А. Медийные аспекты культурного наследия Санкт-Петербурга

в брендинге креативных пространств // Управление культурой. 2023. № 1 (5). С. 26–32. EDN CJDJWI.

14. Nefedov V., Stiglic M. European trends of industrial territories transformation and their manifestation in Saint Petersburg // World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 23. Issue 13. Pp. 70–73. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.pac.90015. EDN RFOVDJ.

15. Stieglitz M., Nefedov V. Refunctionalisation of industrial territories in Saint Petersburg // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning. 2016. Vol. 169. Issue 1. Pp. 30–42. DOI: 10.1680/udap.14.00026

16. Черкасов Г.Н. Архитектурные аспекты Москвы в XXI в. // Архитектура и современные информационные технологии. 2023. № 2 (63). С. 84–98. DOI: 10.24412/1998-4839-2023-2-84-98. EDN BZNRBK.

17. Морозова Е.Б. Типология производственных зданий и сооружений : учебно-методическое пособие. Минск : БНТУ, 2014. 154 с.

18. Бубнов Е.Н. Русское деревянное зодчество Урала. М. : Стройиздат, 1988. 183 с.

19. Долгов А.В., Митина Н.Н., Оленьков В.Д. Деревянное зодчество Урала. Свердловская область, Челябинская область. Екатеринбург. Сократ. 2012. 230 с.

20. Роднова О.Ю. Анализ деревянного зодчества Урала по критериям устойчивой архитектуры // Культура и экология — основы устойчивого развития России. Безальтернативность зеленой стратегии : сб. мат. Междунар. форума. 2021. С. 212–219. EDN WVEUMD.

Поступила в редакцию 12 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 17 августа 2024 г.

Одобрена для публикации 9 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Мария Юрьевна Гайдук — кандидат архитектуры, доцент кафедры дизайна архитектурной среды, Институт архитектуры и дизайна; Тюменский индустриальный университет (ТИУ); 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 927342, ResearcherID: HJB-0256-2022, ORCID: 0000-0003-1350-2504; mary.gaydouk@mail.ru;

Алиса Станиславовна Холманских — бакалавр, Институт архитектуры и дизайна; Тюменский индустриальный университет (ТИУ); 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; alice.xolmansckix2018@yandex.ru.

Вклад авторов:

Гайдук М.Ю. — научное руководство, концепция исследования, доработка текста статьи, итоговые выводы.

Холманских А.С. — сбор материалов, натурные исследования, разработка проектных материалов, текст статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Celani A., Ciaramella A., Dettwiler P. Identification of vacant space; a prerequisite for industrial and societal development. *CIB World Building Congress 2016 WBC16 "Creating built environments of new opportunities"*. 2016; 1:185–196.

2. Topchiy D., Yurgaytis A., Babushkin E., Zueva D. Construction supervision during capital construction,

reconstruction and re-profiling. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 265:07022. DOI: 10.1051/mateconf/201926507022

3. Avanesov A.D., Boloboshko D.S., Lanin E.B., Ogurtsov G.K. Review of domestic and foreign experience in the renovation of industrial buildings. *Scientific Research*. 2017; 1(12):98–100. EDN XIFYKT. (rus.).

4. Tsitman T.O., Bogatyreva A.V. Renovation of industrial territory in the structure of urban environment. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2015; 4(14):29-35. EDN VMFWSL. (rus.).
5. Murtazina S.A. Technology of development of ceramic products and materials. *Bulletin of Technological University*. 2015; 18(16):169-172. EDN UNGTMJ. (rus.).
6. Charlyev S.G., Mammadov Y.A., Myradov B.G. History of development and properties of ceramic materials and products. *Bulletin of Science*. 2024; 3(3):502-505. EDN CQMCTD. (rus.).
7. Shipitsyna O.A. History of Ural industrial architecture: evolution of scientific research. *History and Modern Perspectives*. 2020; 2(1):67-75. EDN PWXIZW. (rus.).
8. Beloborodov S.A., Borovik Yu.V. *Old Believers of the Mining Urals: pages from the history of the consent of the Beglopovovites/chapels of the 18th – early 20th centuries : monograph*. Ekaterinburg, Ural University Publishing House, 2017; 382. EDN YVLIUQ. (rus.).
9. Shabalina N.M. Traditional centers of folk pottery and tiled manufacture in South Ural. Bulletin of the South Ural State University. *Series: Social Sciences and the Humanities*. 2010; 28(204):114-121. EDN NBPRRB. (rus.).
10. Semko O.V., Voskobiynyk Ye.P. Analysis of the industrial objects renovation experience. *ACADEMIC JOURNAL Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2017; 1(48):226-237. DOI: 10.26906/znp.2017.48.804
11. Malaya E. Revival of light industry enterprises (on the example of silk-weaving factories in Shchelkovo). *Architecture and Modern Information Technologies*. 2020; 2(51):57-68. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15104. EDN GWSVHS. (rus.).
12. Zima A.G., Kozhemyachenko Yu.A. Hamburg coastal territories. Renovation experience (1990-2010). *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2021; 7(58):7-10. DOI: 10.24412/2500-1000-2021-7-7-10. EDN ZWERDZ. (rus.).
13. Maryina L.P., Amelicheva D.A. Media aspects of the cultural heritage of St. Petersburg in the branding of creative spaces. *Managing of Culture*. 2023; 1(5):26-32. EDN CJDJWI. (rus.).
14. Nefedov V., Štiglic M. European trends of industrial territories transformation and their manifestation in Saint Petersburg. *World Applied Sciences Journal*. 2013; 23(13):70-73. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.pac.90015. EDN RFOVDJ.
15. Stieglitz M., Nefedov V. Refunctionalisation of industrial territories in Saint Petersburg. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning*. 2016; 169(1):30-42. DOI: 10.1680/udap.14.00026
16. Cherkasov G.N. Architectural aspects of Moscow in the XXI century. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2023; 2(63):84-98. DOI: 10.24412/1998-4839-2023-2-84-98. EDN BZNRBK. (rus.).
17. Morozova E.B. *Typology of production buildings and structures: educational and methodical manual*. Minsk, BNTU, 2014; 154. (rus.).
18. Bubnov E.N. *Russian wooden architecture of the Urals*. Moscow, Stroyizdat, 1988; 183. (rus.).
19. Dolgov A.V., Mitina N.N., Olenkov V.D. *Wooden architecture of the Urals. Sverdlovsk region, Chelyabinsk region*. Ekaterinburg, Socrates, 2012; 230. (rus.).
20. Rodnova O.U. Analysis of the Ural wooden architecture by the criteria of sustainable architecture. Culture and ecology — the foundations of sustainable development of Russia. *There is no alternative to the green strategy : collection of materials from the International Forum*. 2021; 212-219. EDN WVEUMD. (rus.).

Received August 12, 2024.

Adopted in revised form on August 17, 2024.

Approved for publication on September 9, 2024.

B I O N O T E S : **Maria Yu. Gaydouk** — PhD in Architecture, Associate Professor, Department of Architectural Environment Design, Institute of Architecture and Design; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Valadarski st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 927342, ResearcherID: HJB-0256-2022, ORCID: 0000-0003-1350-2504; mary.gaydouk@mail.ru;

Alice S. Holmanskikh — bachelor, Institute of Architecture and Design; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Valadarski st., Tyumen, 625000, Russian Federation; alice.xolmanskix2018@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Maria Yu. Gaydouk — scientific supervisor, concept of the study, revision of the text, final conclusions.

Alice S. Holmanskikh — collection of materials, field research, development of project materials, text of article.

The authors declare that there is no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.046:624.014

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1606-1616

Коэффициенты надежности для стальных элементов, проектируемых на основе компьютерных численных моделей

Виталий Валерьевич Надольский^{1,2}

¹ Брестский государственный технический университет (БрГТУ); г. Брест, Республика Беларусь;

² Белорусский национальный технический университет (БНТУ); г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Сегодня для оценки несущей способности строительных конструкций все больше полагаются на компьютерные численные модели. Однако малое количество исследований затрагивает вопросы обеспечения надежности получаемых результатов. В существующей практике проектирования проектная надежность конструкций обеспечивается системой частных коэффициентов надежности, которые учитывают изменчивость случайных физических величин и точность модели. Поэтому важно закрепление значений коэффициентов надежности или методики их определения в нормах проектирования.

Материалы и методы. Предложенный метод установления коэффициентов надежности и их значения основаны на методе теории надежности первого порядка. Статистические характеристики случайных величин и метрики точности компьютерной модели (КМ) базируются на систематизации, анализе и обобщении имеющихся исследований.

Результаты. Представлена система коэффициентов надежности и методика их определения для изученных конструктивных решений и стандартизированных параметров КМ. Приведены результаты исследований статистических характеристик метрики точности КМ. Предложены значения коэффициентов пересчета, позволяющие учитывать разные модели материала, степень дискретизации и значения несовершенств.

Выводы. В области проектирования строительных конструкций следует выделить два крайних случая применения компьютерных численных моделей с позиции изученности моделируемого объекта (для новых конструктивных решений и для изученных конструктивных решений) и два крайних случая с позиции изученности параметров модели (применяются стандартизированные или нестандартизированные параметры КМ). В зависимости от рассматриваемого случая должны быть указаны процедуры проверки модели и назначены способы обеспечения проектной надежности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод конечных элементов (МКЭ), численная модель, компьютерная 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. Коэффициенты надежности для стальных элементов, проектируемых на основе компьютерных численных моделей // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 10. С. 1606–1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1606-1616

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

Reliability factors for steel elements designed on the basis of computer numerical models

Vitali V. Nadolski^{1,2}

¹ Brest State Technical University (BrSTU); Brest, Republic of Belarus;

² Belarusian National Technical University (BNTU); Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. Today, there is an increasing reliance on computer computational models to assess the load-bearing capacity of building structures. However, a very small number of studies address issues of ensuring the reliability of the obtained results. In the current design practice, the design reliability of structures is provided by a system of partial reliability factors that take into account the uncertainty of random variable and the accuracy of the model. Therefore, fixing the values of reliability factors or the methodology for determining them in the design standards is especially important.

Materials and methods. The proposed method for determining reliability factors and their values are based on the methods of reliability theory and probability theory. Statistical characteristics of random variables and accuracy of the computer model are based on the systematization, analysis and generalization of existing studies.

Results. The paper presents a system of reliability factors and a method for determining them for the studied construction solutions and standardized parameters of computer models. The results of studies of statistical characteristics of the measure of accuracy of computer models are presented. The values of conversion coefficients are proposed, which allow taking into account different models of the material, the degree of discretization and the values of imperfections.

Conclusions. In the field of design of building structures, two extreme cases of using computer numerical models from the position of knowledge of the studied object (for new structural solutions and for studied solutions) and two extreme cases from the position of knowledge of model parameters (validated (standardized) or non-validated (non-standardized) computer model parameters are used). Depending on the case under consideration, model verification procedures should be specified and ways to ensure design reliability should be assigned.

KEYWORDS: finite element method (FEM), numerical model, computer model, discretization, model error, design value, partial factor

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

FOR CITATION: Nadolski V.V. Reliability factors for steel elements designed on the basis of computer numerical models. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1606-1616. DOI: 10.22227/1997-0935. 2024.10.1606-1616 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня с целью оценки несущей способности строительных конструкций для сложных и новых конструктивных решений, а также хорошо изученных [1–10] все больше полагаются на компьютерные численные модели. Некоторые из исследований [11, 12] нацелены на разработку стандартизированного набора параметров компьютерных численных моделей, что облегчает создание моделей и позволяет закрепить принципы их формирования в нормах проектирования. Малое количество исследований касаются вопросов точности компьютерных моделей (КМ) и инструментов обеспечения и регулирования надежности конструкций, проектируемых с помощью компьютерных численных моделей.

Для исключения грубых ошибок и повышения достоверности компьютерных численных моделей рекомендуется выполнять следующие этапы проверки [13–17]:

1) верификацию программного обеспечения (ПО), направленную на исключение ошибок и минимизацию погрешностей до игнорируемого уровня в алгоритмах решения и программном коде для всей предполагаемой области применения ПО;

2) верификацию компьютерной модели, направленную на исключение ошибок и минимизацию погрешностей численного решения для рассматриваемого объекта моделирования и его условий эксплуатации;

3) валидацию компьютерной модели, направленную на:

- подтверждение *применимости* компьютерной модели для рассматриваемого конструктивного решения и его условий эксплуатации. Как правило, основывается на общих представлениях механики и физики, инженерных знаниях, опыте и суждениях;

- подтверждение *прогностической способности* компьютерной модели, т.е. способности модели предсказывать поведение элемента (график деформирования, формы отказа). Как правило, ос-

новывается на сравнении с эталонными данными (экспериментальными или существующими моделями, для которых уже доказана прогностическая способность);

- оценку *точности* (погрешности и неопределенности) компьютерной модели на основе сравнения с экспериментальными данными. В отдельных случаях, например при хорошо стандартизированных (формализованных) параметрах модели, оценка точности модели возможна на базе предыдущих исследований.

В существующей практике проектирования надежность конструкций обеспечивается системой частных коэффициентов надежности, которые учитывают изменчивость случайных физических величин (переменных параметров) и точность модели. После того как модель несущей способности и значения коэффициентов надежности внесены в нормы проектирования, у сообщества и проектировщика появляется уверенность в его действиях. Поэтому закрепление значений коэффициентов надежности или методики их определения в нормах проектирования важно [18, 19]. Можно утверждать, и это показано многими исследованиями, что компьютерные численные модели точнее, чем формульные [20–22], но это не отменяет необходимость учитывать статистические характеристики метрики (меры) точности при обеспечении надежности [23, 24]. По этой причине в настоящей работе уделено особое внимание обзору и анализу исследований, посвященных сравнению физических экспериментов и результатов компьютерного моделирования. При этом акцент сделан на выявление зависимостей между статистическими характеристиками метрики точности и набором параметров для КМ.

Цель исследования — научное обоснование значений коэффициентов надежности, применяемых к результатам компьютерных численных моделей. Предложенная система коэффициентов надежности

и методика их определения справедлива для конструкций из любого материала, но результаты исследования и выводы сделаны для стальных конструкций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В области проектирования строительных конструкций можно выделить два крайних случая применения компьютерных численных моделей с *позиции изученности моделируемого объекта*:

- для новых конструктивных решений. В этом случае компьютерные модели направлены на исследование и внедрение в практику новых конструктивных решений и особенно актуальными становятся проверки применимости и прогностической способности компьютерной модели;
- для изученных конструктивных решений. Тогда компьютерные модели направлены на оценивание поведения, а не только значения несущей способности, автоматизацию процессов проектирования, более точное проектирование и т.д. При этом набор случайных величин и степень их влияния известны из предыдущих исследований.

Можно выделить два крайних случая использования компьютерных численных моделей с *позиции изученности параметров модели*:

- применяются стандартизированные параметры компьютерной модели. В этом случае могут быть сделаны предпосылки о степени влияния параметров компьютерной модели на результаты и приняты статистические характеристики метрики точности;
- используются нестандартизированные параметры компьютерной модели. Особенно актуальной становится оценка влияния параметров компьютерной модели на результаты и оценка точности компьютерной модели на основе сравнения с экспериментальными данными.

Методика определения расчетных значений несущей способности стальных конструкций, проектируемых на основе компьютерных численных моделей, представлена в работе [15]. Однако применение этой методики требует наличия достаточно большого количества экспериментальных данных и их прямого сравнения с компьютерными результатами. Для изученных конструктивных решений и стандартизированных параметров моделей общую методику определения расчетного значения можно преобразовать/упростить с учетом следующих предпосылок:

- известен перечень случайных величин X , оказывающих влияние на несущую способность моделируемого объекта, и понятна принципиальная их взаимосвязь и степень их влияния на общую изменчивость несущей способности, предпосылка позволяет оценить среднее значение μ_r и коэффициент вариации V_r несущей способности;
- известен перечень параметров дискретизации и численного решения, оказывающих влияние на значение несущей способности моделируемого объекта, и известны зависимости статистических характери-

стик метрики точности численной модели от параметров компьютерной модели.

Тогда, предполагая, что параметры численных моделей обоснованы на значительном количестве экспериментальных данных и статистические характеристики не содержат статистической неопределенности, несущая способность может быть установлена согласно следующему выражению:

$$R_d \approx \mu_\theta \cdot \mu_r \cdot \exp(-\alpha_R \beta \sqrt{(V_r^2 + V_\theta^2)}), \quad (1)$$

где μ — среднее значение случайной величины; θ — метрика точности (неопределенности и погрешности) компьютерной модели несущей способности; α_R — коэффициент чувствительности метода надежности первого порядка (FORM) для несущей способности; β — индекс надежности; V — коэффициент вариации случайной величины.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сначала проанализируем имеющиеся исследования точности (КМ). Это позволит выработать стратегию для назначения статистических характеристик метрики точности и дальнейшего их учета при обеспечении надежности.

Результаты исследования статистических характеристик метрики точности можно найти в работе [11]. Так, на основании обработки 114 результатов компьютерного моделирования несущей способности среднее значение и коэффициент вариации метрики точности составили соответственно 1,0 и 4,5 % [11]. Среднее значение метрики точности, равное 1,0, свидетельствует об отсутствии систематических отклонений в хорошо подогнанных моделях. Маленькое значение коэффициента вариации 4,5 % свидетельствует о высокой степени соответствия между экспериментом и компьютерной моделью. Данные статистические характеристики, вероятнее всего, следует рассматривать как минимально возможные. Но даже при таких минимальных характеристиках ими нельзя пренебрегать при обеспечении надежности, так как порядок значений сопоставим с изменчивостью предела текучести для стали. Однако более репрезентативными для практического применения являются результаты исследований, цель которых состояла в применении наиболее стандартизированных параметров компьютерной модели и анализе точности этих моделей. Довольно обширные результаты изучения статистических характеристик метрики точности представлены в работе [12]. Выполнена проверка оболочечных моделей на соответствие широкому спектру испытаний стальных элементов из горячекатаных двутавровых профилей и квадратных/прямоугольных полых профилей, подвергнутых изгибу, сжатию и комбинированному сжатию с изгибом. Общее количество экспериментальных образцов составило 52, при этом μ_θ и V_θ составили соответственно 0,98 и 7,4 %. Также обширные результаты исследований статистических характеристик метрики точности при-

ведены в публикации [11]. Проанализированы 14 возможных комбинаций параметров КМ для 56 экспериментальных образцов, при этом μ_θ и V_θ составили 0,89–1,03 и 6,5–8,5 %. Одновременный анализ 14 комбинаций параметров КМ для общего набора экспериментальных данных позволяет проследить взаимосвязь точности модели от изменения параметра. Результаты исследований коэффициентов вариации метрики точности V_θ обобщены в табл. 1. Результаты дополнены сведениями для холодноформованных элементов [25] и узлов [26], однако статистические характеристики в этих исследованиях получены на основании небольшого количества результатов сравнения. Наиболее проблематичными с точки зрения обеспечения точности КМ видятся холодноформованные конструкции из-за трудности моделирования свойств стали, несовершенств и метизов (заклепок, саморезов, сварки). Обобщая результаты исследований точности КМ, можно отметить, что коэффициент вариации находится в пределах 10 % и в качестве консервативных предположений.

Статистические характеристики метрики точности компьютерных численных моделей при разных значениях параметров модели рассмотрены в труде [11]. Анализ статистических характеристик показывает, что стандартное отклонение при рекомендуемых параметрах моделей практически не изменяется. Следовательно, можно ввести коэффициенты, с помощью которых пересчитать значение несущей способности при разных параметрах КМ и тем самым приближенно учитывать изменение среднего значения метрики точности. Эти коэффициенты могут быть получены на основании средних значений метрики точности $\mu_{\theta,i}$ или на основании расчетного значения метрики точности $\theta_{d,i}$ моделирования (более точный подход), согласно формулам:

$$k_{i,\mu} = \mu_{\theta,i} / \mu_{\theta,баз}; \tag{2}$$

Табл. 1. Значения коэффициентов вариации несущей способности V_r и коэффициентов вариации метрики точности компьютерной модели V_θ

Table 1. Values of the coefficients of variation for the load-bearing capacity V_r and the accuracy metric of the computer model V_θ

Конструкции / Structures	V_θ , %	V_r , %
Элементы двутаврового и коробчатого сечения при проверках, не сопровождающихся потерей устойчивости I-beam and box-shaped elements that are not subject to loss of stability	5–6 [11, 12, 27]	5–6 [28, 29]
Элементы двутаврового и коробчатого сечения при проверках, сопровождающихся потерей устойчивости I-beam and box-shaped elements that are subject to loss of stability	5–8 [11, 12, 27]	6–8 [30–32]
Балки с гибкой стенкой, балки с гофрированной стенкой Flexible web beams, corrugated web beams	6–8 [11]	5–9 [29, 33]
Холодноформованные элементы Cold-formed elements	9–10 [25]	7–9 [29, 34]
Узлы при верифицированных моделях сварки, болтов, контактов Joints with verified models for welding, bolts, contacts	5–7 [26]	5–7 [26, 28]
Наиболее консервативные предпосылки The most conservative prerequisites	7–12 [11, 12]	7–10 [29]

$$k_{i,\theta d} = \theta_{d,i} / \theta_{d,баз}, \tag{3}$$

где $\mu_{\theta,i}$ — среднее значение метрики точности для i -й модели; $\mu_{\theta,баз}$ — среднее значение метрики точности для базовой модели; $\theta_{d,i}$ — расчетное значение метрики точности для i -й модели, вычисленное как:

$$\theta_{d,i} = \mu_{\theta,i} \cdot \exp(-0,7\alpha_R \beta V_{\theta,i}). \tag{4}$$

Результаты расчета коэффициентов пересчета, полученных посредством этих двух способов, приведены в табл. 2.

Обобщая результаты расчетов коэффициента пересчета, можно выделить строгую зависимость среднего значения метрики точности от модели материала, степени дискретизации и значения несовершенства. Соответственно предлагается выделить коэффициенты для пересчета между моделями материала (вид графика деформирования стали) $k_{fea,mat}$, степенью дискретизации (размер конечного элемента) $k_{fea,con}$ и моделями несовершенств $k_{fea,imp}$. Таким образом, коэффициенты пересчета позволят вносить корректировку в результаты моделирования для учета систематических смещений в оценивании несущей способности. Рекомендуемые значения коэффициентов пересчета представлены в табл. 3.

Далее проанализируем общую изменчивость несущей способности, обусловленную изменчивостью случайных величин, оказывающих влияние на поведение стальных конструкций. Для большинства элементов и видов отказа наибольшую долю в изменчивость вносит предел текучести стали [28]. На устойчивость также оказывает влияние неопределенность геометрических несовершенств и начальных напряжений [30–32]. Изменчивость геометрических размеров, как правило, незначительна и ей пренебрегают, однако для тонкостенных элементов необходим учет изменчивости толщины проката [29, 34]. На очень гибкие элементы оказывает влияние изменчивость модуля упругости стали [25]. Следует учитывать, что в некоторых моделях несущей способности параметры мо-

Табл. 2. Расчет значений коэффициентов пересчета

Table 2. Calculation of conversion coefficients

Набор параметров согласно работе [11] A set of parameters according to [11]	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 1	№ 6	№ 7	№ 8	№ 11	№ 12	№ 1	№ 13	№ 14
Модель материала* Material model*	а)	б)	в)	г)	а)					а)				
Степень дискретизации Discretization degree	5t				2t	5t	6t	8t	10t	5t				
Несовершенства Imperfections	$h_w/100$				$h_w/100$					$h_w/300$	$h_w/200$	$h_w/100$	$h_w/75$	$h_w/50$
μ_θ	0,97	1,03	0,98	0,93	0,99	0,97	0,96	0,95	0,89	0,95	0,96	0,97	0,99	1,01
V_θ , %	6,4	8,4	6,6	7,8	6,4	6,4	6,5	6,6	7,2	6,8	6,4	6,4	6,6	7,3
$\theta_{d,i}$	0,90	0,93	0,90	0,84	0,92	0,90	0,89	0,88	0,81	0,87	0,89	0,90	0,91	0,92
$k_{i,\mu}$	1,00	0,94	0,99	1,04	1,00	1,02	1,03	1,04	1,12	1,02	1,01	1,00	0,98	0,97
$k_{i,0d}$	1,00	0,97	1,00	1,06	1,00	1,02	1,03	1,04	1,13	1,03	1,01	1,00	0,98	0,98

Примечание: * — расшифровку моделей материала см. в работе [11].

Note: * — abbreviation for material models, see in [11].

гут входить в степени, что усиливает их влияние на итоговую неопределенность [29, 35]. Точное значение коэффициента вариации численной модели проблематично вычислить имеющимися методами. Наиболее распространенным методом является метод Монте-Карло, однако для повседневного применения он очень

трудоемкий [36]. В настоящее время многие исследования сосредоточены на решении этой проблемы. Перспективным видится подход, предложенный в публикации [29]. Для существующих моделей несущей способности значение коэффициента вариации можно установить на основании предыдущих исследований.

Табл. 3. Рекомендуемые значения коэффициентов пересчета $k_{fea,i}$, учитывающие влияние параметров компьютерной модели на точность модели

Table 3. Recommended values of conversion coefficients $k_{fea,i}$, taking into account the influence of computer model parameters on the accuracy of the model

Модель материала $k_{fea,mat}$ Material model $k_{fea,mat}$	
Билинейная зависимость без деформационного упрочнения Bilinear dependence without deformation hardening	0,95
Мультилинейная зависимость с площадкой текучести и со стадией самоупрочнения Multilinear dependence with a yield platform and with a self-hardening stage	1,0
На основании испытаний Based on the tests	1,0
Билинейная зависимость без площадки текучести, но со стадией самоупрочнения Bilinear dependence without a yield platform, but with a self-hardening stage	1,05
Степень дискретизации $k_{fea,con}$ Discretization degree $k_{fea,con}$	
Параметры дискретизации приняты для решения, отличающегося на +2 % от конвергентного значения The discretization parameters were adopted for a solution that differs by +2 % from the convergent value	1,0
Параметры дискретизации приняты для решения, отличающегося на +5 % от конвергентного значения The discretization parameters were adopted for a solution that differs by +5 % from the convergent value	1,05
Параметры дискретизации приняты для решения, отличающегося на +10 % от конвергентного значения The discretization parameters were adopted for a solution that differs by +10 % from the convergent value	1,10
Несовершенства $k_{fea,imp}$ Imperfections $k_{fea,imp}$	
Геометрические несовершенства Geometric imperfections	1,05
Эквивалентные несовершенства Equivalent imperfections	1,0

Табл. 4. Значения коэффициентов надежности
Table 4. Values of reliability factors

$V_r, \%$	$\gamma_{R,\mu \rightarrow d}$					
	$V_\theta, \%$					
	5	6	7	8	9	10
5	1,14	1,15	1,17	1,19	1,20	1,22
6	1,15	1,17	1,18	1,20	1,21	1,23
7	1,17	1,18	1,20	1,21	1,23	1,25
8	1,19	1,20	1,21	1,23	1,24	1,26
9	1,20	1,21	1,23	1,24	1,26	1,27

Анализ трудов [29–32, 34, 35] показывает, что коэффициент вариации несущей способности стальных элементов из-за изменчивости случайных физических величин находится в пределах 5–9 %. В табл. 1 обобщены результаты исследований, которые можно использовать как рекомендуемые значения при отсутствии более точной информации.

Далее перейдем к обоснованию численных значений коэффициентов надежности для стальных элементов, проектируемых на базе КМ. Значения коэффициента надежности вычислим на основании следующего выражения:

$$\gamma_{R,\mu \rightarrow d} = \mu_\theta \cdot \mu_r / R_d \tag{5}$$

где R_d — расчетное значение несущей способности, вычисленное согласно выражению (1).

Значения индекса надежности и коэффициента чувствительности для стальных конструкций приняты $\beta = 3,0$, $\alpha_R = 0,6$ [37, 38]. Тогда значения коэффициентов $\gamma_{R,\mu \rightarrow d}$ для разных значений коэффициентов вариации представлены в табл. 4.

Для дальнейшего анализа представим общий коэффициент надежности $\gamma_{R,\mu \rightarrow d}$ в виде произведения двух коэффициентов, один из которых будет учитывать погрешность КМ γ_θ , а второй — изменчивость случайных физических величин $\gamma_{r,\mu \rightarrow d}$:

$$\gamma_{R,\mu \rightarrow d} = \gamma_\theta \cdot \gamma_{r,\mu \rightarrow d} \tag{6}$$

Значение коэффициента надежности $\gamma_{r,\mu \rightarrow d}$ можно вычислить согласно выражению:

$$\gamma_{r,\mu \rightarrow d} = \exp(0,7\alpha_R\beta V_r). \tag{7}$$

В качестве базового случая примем значение $\gamma_{r,\mu \rightarrow d}$, вычисленное при значении коэффициента вариации несущей способности, равным 8 %, тогда $\gamma_{r,\mu \rightarrow d} = \exp(0,7 \cdot 0,6 \cdot 3,0 \cdot 0,08) \approx 1,10$. Тогда значения частных коэффициентов γ_θ , учитывающих точность компьютерной модели γ_θ , вычислим как $\gamma_\theta = \gamma_{R,\mu \rightarrow d} / \gamma_{r,\mu \rightarrow d}$. Полученные значения γ_θ представлены в табл. 5.

Обобщим результаты исследования. Расчетное значение несущей способности можно вычислить из среднего значения несущей способности с помощью выражения:

$$R_d \approx r(\mu_X) / (\gamma_{FEA} \cdot \gamma_{r,\mu \rightarrow d}), \tag{8}$$

где $r(\mu_X)$ — значение несущей способности, вычисленное на основе КМ при средних значениях слу-

чайных величин; γ_{FEA} — коэффициент надежности для компьютерной модели; $\gamma_{r,\mu \rightarrow d}$ — коэффициент надежности, учитывающий неопределенность случайных величин, рекомендуемое значение 1,10.

Коэффициент надежности для КМ предлагается определять согласно выражению:

$$\gamma_{FEA} = 1,05 k_{fea,mat} \cdot k_{fea,con} \cdot k_{fea,imp} \cdot \gamma_\theta, \tag{9}$$

где 1,05 — поправочный коэффициент, учитывающий упрощенный подход к валидации модели на основании существующих моделей несущей способности и имеющихся знаний; $k_{fea,i}$ — коэффициенты пересчета (см. табл. 3); γ_θ — коэффициент надежности, учитывающий точность КМ (табл. 6).

В практике проектирования стальных конструкций, как правило, для расчетов применяют характеристическое (нормативное) значение предела текучести, а все остальные случайные величины, такие как геометрические размеры, модуль упругости, входят со своими номинальными значениями. Исследование [29] показывает, что такой подход для гибких элементов или гибких частей сечения, на поведение которых существенно влияют изменчивость толщины проката или модуля упругости, приводит к некорректным результатам и требует введения дополнительного коэффициента. В качестве критерия чувствительности элемента к потере устойчивости принято отношение критической силы упругой потери устойчивости F_{cr} к действующей силе F_{Ed} , т.е. $\alpha_{cr} = F_{cr} / F_{Ed}$. Если это отношение меньше 4, то характерна упругая потеря устойчивости. Данный критерий может быть применен для всех видов потери устойчивости (потери устойчивости элементов, устойчивости формы сечения, устойчивости полки или стенки сечения). Если при создании КМ $r\{f_{yk}, t_{nom}, E_{nom}\}$ приняты характеристическое значение предела текучести f_{yk} и номинальные значения остальных случайных величин (например, геометрических размеров t_{nom} и модуля упругости E_{nom}), то расчетное значение несущей способности можно вычислить следующим образом:

$$R_d \approx r\{f_{yk}, t_{nom}, E_{nom}\} / \gamma_{FEA} \cdot \gamma_{r,fyk \rightarrow d} = r_{fjk} / (\gamma_{FEA} \cdot \gamma_{r,fjk \rightarrow d}), \tag{10}$$

Табл. 5. Значения коэффициентов надежности, учитывающие точность компьютерной модели

Table 5. Values of reliability factors that take into account the accuracy of the computer model

$V_r, \%$	γ_θ при $\gamma_{r,\mu \rightarrow d} = 1,1$ γ_θ with $\gamma_{r,\mu \rightarrow d} = 1.1$					
	$V_\theta, \%$					
	5	6	7	8	9	10
5	1,03	1,05	1,06	1,08	1,09	1,11
6	1,05	1,06	1,07	1,09	1,10	1,12
7	1,06	1,07	1,09	1,10	1,12	1,13
8	1,08	1,09	1,10	1,11	1,13	1,14
9	1,09	1,10	1,12	1,13	1,14	1,16

Табл. 6. Значения коэффициентов надежности, учитывающие точность компьютерной модели
Table 6. Values of reliability factors that take into account the accuracy of the computer numerical model

Конструкции / Structures	γ_0
Элементы двутаврового и коробчатого сечения при проверках, не сопровождающихся потерей устойчивости I-beam and box-shaped elements that are not subject to loss of stability	1,05
Элементы двутаврового и коробчатого сечения при проверках, сопровождающихся потерей устойчивости I-beam and box-shaped elements that are subject to loss of stability	1,10
Балки с гибкой стенкой, балки с гофрированной стенкой Flexible web beams, Corrugated web beams	1,10
Холодноформованные элементы Cold-formed elements	1,15
Узлы при верифицированных моделях сварки, болтов, контактов Joints with verified models for welding, bolts, contacts	1,10
Наиболее консервативные предположения The most conservative prerequisites	1,20

где γ_{FEA} — коэффициент надежности для компьютерной модели, определяется согласно выражению (9); $\gamma_{r,fjk \rightarrow d}$ — коэффициент надежности, учитывающий неопределенность случайных величин, равен 1,05 при значениях параметра α_{cr} меньше 4, в остальных случаях равен 1,0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представлена система коэффициентов надежности и методика их определения для изученных конструктивных решений и стандартизированных параметров КМ. Систематизированы и обобщены результаты исследований статистических характеристик метрики точности КМ. Предложены значения коэффициентов пересчета, позволяющие учитывать разные модели материала, степень дискретизации и значения несовершенств. Данная методика и полученные значения коэффициентов обоснованы для наиболее распространенных видов элементов, но на ограниченном наборе данных, поэтому необходимы дальнейшие исследования для подтверждения и расширения практических случаев применения.

Принципиальное отличие проектирования на основе КМ от классических формульных моделей заключается в отсутствии формализованной (зафиксированной) модели несущей способности, т.е. в отсутствии строгой записи модели. Это и является основной проблемой гарантирования уверенности в точности модели при повседневном проектировании. Поэтому повышение формализации компьютерной модели — одна из приоритетных задач ближайшего будущего. Формализацию КМ предлагается повысить следующими действиями:

- разработкой норм проектирования, включающих указания по назначению физических параметров КМ, таких как диаграммы деформирования материалов, моделей несовершенств, начальных напряжений и т.д.;
- разработкой специализированного ПО, содержащего стандартизированные наборы параметров КМ, в особенности параметров дискретизации и алгоритмов решения, таких как тип и размеры конечных элементов, настройки итерационных и инкрементальных алгоритмов решения с критериями сходимости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. 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

2. Prokop J., Vičan J., Jošt J. Numerical analysis of the beam-column resistance compared to methods by European standards // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 7. P. 3269. DOI: 10.3390/app11073269

3. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sýkora M. On Development of numerical resistance models of thin-web steel girders // Transactions of the VSB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series. 2023. Vol. 23 (1). Pp. 12–19. DOI: 10.35181/tces-2023-0003

4. 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

5. Белый Г.И., Кубасевич А.Е. Влияние усталостных трещин в стенке на прочность подкрановых балок // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 11. С. 1780–1790. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1780-1790

6. Матвеев А.Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах композитных балок сложной формы // Решетневские чтения. 2018. Т. 1. С. 568–569. EDN YTFBAD.

7. Устименко Е.Е., Скачков С.В. Метод конечных элементов модели тонкостенного профиля с полками объемного фасонного элемента // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4 (55). С. 54. EDN KSJBFE.

8. Мартыненко Т.М., Пронкевич С.А., Мартыненко И.М., Максимович В.А. Анализ прочности узловых соединений при различных исполнениях конструкции на основе моделирования в среде ANSYS // Механика. Исследования и инновации. 2022. № 15. С. 147–151. EDN QHUBTE.

9. Фролов А.В., Воронов М.В., Медельцев А.А., Седова К.А., Шаповалов П.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния сварных соединений в ANSYS Mechanical // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 11. С. 61–76. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-11-61-76. EDN UTPZGM.

10. Палаев А.Г., Носов В.В., Красников А.А. Моделирование распределения температурных полей и напряжений в сварном соединении с применением ANSYS // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Т. 12. № 5. С. 461–469. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-469. EDN YWMJEF.

11. Надольский В.В. Статистические характеристики погрешности численных моделей несущей способности для стальных элементов // Строительство и реконструкция. 2023. № 3 (107). С. 17–34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34. EDN TNLEVH.

12. Fieber A., Gardner L., Macorini L. Design of structural steel members by advanced inelastic analysis with strain limits // Engineering Structures. 2019. Vol. 199. P. 109624. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109624

13. Алексеев А.К., Бондарев А.Е. Об апостериорной оценке нормы погрешности численного расчета на ансамбле независимых решений // Сибирский журнал вычислительной математики. 2020. Т. 23. № 3. С. 233–248. DOI: 10.15372/SJNM20200301. EDN TLUUTP.

14. Бритов Г.С. Верификация, валидация и тестирование компьютерных моделей линейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2 (63). С. 75–82. EDN PYPBYF.

15. Надольский В.В. Оценка расчетного значения несущей способности стальных элементов, проектируемых на основе численных моделей // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 3. С. 367–378. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378

16. Сальников А.В., Французов М.С., Виноградов К.А., Пятунин К.Р., Никулин А.С. Верификация и валидация компьютерных моделей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022.

№ 9 (750). С. 100–115. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115. EDN CUFIKS.

17. Борисов Е.А., Теплов А.В. Особенности проверки качества программного обеспечения // Наука через призму времени. 2020. № 1 (34). С. 27–29. EDN KUTVJO.

18. Tur V.V., Tur A.V., Lizahub A.A.I. Experimental and theoretical study of the reinforced concrete flat slabs with the central support loss // Building and Reconstruction. 2023. No. 1 (105). Pp. 77–103. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-77-103. EDN HIIQFH.

19. Перельмутер А.В., Тур В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Т. 13. № 3. С. 86–102. EDN ZRKJPX.

20. Афенченко Д.С., Петрова Ю.Н., Устинова М.Э., Олейникова Р.Е. Верификация аналитического расчета несущей способности перфорированного стержня средствами конечно-элементного комплекса // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2019. № 4. С. 118–129. EDN CXAONF.

21. 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

22. 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

23. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Hidden safety in structural design codes // Engineering Structures. 2021. Vol. 257. P. 114017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114017

24. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Über den Umgang mit versteckten Sicherheiten — Eine Fallstudie am Windlastmodell des Eurocode // Baustatik — Bau-praxis. 2020. Vol. 14. Pp. 1059–1069.

25. Laim L., Rodrigues J.P.C., Simões da Silva L. Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams // Thin-Walled Structures. 2013. Vol. 72. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.tws.2013.06.008

26. Girão Coelho A.M., Simões da Silva L., Bijlaard F.S.K. Finite-element modeling of the nonlinear behavior of bolted t-stub connections // Journal of Structural Engineering. 2006. Vol. 132. Issue 6. Pp. 918–928. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2006)132:6(918)

27. Simões da Silva L., Rebelo C., Nethercot D., Marques L., Simões R., Vila Real P.M.M. Statistical evaluation of the lateral–torsional buckling resistance of steel I-beams. Part 2: Variability of steel properties // Journal of Constructional Steel Research. 2009. Vol. 65. Issue 4. Pp. 832–849. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.017

28. Kala Z., Melcher J., Puklický L. Material and geometrical characteristics of structural steels based on

statistical analysis of metallurgical products // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2009. Vol. 15. Issue 3. Pp. 299–307. DOI: 10.3846/1392-3730.2009.15.299-307

29. Надольский В.В. Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 6. С. 852–863. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.852-863

30. Kala Z. Sensitivity assessment of steel members under compression // *Engineering Structures*. 2009. Vol. 31. Issue 6. Pp. 1344–1348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.001

31. Agüero A., Pallarés L., Pallarés F.J. Equivalent geometric imperfection definition in steel structures sensitive to flexural and/or torsional buckling due to compression // *Engineering Structures*. 2015. Vol. 96. Pp. 160–177. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.065

32. Kala Z., Kala J., Simos T.E., Psihoyios G., Tsitouras Ch., Anastassi Z. Sensitivity analysis of stability problems of steel structures using shell finite elements and nonlinear computation methods // *AIP Conference Proceedings*. 2011. Pp. 1865–1868. DOI: 10.1063/1.3636974

33. 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

34. Kala Z. Sensitivity of load-carrying capacity of a thin-walled steel member to the initial curvature shape of its axis // *Thin-Walled Structures*. 2018. Pp. 835–842. DOI: 10.1201/9781351077309-96

35. Kala Z. Global sensitivity analysis in stability problems of steel frame structures // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2016. Vol. 22. Issue 3. Pp. 417–424. DOI: 10.3846/13923730.2015.1073618

36. 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. Pp. 10–20.

37. Соловьев С.А., Соловьева А.А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 2. С. 153–167. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.153-167

38. Соловьев С.А., Соловьева А.А. Метод вероятностного анализа надежности элементов конструкций на основе граничных функций распределения // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 10. С. 1545–1555. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1545-1555

Поступила в редакцию 21 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 25 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 7 июня 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: **Виталий Валерьевич Надольский** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии строительного производства; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; 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; Nadolskiv@mail.by.

REFERENCES

1. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. 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

2. Prokop J., Vičan J., Jošt J. Numerical analysis of the beam-column resistance compared to methods by European standards. *Applied Sciences*. 2021; 11(7):3269. DOI: 10.3390/app11073269

3. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sýkora M. On Development of numerical resistance models of thin-web steel girders. *Transactions of the VSB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2023; 23(1):12-19. DOI: 10.35181/tces-2023-0003

4. 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

5. Belyy G.I., Kubasevich A.E. Effect of fatigue cracks in the wall on the strength of crane beams. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1780-1790. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1780-1790 (rus.).

6. Matveev A.D. Multigrid finite element method in the calculations of composite beams of irregular shape. *Reshetnev Readings*. 2018; 1:568-569. EDN YTFBAD. (rus.).

7. Ustimenko E.E., Skachkov S.V. Method finite elements thin-walled profile shelves surround the nishing. *Engineering journal of Don*. 2019; 4(55):54. EDN KSJBFE. (rus.).

8. Martynenko T.M., Pronkevich S.A., Martynenko I.M., Maximovich V.A. Strength analysis of junction joints for different design performances on the basis of simulation in the ANSYS software. *Mechanics*.

Researches and Innovations. 2022; 15:147-151. EDN QHUBTE. (rus.).

9. Frolov A.V., Voronov M.V., Medeltsev A.A., Sedova K.A., Shapovalov P.A. Modeling of the stress-strain state of welded joints in ANSYS mechanical. *Izvestiya Tula State University*. 2022; 11:61-76. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-11-61-76. EDN UTPZGM. (rus.).

10. Palaev A.G., Nosov V.V., Krasnikov A.A. Simulating distribution of temperature fields and stresses in welded joint using ANSYS. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2022; 12(5):461-469. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-469. EDN YWMJEF. (rus.).

11. Nadolski V.V. Statistical characteristics of the numerical model uncertainties for steel elements. *Building and Reconstruction*. 2023; 3(107):17-34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34. EDN TNLEVH. (rus.).

12. Fieber A., Gardner L., Macorini L. Design of structural steel members by advanced inelastic analysis with strain limits. *Engineering Structures*. 2019; 199:109624. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109624

13. Alekseev A.K., Bondarev A.E. On a posteriori estimation of the approximation error norm for an ensemble of independent solutions. *Siberian Journal on Numerical Mathematics*. 2020; 23(3):233-248. DOI: 10.15372/SJNM20200301. EDN TLUUTP. (rus.).

14. Britov G.S. Verification, validation and testing of computer models of linear dynamic systems. *Information and Control Systems*. 2013; 2(63):75-82. EDN PYPBYF. (rus.).

15. 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.).

16. Salnikov A.V., Frantsuzov M.S., Vinogradov K.A., Pyatunin K.R., Nikulin A.S. Digital simulation verification and validation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2022; 9(750):100-115. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115. EDN CUFIKS. (rus.).

17. Borisov E.A., Teplov A.V. Features of software quality control. *Science Through the Prism of Time*. 2020; 1(34):27-29. EDN KUTVJO. (rus.).

18. Tur V.V., Tur A.V., Lizahub A.A.I. Experimental and theoretical study of the reinforced concrete flat slabs with the central support loss. *Building and Reconstruction*. 2023; 1(105):77-103. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-77-103. EDN HIIQFH.

19. Perelmuter A.V., Tur V.V. Whether we are ready to proceed to a nonlinear analysis at designing? *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(3):86-102. EDN ZRKJPX. (rus.).

20. Afenchenko D.S., Petrova Yu.N., Ustinova M.E., Olejnikova 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. EDN CXAONF. (rus.).

21. 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

22. 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

23. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Hidden safety in structural design codes. *Engineering Structures*. 2021; 257:114017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114017

24. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Über den Umgang mit versteckten Sicherheiten — Eine Fallstudie am Windlastmodell des Eurocode. *Baustatik — Bau-praxis*. 2020; 14:1059-1069.

25. Laím L., Rodrigues J.P.C., Simões da Silva L. Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures*. 2013; 72:1-13. DOI: 10.1016/j.tws.2013.06.008

26. Girão Coelho A.M., Simões da Silva L., Bijlaard F.S.K. Finite-element modeling of the nonlinear behavior of bolted t-stub connections. *Journal of Structural Engineering*. 2006; 132(6):918-928. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2006)132:6(918)

27. Simões da Silva L., Rebelo C., Nethercot D., Marques L., Simões R., Vila Real P.M.M. Statistical evaluation of the lateral–torsional buckling resistance of steel I-beams. Part 2: Variability of steel properties. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009; 65(4):832-849. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.017

28. Kala Z., Melcher J., Puklický L. Material and geometrical characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2009; 15(3):299-307. DOI: 10.3846/1392-3730.2009.15.299-307

29. Nadolski V.V. Reliability coefficients for nonlinear models of load-bearing capacity of beams with flexible web. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):852-863. DOI: 10.22227/19970935.2023.6.852-863 (rus.).

30. Kala Z. Sensitivity assessment of steel members under compression. *Engineering Structures*. 2009; 31(6):1344-1348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.001

31. Agüero A., Pallarés L., Pallarés F.J. Equivalent geometric imperfection definition in steel structures sensitive to flexural and/or torsional buckling due to compression. *Engineering Structures*. 2015; 96:160-177. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.065

32. Kala Z., Kala J., Simos T.E., Psihoyios G., Tsitouras Ch., Anastassi Z. Sensitivity Analysis of Stability Problems of Steel Structures using Shell Finite Elements

and Nonlinear Computation Methods. *AIP Conference Proceedings*. 2011; 1865-1868. DOI: 10.1063/1.3636974

33. 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.).

34. Kala Z. Sensitivity of load-carrying capacity of a thin-walled steel member to the initial curvature shape of its axis. *Thin-Walled Structures*. 2018; 835-842. DOI: 10.1201/9781351077309-96

35. Kala Z. Global sensitivity analysis in stability problems of steel frame structures. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2016; 22(3):417-424. DOI: 10.3846/13923730.2015.1073618

36. 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; 10-20.

37. Soloveva A.A., Solovev S.A. Reliability analysis of planar steel trusses based on p-box models. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(2):153-167. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.153-167 (rus.).

38. Solovev S.A., Soloveva A.A. Method of structural reliability analysis based on boundary distribution functions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1545-1555. DOI: 10.22227/19970935.2023.10.1545-1555 (rus.).

Received April 21, 2024.

Adopted in revised form on April 25, 2024.

Approved for publication on June 7, 2024.

B I O N O T E S: **Vitali V. Nadolski** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Building Production Technologies; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; Associate Professor of the Department of Building Structures; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; ID RISC. 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskiv@mail.by.

Исследование свойств химического анкера на основе эпоксидной смолы

Михаил Германович Ковалев, Виктория Андреевна Швецова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. С уходом иностранных компаний с российского рынка появилась необходимость в химических анкерах отечественного производства. Исследованы свойства первого полностью отечественного химического анкера UTECH HITRE500 на основе эпоксидной смолы.

Материалы и методы. Температура стеклования определялась по ГОСТ 32618.2–2014 на приборе ТМА Q400, прочность при изгибе — по ГОСТ 4648–2014, прочность при сжатии — по ГОСТ 4651–2014, прочность сцепления клеевого состава с бетоном — по ГОСТ Р 58387–2019 при помощи испытательной машины Instron 3382.

Результаты. Установлены такие характеристики химического анкера, как температура стеклования, прочность при изгибе, модуль упругости при изгибе, прочность при сжатии, сопротивление сцепления при вырыве при температурах эксплуатации: +23, +42, +70, –60 °С, а также время, за которое химический анкер набирает 97,7 % прочности на вырыв при твердении при температуре воздуха –10 °С (10 сут). Определено, что при выдерживании образцов, твердевших в течение 1 сут при комнатной температуре, при температурах +42 и +70 °С происходит значительное снижение прочности сцепления при вырыве (на 29,7 и 64,7 % соответственно). При выдерживании образцов, твердевших в течение 1 сут при комнатной температуре, при температуре –60 °С прочность на вырыв незначительно увеличилась по сравнению с контрольными образцами (на 4,6 %).

Выводы. Приведены результаты испытаний первого полностью отечественного химического анкера UTECH HITRE500. Определены температура стеклования и физико-механические свойства отвержденного химического анкера. Установлено время, необходимое для набора прочности в условиях отрицательной температуры –10 °С, равное 10 сут.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: химический анкер для бетона, химический анкер отечественного производства, температура стеклования, температура выдержки, прочность сцепления

Благодарности. Авторы благодарят генерального директора ООО «АСП-ГРУПП» С.А. Пашкевича за предоставленные образцы химических анкеров для проведения исследований.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ковалев М.Г., Швецова В.А. Исследование свойств химического анкера на основе эпоксидной смолы // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 10. С. 1617–1628. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1617-1628

Автор, ответственный за переписку: Виктория Андреевна Швецова, ShvetsovaVA@mgsu.ru.

Investigation of properties of chemical anchor on the basis of epoxy resin

Mikhail G. Kovalev, Victoria A. Shvetsova

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

ABSTRACT

Introduction. With the withdrawal of foreign companies from the Russian market there is a need for domestically produced bonded chemical anchors. The properties of the first fully locally produced bonded anchor UTECH HITRE500 based on epoxy resin are studied.

Materials and methods. Glass transition temperature was determined according to GOST 32618.2–2014 on the TMA Q400 device; bending strength was determined according to GOST 4648–2014, compressive strength — according to GOST 4651–2014; pullout bond strength of adhesive composition to concrete was determined according to GOST R 58387–2019 with the help of Instron 3382 testing machine.

Results. The following characteristics of the bonded anchor were determined during tests: glass transition temperature, bending strength, bending elastic modulus, compressive strength, ultimate resistance of bonding resistance to breakout at operating temperatures: +23, +42, +70, –60 °С, as well as the time for which the chemical anchor gains 97.7 % breakout strength when curing at air temperature –10 °С (10 days). It was established that when the specimens cured for 1 day at room temperature are kept at temperatures of +42 and +70 °С, the ultimate pullout bond strength decreases significantly (by 29.7 and 64.7 % respectively). It was found out that when the specimens cured for 1 day at room temperature, were tested at –60 °С the pullout strength slightly increased compared to the control specimens (4.6 % higher).

Conclusions. The results of tests of the first fully locally produced chemical anchor UTECH HITRE500 are presented. The glass transition temperature and physical and mechanical properties of the cured chemical anchor were determined. The time required for full bond strength gain in conditions of negative temperature -10°C equal to 10 days was determined.

KEYWORDS: chemical anchor for concrete, locally manufactured chemical anchor, glass transition temperature, curing temperature, bond strength

Acknowledgements. The authors thank the General Director of ASP-GRUPP LLC S.A. Pashkevich for providing specimens of chemical anchors for the research.

FOR CITATION: Kovalev M.G., Shvetsova V.A. Investigation of properties of chemical anchor on the basis of epoxy resin. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1617-1628. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1617-1628 (rus.).

Corresponding author: Victoria A. Shvetsova, ShvetsovaVA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Химические анкеры — это термин, относящийся к стальным стержням (шпилькам или арматуре), которые прикрепляются к основанию (каменной кладке, бетону) с помощью двухкомпонентной клеевой системы. Химические анкеры — связующее между металлическими элементами и материалами подложки. Для соединения используются клеи на основе синтетических смол. Они очень эффективны как в условиях высоких нагрузок, так и для пустотелого или пористого слабого материала основания (пустотелые блоки, газобетонные блоки, бетон низкого класса прочности). Изначально эти анкеры задумывались для использования в бетоне, рассчитанном на тяжелые нагрузки, однако в настоящее время они широко применяются при ремонтных и реставрационных работах благодаря минимальным затратам ресурсов и скорости выполнения работ [1–4]. Лидером рынка химических анкеров в России до недавнего времени являлась компания HILTI. В 2017 г. на нее пришлось 55,7 % общего объема рынка химических анкеров в стоимостном выражении. На втором месте находился MKT с долей рынка в 8,6 %. Третье место занимала MUNGO, на долю которой приходится 5,9 % общего объема рынка химических анкеров¹. Единственный в России производитель химических анкеров — ЗАО «КАРБО-ЦАКК», входящее в группу предприятий Minova (Германия). Предприятие выпускает химические анкеры для крепления горнодобывающего оборудования, а также бортов и кровли горных выработок в рудниках и шахтах. С уходом иностранных компаний с российского рынка появилась необходимость в химических анкерах отечественного производства.

Химический клеевой анкер состоит из клеевого состава и стержня анкера. В качестве клеевого состава применяются двухкомпонентные связующие на базе эпоксидных, эпоксидно-акрилатных, поли-

эфирных смол и различных соединений полиэстера. Связующие на основе винил-полиэстера используются для производства внутренних работ благодаря их нетоксичности. Связующие на основе эпоксидных смол используют для создания жесткого и прочного крепления к бетонному основанию [5].

Химические анкеры — относительно молодой объект исследования: впервые в строительстве они стали применяться с 1960-х гг., первые крупные исследования были проведены в 80–90-х гг. (R.A. Cook и др. [6–8]). Экспериментальные исследования несущей способности анкерного крепления и гибких связей, установленных в кирпичную кладку, проведены А.В. Грановским и др. [9, 10]. L. Contrafatto и соавт. установили, что способность химической анкерной системы к выдергиванию увеличивается с уменьшением разницы в прочности бетона и эпоксидной смолы [5]. По данным А.Е. Richardson и соавт., химический анкерный болт полагается исключительно на прочность бетона на растяжение при выдерживании приложенной нагрузки, при условии, что прочность сцепления смолы превышает прочность бетона на растяжение [11]. С. Ху и др. определили, что при воздействии нагрузки переменная амплитуда значения нагрузки увеличивается примерно на 42,1 %, а несущая способность уменьшается примерно на 12 %, чем при воздействии постоянной нагрузки [12–15]. Другие исследователи, например M. Lahouar и соавт., свидетельствуют о высокой пожарной опасности таких соединений и зависимости поведения под нагрузкой от температуры окружающей среды (прочность при выдергивании снижается при температурах выше 50°C и возвращается к прежним значениям при температурах выше 80°C) [16]. Ö. Çaliskan и др. рассмотрели работу химического анкера при различных температурах выдержки образцов, степени очистки отверстий перед установкой анкеров и влажностью [17–20]. Авторами выявлено, что наибольшее влияние на сцепление анкера с основанием оказывает влажность отверстия (снижение прочности до 20 %). Экспериментальными исследованиями обоснована возможность применения клеевых анкеров в сейсмических районах. Методика опре-

¹ Аналитический отчет DISCOVERY RESEARCH GROUP «Анализ рынка химического крепежа (химических анкеров) в России». 39 с. URL: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Demo_2282-analiz-rynka-himicheskogo-krepezh-v-rossii.PDF

деления характеристик и их значения для одного из видов клеевых анкеров приведены в труде [21].

В данной работе рассмотрена работа первого полностью отечественного химического анкера UTECH HITRE500 на основе эпоксидной смолы. Олигомеры с молекулярной массой порядка 1500 (в том числе эпоксидные и полиэфирные смолы) имеют температуру стеклования 40–75 °С [22]. При достижении температуры стеклования шитые полимеры приобретают пластичность, что, с одной стороны, делает соединение более устойчивым к ударному и вибрационному воздействию, с другой — снижает величину касательных напряжений в точке приложения нагрузки. Цель исследования — определить температуру стеклования отвержденного химического анкера и его физико-механические свойства при различных температурах эксплуатации. Эти сведения необходимы для применения химического анкера UTECH HITRE500 на всей территории России с ее протяженным расположением в четырех климатических поясах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для установления прочности сцепления при действии вырывающих усилий металлической резьбовой шпильки из бетона изготовлены образцы-цилиндры в металлической обойме диаметром 200 мм и высотой 150 мм. Диаметр шпильки — 12 мм, диаметр отверстия — 14,3 мм, глубина заделки — 6 см. Глубина заделки выбиралась таким образом, чтобы разрушение происходило по контакту «клеевой состав — основание», а не по стали резьбовой шпильки. В рамках подготовки к испытаниям были протестированы цилиндры с меньшим диа-

метром, равным 150 мм. Полученные данные не являлись корректными из-за растрескивания образца во время испытания (рис. 1).

Для изготовления цилиндров применялся бетон класса прочности при сжатии В25, предел прочности при сжатии на 28 сут равнялся 29 МПа, коэффициент вариации 7,1 %. Прочность определялась по контрольным образцам-кубам 100 × 100 × 100 мм.

Шпилька, туба с химическим анкером и основание имели комнатную температуру +23 °С. Твердение образцов происходило при комнатной температуре в течение 1 сут. Спустя сутки образцы поместили в камеру тепла и холода для достижения заданной температуры в течение 1 сут. С целью установления времени набора прочности при отрицательной температуре основание и шпилька были охлаждены до температуры –10 °С. Химический анкер имел комнатную температуру +23 °С. Твердение образцов происходило при температуре –10 °С в течение 7 и 10 дней. Определение нагрузок и перемещений производилось при помощи испытательной машины Instron 3382 по ГОСТ Р 58387–2019. Отклонение температуры от заданной во время испытания составляло не более 5 °С. Обработка результатов испытаний проводилась с учетом положений СТО 05156706-001–2019².

Для определения предела прочности при изгибе отвержденного химического анкера изготовлены образцы-балочки 10 × 10 × 200 мм. Испытания

² СТО 05156706-001–2019. Анкерные крепления к бетону с применением клеевых анкеров. Правила установления нормируемых параметров. М. : Союз производителей и поставщиков крепежных систем, 2019. 56 с.



Рис. 1. Образец для испытаний отвержденного химического анкера после испытания диаметром: *a* — 150 мм; *b* — 200 мм

Fig. 1. Specimen after test with diameter: *a* — 150 mm; *b* — 200 mm

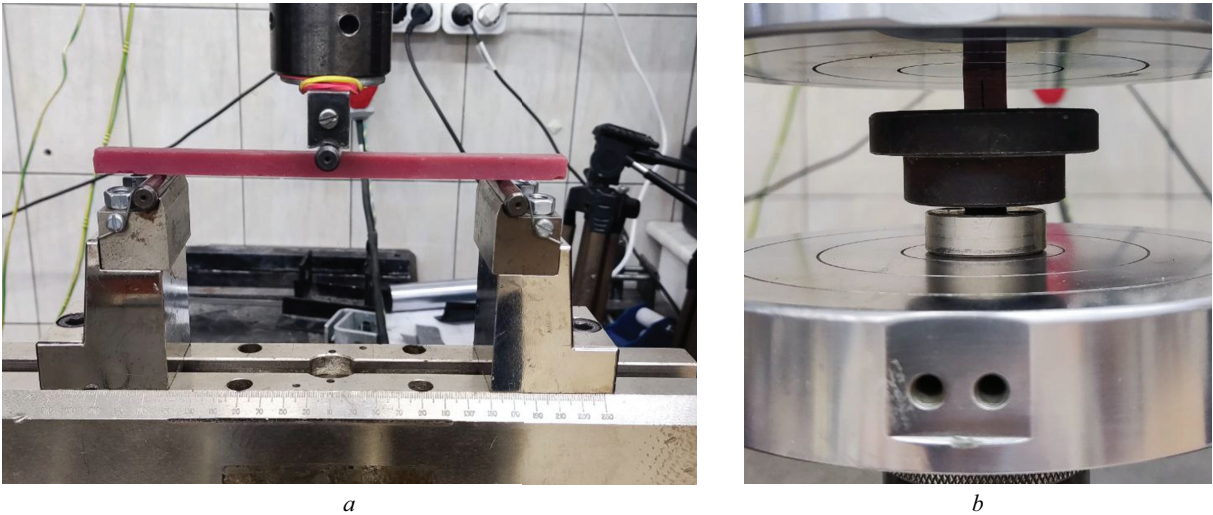


Рис. 2. Испытания образцов из отвержденного химического анкера
Fig. 2. Testing samples of cured chemical anchor

выполнялись в соответствии с ГОСТ 4648–2014 «Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб». Радиус нагружающего наконечника и радиус краев опор равнялись 5 мм, расстояние между опорами — 150 мм, скорость нагружения — 5 мм/мин. После испытания из образцов были выпилены образцы-призмы $10 \times 10 \times 4$ мм для установления прочности при сжатии (рис. 2). Прочность при сжатии определялась по ГОСТ 4651–2014 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие». Скорость нагружения — 500 Н/с.

Образец из отвержденного химического анкера для проведения термомеханического анализа (ТМА) выпилен из середины образцов-кубиков $20 \times 20 \times 20$ мм. Поверхности образца были отшлифованы.

Измерения проводились на приборе ТМА Q400 (TA Instruments), анализ полученной ТМА кривой производился на ЭВМ при помощи ПО TA Instruments Analysis. Испытание осуществлялось в условиях пенетрации пуансона в образец, скорость нарастания температуры — $5^\circ\text{C}/\text{мин}$. Диаметр пуансона составлял 2,5 мм, нагрузка — 1 Н (рис. 3).

Все испытания выполнены в лабораториях кафедры строительного материаловедения и НИИ экспериментальной механики НИУ МГСУ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных испытаний получены диаграммы «нагрузка – перемещение» для образцов после выдержки при различных температурах

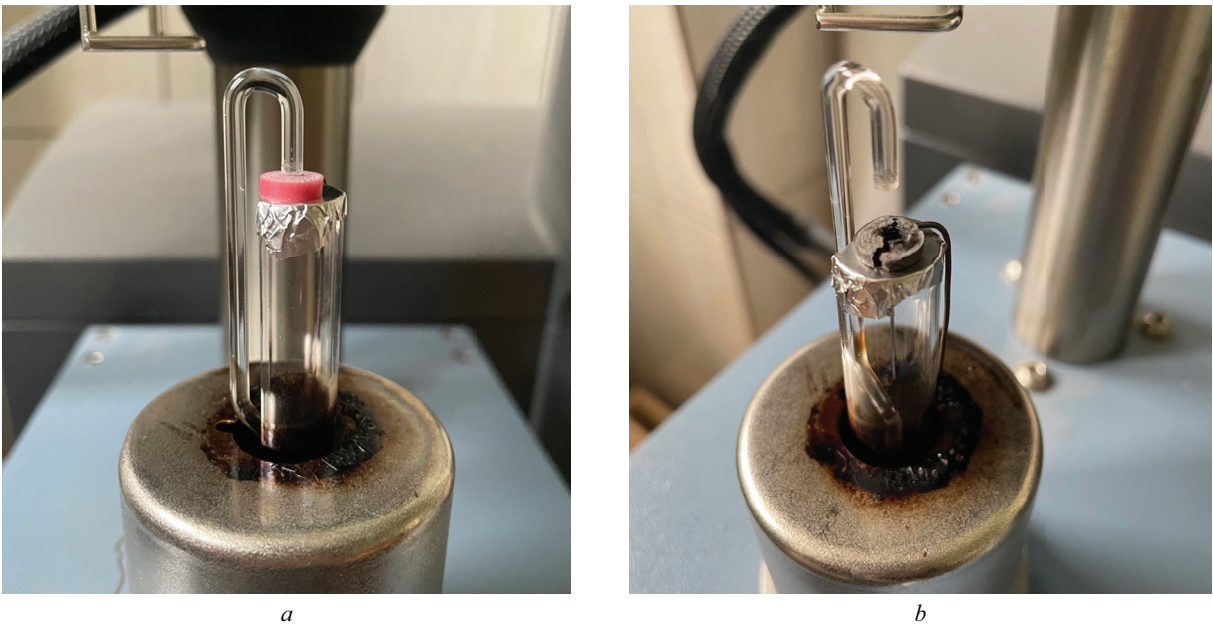


Рис. 3. Образец из отвержденного химического анкера в приборе ТМА Q400: *a* — до испытания; *b* — после испытания
Fig. 3. Specimen of cured chemical anchor in the TMA Q400: *a* — before testing; *b* — after testing

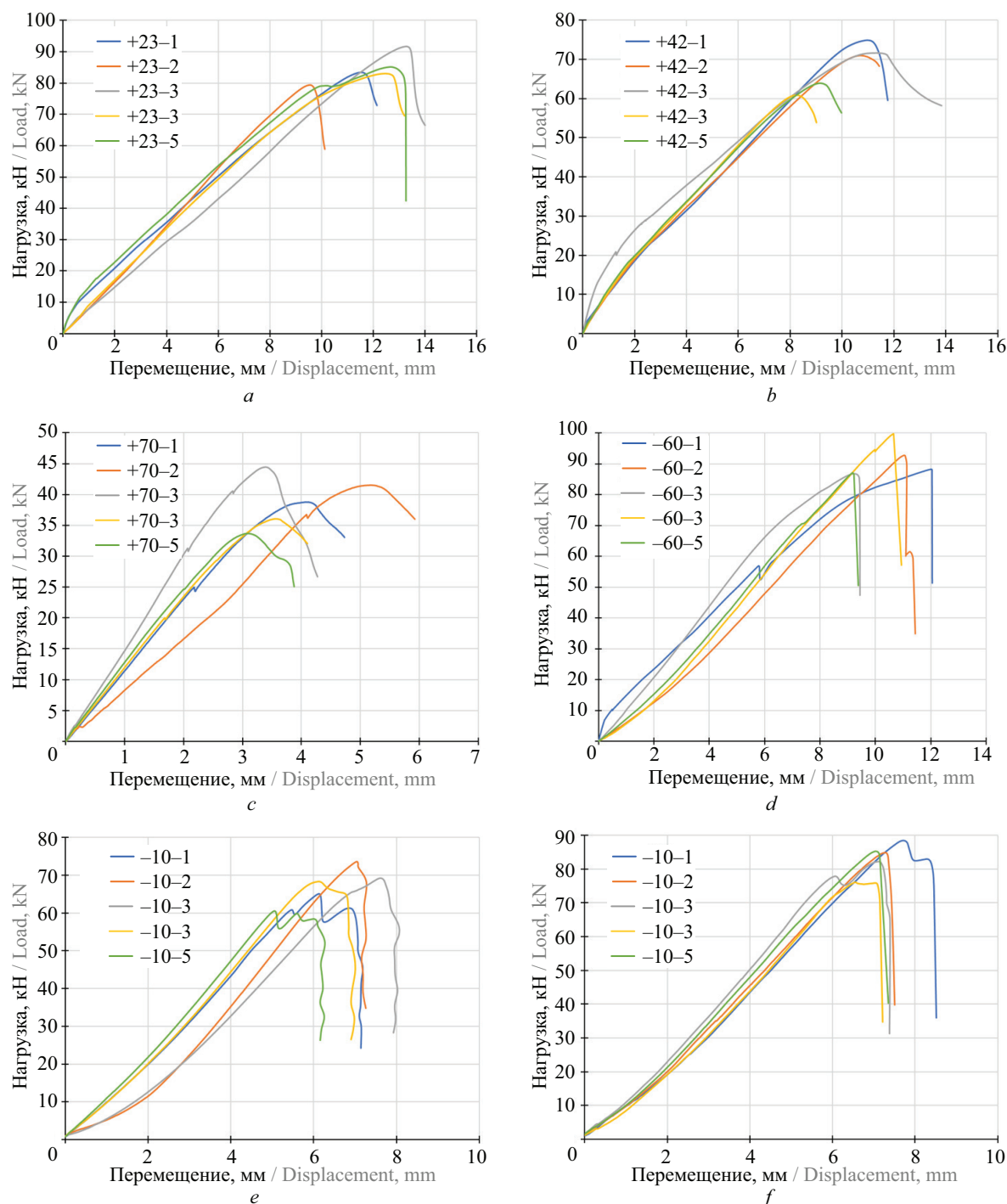


Рис. 4. Диаграммы «нагрузка – перемещение» при температуре: +23 °C (a); +42 °C (b); +70 °C (c); –60 °C (d); –10 °C (7 сут) (e); –10 °C (10 сут) (f)

Fig. 4. Load – displacement diagrams at temperature: +23 °C (a); +42 °C (b); +70 °C (c); –60 °C (d); –10 °C (7 days) (e); –10 °C (10 days) (f)

(рис. 4, 5, табл. 1). Диаграмма «нагрузка – перемещение» для образцов, твердевших в течение 7 и 10 сут при –10 °C, представлена на рис. 4, e, f; 5.

Термомеханическая кривая и зависимость производной деформации от температуры представлена на рис. 6. На начальном этапе подъема температуры для образца характерно небольшое размягчение, ко-

торое характеризуется отрицательной деформацией (пенетрацией пуансона в образец) и сопутствующее расстекловыванию образца. Затем наблюдается рост положительной деформации, связанный со вспучиванием образца. Образец начинает расстекловываться при температуре 43,57 °C, температура стеклования равняется 49,45 °C. Температура деструкции составила 316,62 °C.

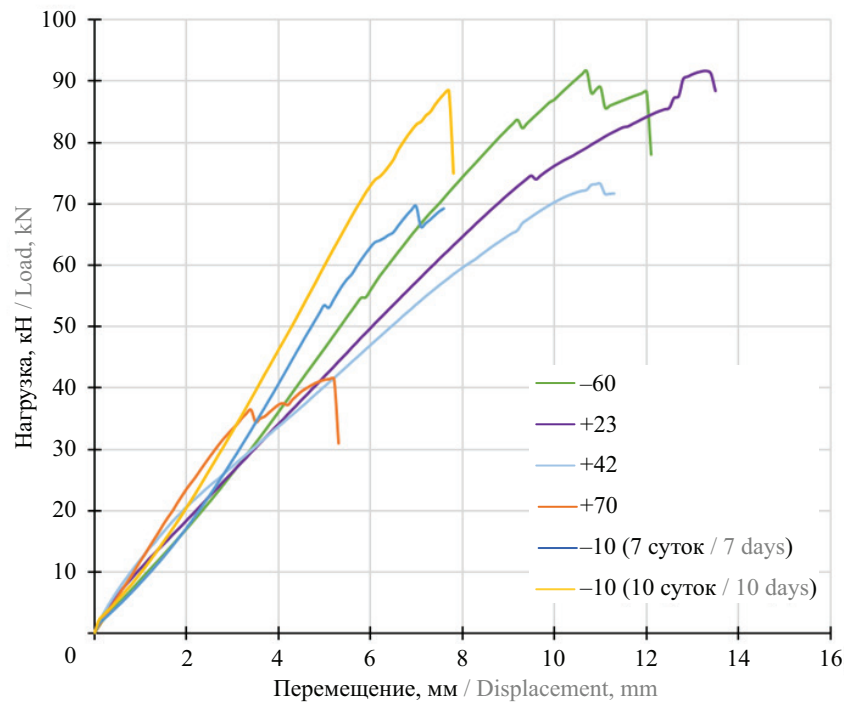


Рис. 5. Диаграмма «нагрузка – перемещение» по средним значениям

Fig. 5. Load – displacement diagram based on average values

Табл. 1. Результаты проведенных испытаний

Table 1. Test results

Температура выдержки, °C Temperature of testing, °C	Номер / Number	Максимальная нагрузка, кН Maximum load, kN	Среднее значение нагрузки серии, кН Average load, kN	Стандартное отклонение, % Standard deviation, %	Коэффициент вариации, % The coefficient of variation, %	Нормативное значение нагрузки в серии, кН Standard load value in series, kN	Нормативное значение сопротивления сцепления, МПа Standard value of bond strength, MPa
-60	1	88,2	90,9	5,5	6,0	72,3	32,0
	2	92,7					
	3	86,8					
	4	99,7					
	5	87,1					
+23	1	83,4	84,5	4,5	5,3	69,2	30,6
	2	79,4					
	3	91,7					
	4	83,0					
	5	85,2					

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Температура выдержки, °C Temperature of testing, °C	Номер / Number	Максимальная нагрузка, кН Maximum load, kN	Среднее значение нагрузки серии, кН Average load, kN	Стандартное отклонение, % Standard deviation, %	Коэффициент вариации, % The coefficient of variation, %	Нормативное значение нагрузки в серии, кН Standard load value in series, kN	Нормативное значение сопротивления сцепления, МПа Standard value of bond strength, MPa
+42	1	74,9	68,5	5,8	8,5	48,6	21,5
	2	71,0					
	3	71,7					
	4	60,9					
	5	63,9					
+70	1	38,8	38,9	4,3	11,0	24,4	10,8
	2	41,5					
	3	44,5					
	4	36,1					
	5	33,7					
–10 (7 сут) / (7 days)	1	65,1	67,4	4,9	7,2	50,9	22,5
	2	73,6					
	3	69,2					
	4	68,4					
	5	60,5					
–10 (10 сут) / (10 days)	1	88,5	83,4	4,6	5,6	67,6	29,9
	2	84,9					
	3	82,2					
	4	76,1					
	5	85,3					

В табл. 2, 3 приведены результаты испытаний образцов из химического анкера на прочность при изгибе и на сжатие соответственно. На рис. 7 показаны характерные диаграммы деформирования образцов при испытаниях на изгиб и сжатие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены испытания по определению свойств химического анкера UTECH HITRE500 и влиянию на его свойства температуры окружающей среды.

Выявлены следующие характеристики химического анкера UTECH HITRE500: температура стеклования, прочность при изгибе, модуль упругости

при изгибе, прочность при сжатии, прочность сцепления с бетоном класса В25.

Определено необходимое время твердения химического анкера, установленного и твердевшего при температуре –10 °С. Анкер, установленный в таких условиях, может быть безопасно нагружен через 10 сут, его прочность сцепления с бетоном соответствует прочности образца, твердевшего 1 сут при комнатной температуре (на 2,3 % ниже). Прочность сцепления спустя 7 сут твердения при температуре –10 °С на 26,4 % ниже, чем у контрольного образца.

При выдерживании образцов, твердевших в течение 1 сут при комнатной температуре, при температурах +42 и +70 °С происходит значительное

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 10, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19. Issue 10, 2024

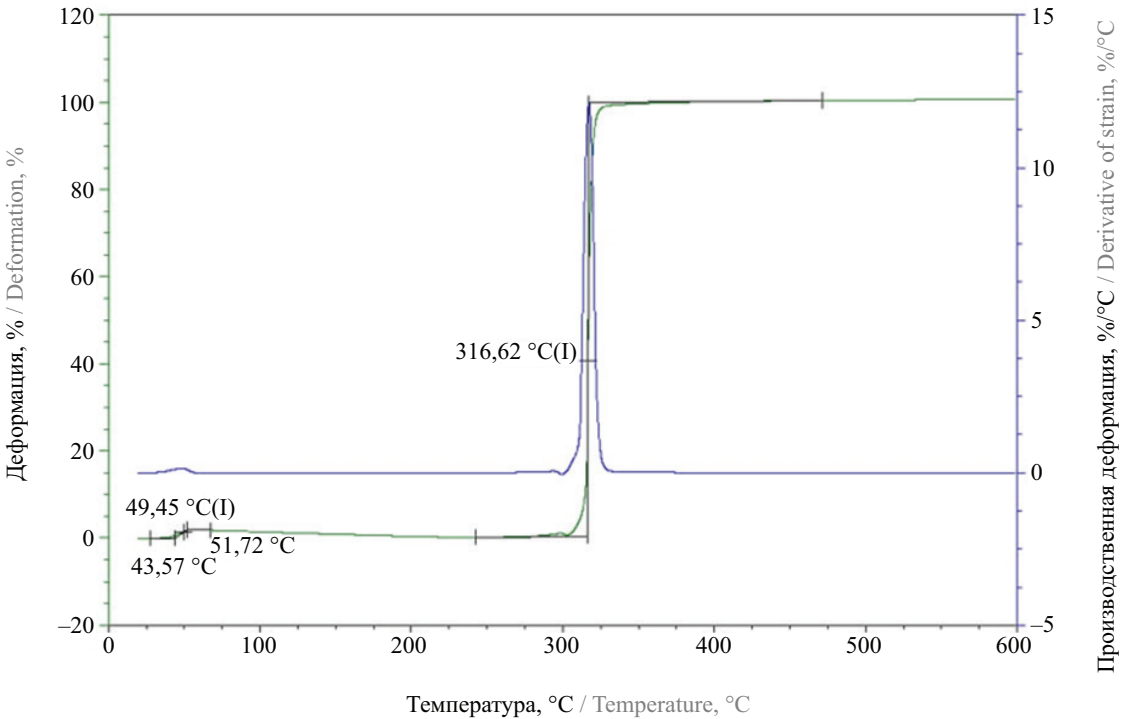


Рис. 6. Термомеханическая кривая образца из отвержденного химического анкера
Fig. 6. Thermomechanical curve of a cured chemical anchor sample

Табл. 2. Результаты определения прочности при изгибе
Table 2. Results of determination of flexural strength

Номер / Number	Высота, мм Height, mm	Ширина, мм Width, mm	Длина, мм Length, mm	Площадь сечения, мм ² Area, mm ²	Нагрузка, Н Load, N	Прочность при изгибе, МПа Flexural strength, MPa	Прочность серии, МПа Average strength, MPa	Модуль упругости, МПа Elastic modulus, MPa	Модуль серии, МПа Average elastic modulus, MPa
1	10,0	10,3	200,0	102,8	198,3	43,3	48,0	3738	3911
2	10,0	10,4	200,0	104,3	231,0	49,7		3931	
3	9,7	10,2	200,0	99,2	241,2	56,2		4038	
4	9,6	10,0	200,0	96,1	197,3	48,1		4033	
5	9,5	10,6	200,0	100,0	203,5	48,5		3815	
6	10,1	10,1	200,0	101,9	193,8	42,4		3911	

Табл. 3. Результаты определения прочности на сжатие

Table 3. Results of determination of compressive strength

Номер / Number	Ширина, мм Width, mm	Толщина, мм Length, mm	Нагрузка при пределе текущей, Н Load at yield point, N	Напряжение при пределе текущей, МПа Stress at yield point, MPa	Напряжение при пределе текущей серии, МПа Average stress at yield point, MPa	Максимальная нагрузка, Н Maximum load, N	Предел прочности на сжатие, МПа Compressive strength, MPa	Предел прочности серии, МПа Average strength, MPa
1	9,93	3,79	3136	83,3	80,5	5254	139,6	123,4
2	9,92	4,03	3084	77,1		4445	111,2	
3	9,92	3,80	3071	81,5		4386	116,4	
4	9,88	3,85	3089	81,2		4449	117,0	
5	9,99	3,96	3133	79,2		5247	132,6	

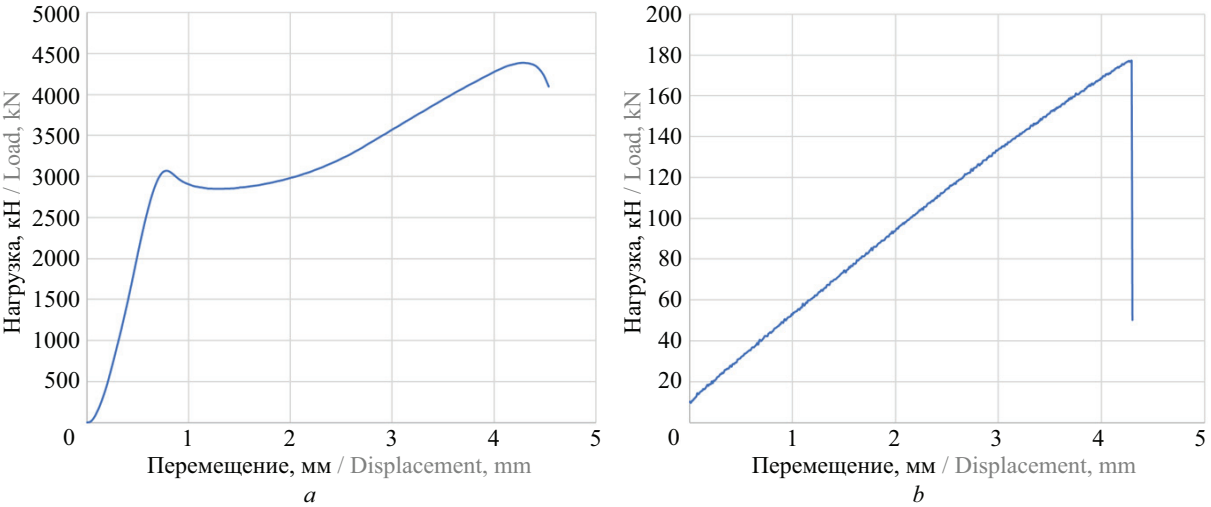


Рис. 7. Характерные диаграммы деформирования образцов из химического анкера: *a* — при изгибе; *b* — при сжатии

Fig. 7. Typical diagrams of deformation of samples from a chemical anchor: *a* — during bending; *b* — during compression

снижение прочности на вырыв (на 29,7 и 64,7 % соответственно). Положительный эффект постотверждения, связанный с увеличением степени полимеризации эпоксидного компаунда при воздействии повышенной температуры, вероятно, может быть достигнут при условии, что температура не будет превышать температуры начала стеклования связую-

щего (+43,6 °C) с некоторым запасом, учитывающим экзотермические эффекты реакций постотверждения.

Установлено, что при выдерживании образцов, твердевших в течение 1 сут при комнатной температуре, при температуре –60 °C прочность сцепления с бетоном незначительно увеличилась по сравнению с контрольными образцами (на 4,6 %).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Топчий Д.В., Катасонова М.А., Юргайтис А.Ю.* Техническое нормирование современных методов ведения строительных работ при реконструкции, перепрофилировании и технологическом перевооружении зданий и сооружений // *Инновации и инвестиции.* 2019. № 6. С. 281–285. EDN SKOCBD.

2. *Бокарев С.А., Мурованный Ю.Н., Усольцев А.М., Мурованный И.Ю.* Натурные и лабораторные испытания конструкции усиления металлическими накладками // *Интернет-журнал Науковедение.* 2013. № 3 (16). С. 167. EDN QZYAAJ.

3. *Бондаренко И.Н., Малашкин Ю.Н., Качков Н.А., Бондаренко В.И.* О работе кирпичной об-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 19. Выпуск 10, 2024
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 19, Issue 10, 2024

лицовки современных высотных зданий // Вестник МГСУ. 2010. № 4. С. 43–48. EDN RTUJFF.

4. Людковский А.М. Опыт усиления железобетонного каркаса плоскими капителями, установленными сверху перекрытия // Вестник МГСУ. 2015. № 4. С. 80–89. EDN TPKORJ.

5. Contrafatto L., Cosenza R. Behaviour of post-installed adhesive anchors in natural stone // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 68. Pp. 355–369. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.099

6. Cook R.A. Behavior of Chemically Bonded Anchors // Journal of Structural Engineering. 1993. Vol. 119. Issue 9. Pp. 2744–2762. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1993)119:9(2744)

7. Cook R.A. Factors influencing bond strength of adhesive anchors // ACI Structural Journal. 2001. Vol. 98. Issue 1. DOI: 10.14359/10149

8. Cook R.A., Kunz J., Fuchs W., Konz R.C. Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete // ACI Structural Journal. 1998. Vol. 95. Issue 1. DOI: 10.14359/522

9. Грановский А.В., Павлова М.О., Ласкевич В.Ч. Оценка прочности заделки металлических анкеров в кирпичную кладку // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2000. № 4. С. 6–7. EDN YTYRGR.

10. Грановский А.В., Павлова М.О. Исследование прочности и деформативности стен из керамического кирпича в зоне заделки металлических анкеров // Промышленное и гражданское строительство. 2001. № 10. С. 17–18. EDN YXXQAP.

11. Richardson A.E., Dawson S., Campbell L., Moore G., Mc Kenzie C. Temperature Related Pull-out Performance of Chemical Anchor Bolts in Fibre Concrete // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 196. Pp. 478–484. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.144

12. Xu C., Shu J., Qi T. Experimental Research on Tensile Properties of Chemical Anchor Bolt Groups after High Temperature // 2022 International Conference on Computational Infrastructure and Urban Planning. 2022. Vol. 774. Pp. 61–68. DOI: 10.1145/3546632.3546881

13. Xu C., Zhou B., Peng S. Experimental Research on Anchoring Performance of Chemical Anchor Bolt in Building Curtain Wall Engineering // IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 774. Issue 1. P. 012149. DOI: 10.1088/1757-899X/774/1/012149

14. Sasmal S., Thiagarajan R., Lieberum K.H., Koenders E.A.B. Numerical simulations of progression of damage in concrete embedded chemical anchors // Computers and Concrete. 2018. Vol. 22. Issue 4. Pp. 395–405. DOI: 10.12989/cac.2018.22.4.395

15. Xu C., Gu Y., Peng S. Experimental Research on Anchoring Behavior of Chemical Anchor Bolt under Repeated Loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 774. Issue 1. P. 012134. DOI: 10.1088/1757-899X/774/1/012134

16. Lahouar M., Caron J.-F., Pinoteau N., Forêt G., Benzarti K. Mechanical behavior of adhesive anchors under high temperature exposure: experimental investigation // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2017. Vol. 78. Pp. 200–211. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2017.07.004

17. Çaliskan Ö., Karakurt C., Aras M., Kaya T. Behaviors of Chemical Anchors Installed in Different Types of Concrete. 2022. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1570263/v1

18. Çaliskan Ö., Aras M. Experimental investigation of behaviour and failure modes of chemical anchorages bonded to concrete // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 156. Pp. 362–375. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.179

19. Bajer M., Kala J., Barnat J. Steel chemical members anchored in concrete // VIII International Conference on Computational Plasticity COMPLAS VIII. 2005.

20. Çalışkan Ö., Aras M., Ağdağ Y. Experimental investigations the effects of dusty, humidity and temperature conditions on chemical anchors // Revista de la construcción. 2023. Vol. 22. Issue 3. Pp. 613–631. DOI: 10.7764/RDLC.22.3.613

21. Кабанцев О.В., Ковалев М.Г. Определение механических характеристик анкеров в поврежденном бетонном основании // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 57–65. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.57-65. EDN KLZJLO.

22. Иржак В.И. Эпоксидные полимеры и нанокомпозиты. Черноголовка : Редакционно-издательский отдел ИПХФ РАН, 2021. 319 с.

Поступила в редакцию 3 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 18 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Виктория Андреевна Швецова — преподаватель кафедры строительного материаловедения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ShvetsovaVA@mgsu.ru;

Михаил Германович Ковалев — преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; KovalevMG@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Topchiy D.V., Katasonova M.A., Yurgaitis A.Yu. Technical standardization of modern methods of conducting construction work during reconstruction, repurposing and technological re-equipment of buildings and structures. *Innovation and Investment*. 2019; 6:281-285. EDN SKOCBD. (rus.).
2. Bokarev S.A., Murovannyi Y.N., Usoltsev A.M., Murovannyi I.Y. Field and laboratory testing of reinforcing construction with steel plates. *Naukovedenie*. 2013; 3(16):167. EDN QZYAAJ. (rus.).
3. Bondarenko I.N., Malakshin U.N., Kachkov N.A., Bondarenko V.I. The article tells about work of brick facing of modern high-strength building. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 4:43-48. EDN RTUJF. (rus.).
4. Lyudkovskiy A.M. The Experience of Strengthening Reinforced Concrete Frame by Flat Capitals, Installed on the Top of Slabs. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 4:80-89. EDN TPKORJ. (rus.).
5. Contrafatto L., Cosenza R. Behaviour of post-installed adhesive anchors in natural stone. *Construction and Building Materials*. 2014; 68:355-369. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.099
6. Cook R.A. Behavior of Chemically Bonded Anchors. *Journal of Structural Engineering*. 1993; 119(9):2744-2762. DOI: 10.1061/(asce)07339445 (1993)119:9(2744)
7. Cook R.A. Factors influencing bond strength of adhesive anchors. *ACI Structural Journal*. 2001; 98(1). DOI: 10.14359/10149
8. Cook R.A., Kunz J., Fuchs W., Konz R.C. Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete. *ACI Structural Journal*. 1998; 95(1). DOI: 10.14359/522
9. Granovsky A.V., Pavlova M.O., Laskevich V.Ch. Evaluation of the strength of embedding metal anchors in brickwork. *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*. 2000; 4:6-7. EDN YTYRGR. (rus.).
10. Granovsky A.V., Pavlova M.O. Study of the strength and deformability of walls made of ceramic bricks in the area of embedding metal anchors. *Industrial and Civil Engineering*. 2001; 10:17-18. EDN YXXQAP. (rus.).
11. Richardson A.E., Dawson S., Campbell L., Moore G., Mc Kenzie C. Temperature Related Pull-out Performance of Chemical Anchor Bolts in Fibre Concrete. *Construction and Building Materials*. 2019; 196:478-484. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.144
12. Xu C., Shu J., Qi T. Experimental Research on Tensile Properties of Chemical Anchor Bolt Groups after High Temperature. *2022 International Conference on Computational Infrastructure and Urban Planning*. 2022; 774:61-68. DOI: 10.1145/3546632.3546881
13. Xu C., Zhou B., Peng S. Experimental Research on Anchoring Performance of Chemical Anchor Bolt in Building Curtain Wall Engineering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 774(1):012149. DOI: 10.1088/1757-899X/774/1/012149
14. Sasmal S., Thiyagarajan R., Lieberum K.H., Koenders E.A.B. Numerical simulations of progression of damage in concrete embedded chemical anchors. *Computers and Concrete*. 2018; 22(4):395-405. DOI: 10.12989/cac.2018.22.4.395
15. Xu C., Gu Y., Peng S. Experimental Research on Anchoring Behavior of Chemical Anchor Bolt under Repeated Loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 774(1):012134. DOI: 10.1088/1757-899X/774/1/012134
16. Lahouar M., Caron J.-F., Pinoteau N., Forêt G., Benzarti K. Mechanical behavior of adhesive anchors under high temperature exposure: experimental investigation. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2017; 78:200-211. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2017.07.004
17. Çaliskan Ö., Karakurt C., Aras M., Kaya T. Behaviors of Chemical Anchors Installed in Different Types of Concrete. 2022. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1570263/v1
18. Çaliskan Ö., Aras M. Experimental investigation of behaviour and failure modes of chemical anchorages bonded to concrete. *Construction and Building Materials*. 2017; 156:362-375. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.179
19. Bajer M., Kala J., Barnat J. Steel chemical members anchored in concrete. *VIII International Conference on Computational Plasticity COMPLAS VIII*. 2005.
20. Çaliskan Ö., Aras M., Ağdağ Y. Experimental investigations the effects of dusty, humidity and temperature conditions on chemical anchors. *Revista de la construcción*. 2023; 22(3):613-631. DOI: 10.7764/RDLC.22.3.613
21. Kabantsev O.V., Kovalev M.G. Determination of mechanical characteristics of anchors in damaged concrete base. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 9:57-65. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.57-65. EDN KLZJLO. (rus.).
22. Irzhak V.I. *Epoxy polymers and nanocomposites*. Chernogolovka, Editorial and Publishing Department of the IPCP RAS, 2021; 319. (rus.).

Received March 3, 2024.

Adopted in revised form on March 18, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

B I O N O T E S: **Victoria A. Shvetsova** — lecturer at the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ShvetsovaVA@mgsu.ru;

Mikhail G. Kovalev — lecturer at the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; KovalevMG@mgsu.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 666.962.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1629-1640

Структура и свойства магнезиального камня, полученного активацией каустического доломита

Юлия Вячеславовна Бикаева¹, Руслан Абдирашитович Ибрагимов¹,
Илья Дмитриевич Твердов²

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия;

² Университет Иннополис; г. Иннополис, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлено решение актуальной проблемы дефицита запасов сырья с высоким содержанием MgO путем вовлечения в производство низкомагнезиального сырья из доломитизированного известняка. Для этого предложено повышение активности вяжущего предварительной механоактивацией в аппарате вихревого слоя (АВС). Цель исследования — определение влияния механоактивации каустического доломита (КД) совместно с пластификаторами в АВС на состав, структуру и свойства магнезиального камня.

Материалы и методы. Механоактивация КД проводилась в АВС, анализ поверхности получаемого образца — на лазерном анализаторе. Для определения фазового состава полученных образцов применяли рентгенофазовый анализ.

Результаты. Впервые исследованы закономерности твердения, фазового состава магнезиальных вяжущих от продолжительности диспергации порошка КД, концентрации пластифицирующих добавок. Получена плотная и прочная матрица с высокими физико-механическими свойствами. Изучено влияние пластифицирующих добавок на основе лигносульфоната, полиэфира поликарбоксилата и нафталинсульфоформальдегида на состав, свойства и структуру магнезиального камня до и после активации вяжущего. Определены наиболее эффективные концентрации добавок, повышающие прочность на сжатие магнезиального камня в возрасте 28 сут от 35 до 120 %. Установлен оптимальный диапазон продолжительности активации и научно обосновано его влияние на физико-химические, морфологические свойства полученных образцов.

Выводы. Активация магнезиального вяжущего совместно с добавками при оптимальном режиме обработки в АВС позволяет получить магнезиальный камень с регулируемым набором свойств: высокой плотностью, прочностью на сжатие в марочном возрасте. Повышение прочности модифицированного магнезиального камня образцов, активированных в АВС совместно с добавкой пластификатора, объясняется формируемой структурой с большей плотностью, сниженным размером кристаллитов и высокой плотностью дислокаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: активность, каустический доломит, механоактивация, магнезиальный камень, аппарат вихревого слоя

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00524 (URL: <https://rscf.ru/project/24-29-00524/>).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бикаева Ю.В., Ибрагимов Р.А., Твердов И.Д. Структура и свойства магнезиального камня, полученного активацией каустического доломита // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 10. С. 1629–1640. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1629-1640

Автор, ответственный за переписку: Юлия Вячеславовна Бикаева, uliyavestigneeva@mail.ru.

Structure and properties of magnesia stone obtained by activation of caustic dolomite

Yuliya V. Bikaeva¹, Ruslan A. Ibragimov¹, Iliya D. Tverdov²

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation;

² Innopolis University; Innopolis, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The solution of the actual problem of deficit of reserves of raw materials with high MgO content by involving low-magnesian raw materials from dolomitized limestone into production is presented. For this purpose, it was proposed to increase the activity of the binder using preliminary mechanical activation in the vortex layer device. The aim of the study is to determine the effect of mechanical activation of caustic dolomite with plasticizers in the vortex layer device on the composition, structure and properties of magnesia stone.

Materials and methods. Mechanical activation of the caustic dolomite was performed using a vortex layer device and the surface analysis of obtained specimens was carried out using a laser analyzer. X-ray analysis was used to determine the phase composition of the obtained specimens.

Results. Regularities of hardening, phase composition of magnesia binders from duration of dispersion of caustic dolomite powder and concentration of plasticizing additives were investigated for the first time. A dense and strong matrix with high physical and mechanical properties is obtained. The effect of plasticizing additives based on lignosulfonate, polyester polycarboxylate and naphthalene sulfate formaldehyde on the composition, properties and structure of magnesia stone before and after activation of the binder is studied. The most effective additive concentrations were determined to increase the compression strength of magnesia stone from 35 to 120 % at the age of 28 days. The optimal duration range of activation was established and scientifically validated its impact on physical-chemical and morphological properties of the obtained specimens.

Conclusions. Activation of magnesia binder with additives under optimal treatment conditions in the vortex layer device allows to obtain a magnesia stone with an adjustable set of properties: high density, compression strength in grades. The increase in strength of modified magnesia stones activated in vortex layer device with the addition of plasticizer is explained by higher density structure, low crystallite size and high density of dislocations.

KEYWORDS: activity, caustic dolomite, mechanical activation, magnesia stone, vortex layer device

Acknowledgements. The study was carried out at the expense of grant of Russian Science Foundation No. 24-29-00524 (URL: <https://rscf.ru/project/24-29-00524/>).

FOR CITATION: Bikaeva Yu.V., Ibragimov R.A., Tverдов I.D. Structure and properties of magnesia stone obtained by activation of caustic dolomite. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1629-1640. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1629-1640 (rus.).

Corresponding author: Yuliya V. Bikaeva, ulyaevstigneeva@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Магнезиальные вяжущие представляют собой воздушные вяжущие, открытые в XIX в. Сорелем, затворяемые водными растворами солей хлорида или сульфата магния. Встречающееся в природе сырье для получения магнезиальных вяжущих неоднородно по составу, содержанию оксида магния и обогащено такими примесями, как доломит, кварц, кальцит, ангидрит и другими. В связи с повышенным интересом к вовлечению в производство новых или незадействованных месторождений [1], минеральных отходов промышленности [2, 3] все больше используются породы с высоким процентным содержанием примесей. Актуальными становятся вопросы, связанные с повышением активности вяжущих материалов, полученных из низкомагнезиального (IV класса) сырья, с содержанием активного MgO не более 15 %, согласно классификации в работе [4]. Под понятием «активность вяжущего» подразумевается кинетика твердения кристаллического твердого тела, получаемого при гидратации MgO. Такой мерой может служить энергия Гиббса, определяемая по отношению к фазе тождественного состава в нормальном состоянии [5]:

$$\Delta G_{\text{изг}} = G_{\text{Такт}} - G_{\text{Т}} \quad (1)$$

где $G_{\text{Такт}}$ и $G_{\text{Т}}$ — энергии Гиббса фазы в активном и нормальном состояниях.

Известно, что гидратационная активность MgO и скорость гидратации с ростом температуры обжига резко снижаются за счет значительного количества атомных дефектов, вызванных разложением гексагональной решетки MgCO_3 в гранецентрированную кубическую MgO с уменьшением объема в 3,7 раза. На продукты обжига в свою очередь влияют дисперсный состав предварительно дробленого сырья, режим обжига и вид печи. Таким образом, гидратационную активность можно регулировать: морфологией исходного сырья, темпера-

турой обжига, степенью дисперсности вяжущего, степенью кристалличности (дефектности структуры) обожженного сырья, процентного содержания активных частиц [6, 7].

Одним из методов повышения активности вяжущего является механическая активация (МА) материала — диспергация в энергонапряженных агрегатах [8]. При МА резко возрастает скорость накопления дефектов частиц, снижается химическая устойчивость, что сопровождается ослаблением связей между атомами. Система переходит в неравновесное состояние из-за возникшей избыточной энергии активации и невысокой скорости «заживления» дефектов после помола [9].

На сегодняшний день известны различные способы осуществления механоактивации: в мельницах (планетарных, шаровых, барабанных, вибрационных), дезинтеграторах, дробилках (щековых, конусных, молотковых) [10]. Однако исследование структуры и закономерностей твердения магнезиальных вяжущих, полученных активацией каустического доломита (КД) в аппаратах вихревого слоя, практически не проводилось.

Подверженные активации вяжущие материалы из минерального сырья модифицируют физико-химическое взаимодействие композиционного материала на макроструктурном уровне [11, 12]. Активацию производят как всего вяжущего материала, так и композиционной смеси, в которую входят наполнители, добавки различной природы [13]. Совместная механоактивация доломита и кварца в планетарной мельнице влияет на ускоренное протекание механохимической деформации и аморфизацию доломитовой фазы: увеличивается число ступеней термического разложения доломита до четырех и понижается температурный диапазон разложения доломита [14].

Для интенсификации помола возможно применение мокрого помола [15], который был обнару-

жен П.А. Ребиндером в 1982 г. При мокром помоле наблюдается абсорбционное понижение прочности твердых частиц. Их активное перемещение по образовавшимся микротрещинам-дефектам вследствие введения активных веществ (вода, ПАВ) ведет к снижению межфазной энергии и ускоренному диспергированию материала. Г.С. Ходаков также определил, что введение 1 % воды при сухом помоле значительно повышает дисперсность измельчаемого материала [16].

Введение добавок при активации модифицированного композиционного вяжущего привело к ускорению протекания химических реакций, повышению прочности на сжатие в 2 раза, высокой механической прочности [17]. Влияние добавок различных суперпластификаторов, их концентрация были исследованы А.В. Вольфом, А.М. Маноха [18], Т.Н. Черных, Л.Я. Крамар [19]. В этих работах установлены зависимости прочности, пластичности магнезиального теста, нормальной густоты от дозировок пластификаторов. Но совместное влияние механоактивации магнезиального вяжущего в присутствии добавок пластификаторов практически не изучалось.

Цель данного исследования — установление влияния механохимической активации каустического доломита совместно с пластификаторами в аппарате вихревого слоя (АВС) на состав, структуру и свойства магнезиального камня.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве сырья для получения магнезиального вяжущего был использован доломит Матюшинского месторождения с химическим составом, представленным в табл. 1.

Сырье этого месторождения соответствует предъявляемым требованиям ГОСТ 23673.1–2020 к наименьшему содержанию MgO 16–18 %, CaO не более 32–34 %, примеси не более 2,5 % и является «доломитизированным известняком» согласно классификации Вишнякова. Кусковое исходное сырье подвергалось дроблению в щековой дробилке до фракции щебня (табл. 2).

В качестве затворителя выбран хлорид магния (бишофит) $MgCO_2 \cdot 6H_2O$ в виде водного раствора плотностью 1080–1250 кг/м³. В качестве добавок использованы следующие суперпластификаторы (СП):

- ЛСТ — химическая добавка на основе солей лигносульфоновых кислот, представляет собой однородную густую жидкость темно-коричневого цвета, плотность — не менее 1180 кг/м³, массовая доля сухих веществ — не менее 47 %, выпускается на производстве «Росхимпром»;
- Melflux 2651F — химическая добавка на основе полиэфиркарбоксилата (полимерная цепь образована α, β-ненасыщенными карбоновыми кислотами), порошок насыпной плотностью 0,4–0,6 г/см³, выпускается концерном BASF;
- С-3 — химическая добавка, продукт конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида, представляет собой водорастворимый порошок с массовой долей сухого вещества не менее 32 %, выпускается компанией «ПОЛИПЛАСТ».

Для дальнейших исследований образцы изготавливались размером 2 × 2 × 2 см и твердели в течение 28 сут в нормально влажностных условиях. Образцы испытывались на прочность при сжатии в возрасте 3, 28 сут твердения на механическом прессе ПРГ-1-100 (100кН/10 т). В каждой серии изготавливалось не менее 6 образцов. С целью определения водопотребности и нормальной густоты магнезиального цемента использовался прибор Вика.

Механической активации подвергали образцы из КД, полученного предварительным обжигом исходной породы. Механическая активация проводилась в аппарате вихревого слоя VORTEXPROМ при следующих параметрах обработки материала, принятых по результатам исследований [20]: время активации — 3–8 мин; частота вращения

Табл. 1. Химический состав доломита Матюшинского месторождения

Table 1. Chemical composition of dolomite of the Matyushino deposit

Наименование показателя Parameter name	MgO	H ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	Потери при прокаливании Weight loss after calcination
Массовая доля, % Weight fraction, %	20	7	32	6	35

Табл. 2. Гранулометрический состав измельченного доломита

Table 2. Partical size destribution of milled dolomite

Фракция доломита, мм Dolomite fraction, mm	<0,15	>0,15	>0,25	>1	>2
Массовая доля, % Weight fraction, %	6,70	40,61	26,66	10,25	16,44

электромагнитного поля — 70 Гц; отношение диаметра ферромагнитных тел к их длине 1:0,12; отношение массы ферромагнитных тел к массе измельчаемого материала — 0,4. Определение удельной поверхности частиц производили на лазерном анализаторе частиц Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950. РФА выполняли на дифрактометре рентгеновском Rigaku SmartLab.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Повышение активности КД проводилось последовательно в два этапа. На первом этапе определяли вид, количество пластифицирующих добавок и их влияние на прочность магнезиального камня.

Выбраны следующие основные входные параметры экспериментальных исследований [21]: соотношение вяжущего к хлориду магния $MgO:MgCl_2 = 1:0,4$, обеспечивающее формирование твердого стабильного раствора гидроксидхлорида (ГОХ) магния; концентрация затворителя 18–30 %; дисперсность магнезиального сырья (каустический магнезит — менее 0,014–0,08 мм, КД — от 0,05 до 2 мм). Пластификаторы

вводили в раствор бишофита, затем полученной смесью затворяли каустический доломит. В качестве критерия оптимизации выбраны прочность на сжатие образцов кубиков размером $2 \times 2 \times 2$ см в возрасте 28 сут твердения; нормальная густота магнезиального вяжущего; концентрация пластификаторов от 0,25 до 1,5 % от массы вяжущего.

Влияние пластификаторов на прочность при сжатии магнезиального камня в возрасте 28 сут нормального твердения представлено на рис. 1. Увеличение концентрации добавки С-3 в первые дни твердения повысило скорость протекания реакции, однако с увеличением продолжительности твердения кинетика набора прочности уменьшилась и не превысила значения исходного бездобавочного состава. Наибольший эффект повышения прочности получен с добавкой ЛСТ в количестве 0,5 %, где прирост прочности составил 16 МПа (в 1,6 раз выше исходного состава). Введение добавки MF с концентрацией до 0,5 % повысило значение прочности на сжатие в возрасте 3 сут в 2 раза, в возрасте 28 сут — на 27 %.

В связи с этим для дальнейших исследований были выбраны добавки на основе лигносульфонатов

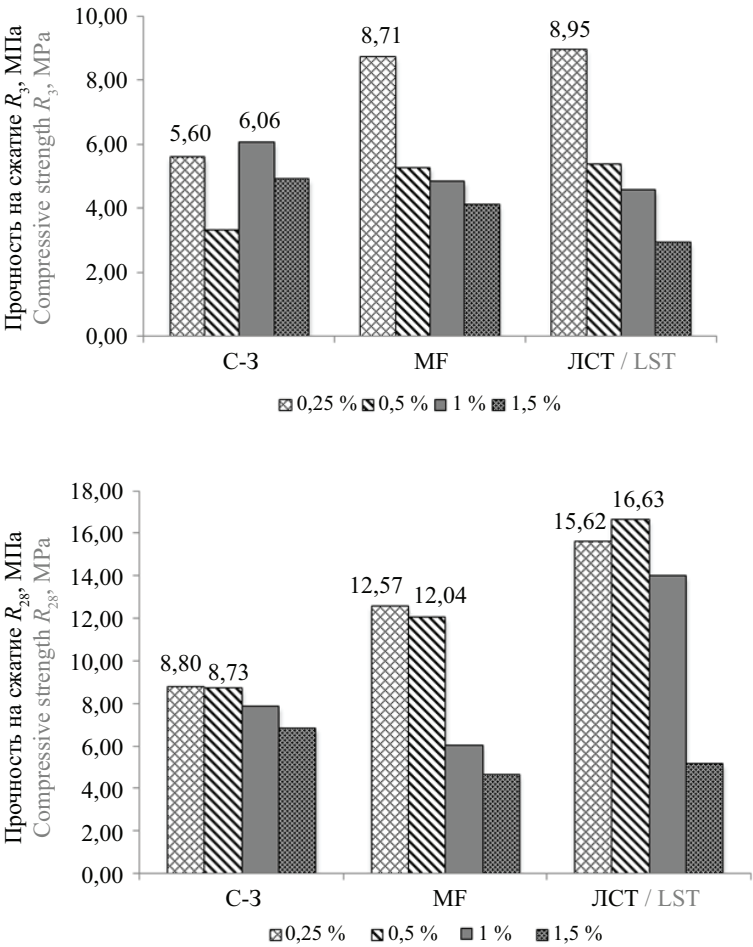


Рис. 1. Прочность образцов магнезиального камня с добавками пластификаторов (С-3, MF, ЛСТ) при концентрации 0,25–1,5 % в возрасте 3 и 28 сут

Fig. 1. Compressive strength of magnesia stone with plasticizing additives (C-3, MF, LST) at concentrations ranging from 0.25 to 1.5 % at the ages of 7 and 28 days

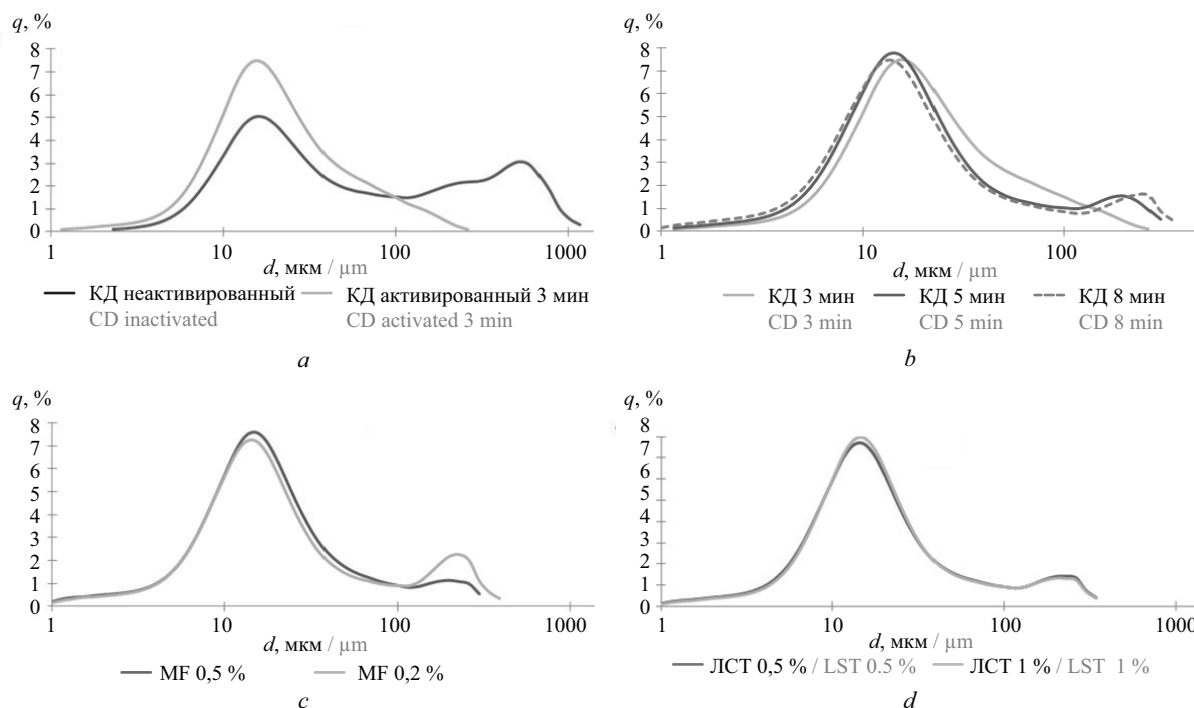


Рис. 2. Дифференциальные кривые распределения частиц порошков: *a* — неактивированного каустического доломита и активированного в АВС в течение 3 мин; *b* — активированного КД в АВС в течение 3, 5, 8 мин; *c* — активированного в течение 5 мин КД совместно с добавкой Melflux; *d* — активированного в течение 5 мин КД совместно с добавкой ЛСТ

Fig. 2. The differential curves of particle size distribution of powders: *a* — inactivated and activated CD (caustic dolomite) in VLD (Vortex Layer Device) for 3 min; *b* — activated CD in VLD for 3, 5, 8 min; *c* — activated CD for 5 min joint with Melflux additive; *d* — activated CD for 5 min joint with LST (lignosulfonate) additive

с концентрацией 0,5–1 % и на основе эфиров поликарбоксилатов с концентрацией 0,25–0,5 %.

На втором этапе сначала производился помол обожженного доломита в АВС, а затем осуществлялась совместная активация КД с выбранными добавками. По результатам седиментационного анализа получены кривые распределения частиц по размерам следующих порошков: неактивированного КД, активированного каустического доломита в АВС в течение 3–8 мин, совместно с добавками MF и ЛСТ. Распределение частиц до обработки в АВС — бимодальное (рис. 2, *a*), при активации в течение 3 мин становится одномодальным с содержанием частиц 1–262 мкм.

Дальнейшая активация приводит к увеличению удельной поверхности в 4,5 раза и появлению второй моды в интервале 88–340 мкм (рис. 2, *b*). Максимальные значения первой и второй моды у активированных образцов совпадают, как и их процентное содержание в порошке.

Уменьшение ширины моды распределения частиц наблюдается у образцов, активированных в течение 3 мин, о чем свидетельствует минимальное значение стандартного отклонения вокруг среднего значения (табл. 3). Диапазон отклонения значений от среднего размера частиц колеблется от 12 до 21 %.

Увеличение времени активации приводит к агрегации частиц КД и постепенному снижению

удельной поверхности частиц на 20 %. Максимальные значения при двухмодальном распределении частиц представлены координатами соответствующей моды с размером частиц 15, 17 и 200 мкм.

На третьем этапе образцы-кубики из магниезиального камня были испытаны на сжатие в возрасте 3 и 28 сут нормально влажностного твердения. Из гистограммы видно (рис. 3), что активация КД не оказала заметного влияния на прочность образцов магниезиального камня. Так прочность образцов, активированных в течение 5 мин, на сжатие на 3 сут твердения составила 23,5 МПа, а на 28 сут прочность снизилась на 4 % в сравнении с исходным составом.

Введение добавки ЛСТ оказало заметное влияние на раннее структурообразование. Замедлив протекание реакции образования гидрооксидхлорида на 3 сут, образцы магниезиального камня со средней плотностью 1,85 г/см³ показали прочность на сжатие в 0,56–0,72 раза меньше исходного магниезиального камня.

Наибольший эффект наблюдался при введении добавки ЛСТ в количестве 1 %, при этом прочность образцов на сжатие в возрасте 28 сут повысилась в 2,25 раза, а в количестве 0,5 % — в 2,17 раза по сравнению с контрольным составом. При введении добавки MF в количестве 0,25 % прочность на сжатие повысилась в 1,34 раза по сравнению с контрольным составом.

Табл. 3. Характеристики порошков каустического доломита

Table 3. Characteristics of caustic dolomite powders

Наименование Name	Средний размер частиц, мкм Mean particle diameter, μm	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$ Specific surface area, m^2/kg	Координата соответствующей моды, мкм/процентное содержание, % Coordinate of the corresponding mode, μm /percentage, %	
КД CD (caustic dolomite)	151,85 $\pm 14,84$	14,1	15,17/5,03	517,2/3,07
КД активированный 3 мин Activated CD for 3 min	28,96 $\pm 3,49$	73,99	15,17/7,49	
КД активированный 5 мин Activated CD for 5 min	33,84 $\pm 6,3$	63,32	15,17/7,73	200/1,54
КД активированный 8 мин Activated CD for 8 min	35,65 $\pm 7,8$	60,11	13,25/7,47	229,07/1,59
КД активированный 5 мин с MF 0,25 % Activated CD for 5 min joint with Melflux with concentration of 0.25 %	43,59 $\pm 9,3$	49,16	15,17/7,22	229,07/2,26
КД активированный 5 мин с MF 0,5 % Activated CD for 5 min joint with Melflux with concentration of 0.5 %	31,27 $\pm 10,8$	68,53	15,17/7,6	200/1,14
КД активированный 5 мин с ЛСТ 0,5 % Activated CD for 5 min joint with LST with concentration of 0.5 %	35,31 $\pm 12,3$	60,69	15,17/7,67	229,07/1,42
КД активированный 5 мин с ЛСТ 1 % Activated CD for 5 min joint with LST with concentration of 1 %	34,49 $\pm 13,8$	62,13	15,17/7,96	200/1,33

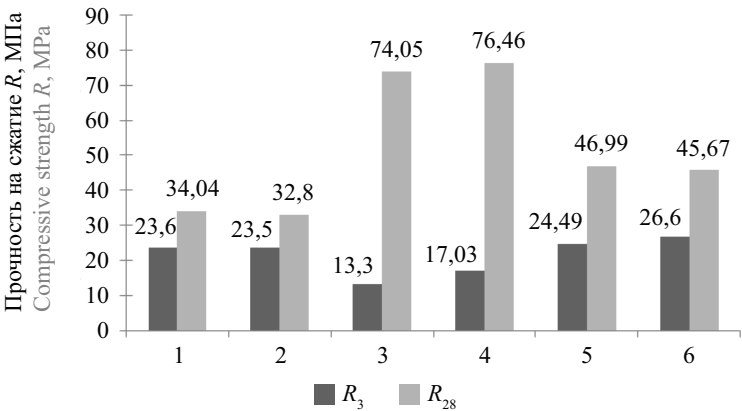


Рис. 3. Прочность образцов магнезального камня на сжатие в возрасте 3, 28 сут: 1 — исходный; 2 — активированный КД; активированные составы совместно с пластификаторами; 3 — ЛСТ 0,5 %; 4 — ЛСТ 1 %; 5 — MF 0,25 %; 6 — MF 0,5 %

Fig. 3. Compressive strength of magnesia stone at the ages of 7 and 28 days: 1 — initial specimen; 2 — activated CD; activated compounds joint with additives; 3 — LST 0.5 %; 4 — LST 1 %; 5 — MF 0.25 %; 6 — MF 0.5 %

Выполнен РФА образцов магнезиального камня, твердевших в течение 28 сут. Нумерация образцов и фазовый состав магнезиального камня приведены в табл. 4. На рис. 4 представлена дифрактограмма образца КД без добавок.

Для объяснения существенной разницы в прочности на сжатие полученных образцов необходимо определить размер блоков мозаики L_d (областей однородности структуры внутри кристаллов фаз [22]) по следующей формуле:

$$L_d = \lambda \cdot 180^\circ / (\pi \cdot \nu \cdot \cos \theta),$$

(2)

где λ — длина волны излучения медного анода, равная 1,537 Å; ν — полуширина пика, рад; θ — брэгговский угол падения и отражения рентгеновского луча.

Определив плотность дислокаций ρ по формуле:

$$\rho = \frac{3}{L_d^2},$$

(3)

можно судить о гранулометрической однородности, степени упорядоченности кристаллов и дефектности кристаллической структуры образующихся фаз [23].

По данным табл. 4 видно, что размер кристаллитов уменьшается от состава № 1 к составу № 4, при этом наибольшее снижение размера кристаллитов (на 30 % по сравнению с составом № 1) наблюдается в составе, полученном при совместной активации добавки ЛСТ в АВС. Плотность дислокаций имеет большое значение при определении

дефектности образующейся структуры. Плотность дислокаций увеличивается от состава № 1 к составу № 4, что свидетельствует об увеличении удельной поверхности образующейся структуры и является подтверждением высоких физико-механических характеристик получаемых составов. По результатам РФА установлено, что магнезиальный камень содержит следующий фазовый состав:

- триоксигидрохлорид магния $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \times \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (то же $\text{Mg}_2(\text{OH})_3 \cdot \text{Cl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) с $d/n = 7,182; 5,970; 4,063; 3,571; 2,7166; 2,62; 2,61; 2,579; 2,538; 2,458; 1,982; 1,489$ Å;
- кальцит CaCO_3 с $d/n = 3,846; 3,028; 2,832; 2,488; 2,278; 2,240; 2,1; 2,08; 1,46$ Å;
- доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ с $d/n = 3,7; 2,88; 2,194; 1,804; 1,79; 1,566$ Å;
- кварц с $d/n = 4,26; 3,35$ Å;
- магний Mg с $d/n = 8,758$ Å.

Идентификация фазовых составов по рефлексам на дифрактограммах согласуется с данными авторов [24, 25]. Из-за низкой интенсивности некоторые рефлексы, имеющие соизмеримые значения межплоскостного расстояния на дифрактограммах, в основном были отнесены к химическим соединениям фазы кальцита, доломита.

Повышение прочности магнезиального камня возможно объяснить повышением активности порошка каустического доломита после активации в АВС. Активность порошка КД до и после измел-

Табл. 4. Фазовый состав образцов магнезиального камня

Table 4. Phase composition of magnesium stone specimens

Наименование состава The name of the compound	Фазовый состав Phase composition	Содержание, % масс. Content, % mass.	Размер кристаллитов, нм Crystallite size, nm	Плотность дислокаций, $\text{м}^{-2} \cdot 10^{14}$ Dislocation density, $\text{m}^{-2} \cdot 10^{14}$
КД CD	CaCO_3	65	39	19,7
	$\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	22	32	29,3
	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	10	63	7,5
	SiO_3	3	82	4,5
	Фоязит / Faujasite	<1	58	8,9
КД активированный в течение 5 мин Activated CD for 5 min	CaCO_3	63	35	24,5
	$\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	21	29	35,7
	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	10	57	9,2
	SiO_3	5	74	5,5
	Фоязит / Faujasite	1	52	11,1
Активированный КД с добавкой MF (0,5 %) Activated CD with additive MF (0.5 %)	CaCO_3	62	30	33,3
	$\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	19	27	41,1
	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	12	55	9,9
	SiO_3	6	71	5,9
	Фоязит / Faujasite	1	50	12
Активированный с добавкой ЛСТ (1 %) Activated CD with additive LST (1 %)	CaCO_3	79	27	41,1
	$\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	6	24	52,1
	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	10	49	12,5
	SiO_3	5	67	6,7
	Фоязит / Faujasite	<1	49	12,5

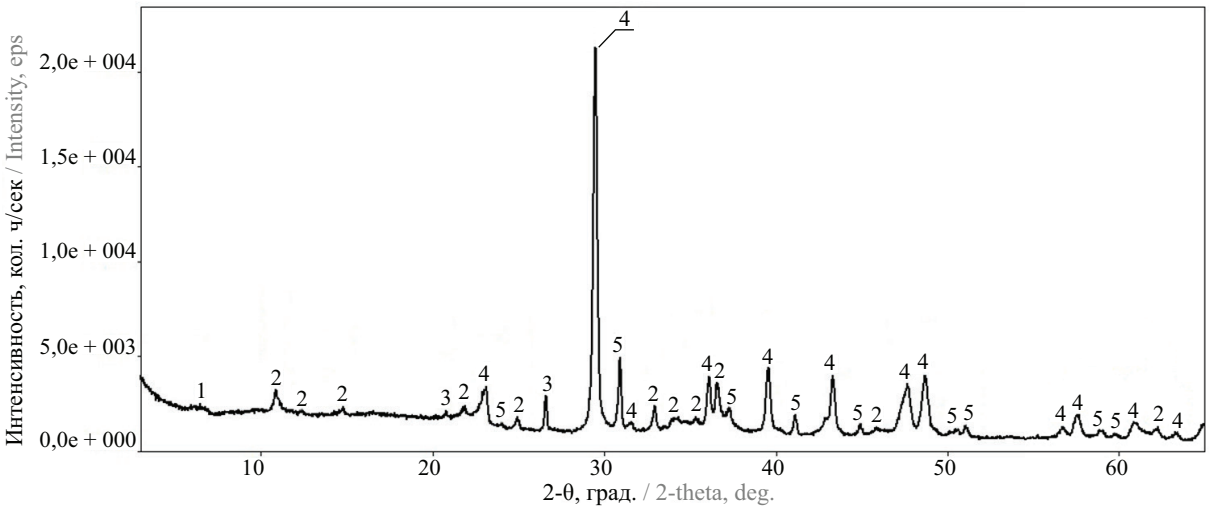


Рис. 4. Дифрактограмма образца КД: 1 — фюзит; 2 — гидроксидхлорид магния; 3 — кварц; 4 — кальцит; 5 — доломит
Fig. 4. Diffractogram of CD specimen: 1 — faujasite; 2 — magnesium hydroxychloride; 3 — quartz; 4 — calcite; 5 — dolomite

чения оценивали термодинамическим способом методом ОВРК (метод Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле) [26, 27]. Расчет термодинамических параметров производился по формуле:

$$\Delta G_s = \Delta \sigma_s + \sigma_s \ln \frac{S_{уд2}}{S_{уд1}}, \tag{4}$$

где σ^s — поверхностное натяжение исследуемого порошка, являющегося суммой дисперсионной и полярной составляющей; $S_{уд1}$ — удельная поверхность до измельчения; $S_{уд2}$ — удельная поверхность после измельчения. Примем значение до активации $\Delta G = 0$, результаты термодинамических параметров порошка КД представлены в табл. 5.

Из данных, приведенных в табл. 5, видно, что максимальное значение изобарно-изотермического потенциала порошка КД достигается после 3 мин измельчения в АВС. Дальнейшее измельчение приводит к отрицательному значению ΔG , что свидетельствует о склонности системы после измельчения более 3 мин к самопроизвольной трансформации. Максимальное положительное значение ΔG , равное $833 \cdot 10^{-3}$ Дж, свидетельствует о стабилизации системы и усилении вяжущих свойств КД.

Табл. 5. Значения термодинамических параметров порошка КД

Table 5. Thermodynamic parameters of CD powder

Время измельчения, мин Grinding time, min	$\sigma_s \cdot 10^{-3}$, Н/м / N/m	$\sigma_s^p \cdot 10^{-3}$, Н/м / N/m	$\sigma_s^D \cdot 10^{-3}$, Н/м / N/m	$\Delta G \cdot 10^{-3}$, Дж / J
0	883	388	495	0
1	1354	562	792	472
2	1968	784	1184	615
3	2800	1503	1297	833
5	2649	1342	1307	–151
8	2431	1253	1178	–218

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выявлено влияние добавок пластификаторов различной химической природы на прочность при сжатии магниального камня, твердевшего в течение 28 сут в нормальных условиях. Установлено, что добавка СП ЛСТ с концентрацией 0,5 % от массы вяжущего увеличивает прочность на сжатие в 1,6 раза, добавка СП Melflux с концентрацией 0,5 % увеличивает прочность на сжатие на 27 %.

Кривые распределения порошков КД после активации в АВС имеют различное распределение. Так, порошок КД до активации имеет двухмодульное распределение, активация порошка КД в АВС в течение 3 мин позволяет получить одномодальное распределение, при этом средний размер частиц уменьшается с 151,85 до 28,96 мкм. Введение добавок пластификаторов не увеличивает общую удельную поверхность КД после активации.

Введение пластификаторов при затворении активированного КД значительно повышает прочность на сжатие КД в возрасте 28 сут: при введении добавки СП ЛСТ наблюдается увеличение на 120 %, при введении добавки СП Melflux — на 35 %.

Повышение прочности модифицированного магнезиального камня образцов, активированных в АВС совместно с добавкой пластификатора, объясняется формируемой структурой с большей плотностью, сниженным размером кристаллитов и высокой плотностью дислокаций.

Оценка термодинамических параметров порошка КД после активации в АВС позволила уста-

новить оптимальное время измельчения — 3 мин, при котором наблюдается высокое значение активности вяжущего, при этом дальнейшее измельчение нецелесообразно, так как значение изотермического потенциала становится отрицательным, что свидетельствует о склонности системы после измельчения более 3 мин к самопроизвольной трансформации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рахимов Р.З. Топливо-энергетический комплекс, экология и минеральные вяжущие вещества // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 3 (61). С. 67–74. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_67. EDN НОАОТХ.
2. Хозин В.Г. Перспективы развития отрасли строительных материалов в свете использования вторичных ресурсов // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. № 1 (11). С. 22–29. EDN NEVNVS.
3. Ермилова Е.Ю., Камалова З.А. Композиционные портландцементы с комплексными минеральными добавками как решение проблемы утилизации техногенных отходов промышленности // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2023. № 2 (3). С. 4–10. EDN KANWFM.
4. Зырянова В.Н., Бердов Г.И. Магнезиальные вяжущие вещества из высокомагнезиальных отходов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2005. № 10 (562). С. 46–53. EDN PFAKQX.
5. Третьяков Ю.Д. Твердофазные реакции. М.: Химия, 1978. 359 с.
6. Воскресенская Л.Е. Некоторые аспекты получения магнезиальных вяжущих нового поколения // Образование. Наука. Культура : мат. Междунар. науч. форума. 2016. С. 857–862. EDN ZNZXHB.
7. Марчик Е.В. Твердение магнезиального цемента на основе каустического доломита // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2010. № 3. С. 10–14. EDN GBOZIK.
8. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В. Прочность композитов на основе модифицированного портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 1. С. 35–41. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.35-41. EDN UZUOSG.
9. Малкин А.И. Закономерности и механизмы эффекта Ребиндера // Коллоидный журнал. 2012. Т. 74. № 2. С. 239. EDN OWEPSL.
10. Голик В.И., Титова А.В. Комбинированные технологии активации минерального сырья // Горная промышленность. 2021. № 5. С. 100–105. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-100-105. EDN NNYLBN.
11. Ибрагимов Р.А., Потапова Л.И., Королев Е.В. Исследование структурообразования активированного наномодифицированного цементного камня методом ИК-спектроскопии // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 3 (57). С. 41–49. DOI: 10.52409/20731523_2021_3_41. EDN XHUPYY.
12. Косарева А.В., Савицкая Ю.А., Харламова К.И. Оценка эффективности методов фракционирования дисперсных микрочастиц // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. № 1 (12). С. 100–103. EDN AENNLJ.
13. Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Строганов В.Ф. Повышение характеристик дорожных цементогрунтов кремнийорганическими соединениями // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 4 (66). С. 301–309. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_301. EDN JZUJND.
14. Makó É. The effect of quartz content on the mechanical activation of dolomite // Journal of the European Ceramic Society. 2007. Vol. 27. Issue 2–3. Pp. 535–540. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.170
15. Tole I., Habermehl-Cwirzen K., Rajczakowska M., Cwirzen A. Activation of a raw clay by Mechanochemical process — effects of various parameters on the process efficiency and cementitious properties // Materials. 2018. Vol. 11. Issue 10. P. 1860. DOI: 10.3390/ma11101860
16. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 307 с.
17. Гаджиев А.М., Курбанов Р.М., Хаджишалапов Г.Н., Хежев Т.А. Влияние зернового состава заполнителя на свойства жаростойкого базальтового бетона // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. Т. 44. № 3. С. 146–155. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-3-146-155. EDN ZWDGFD.
18. Вольф А.В., Маноха А.М., Аладикова О.Е. Влияние модифицирующих добавок на свойства магнезиальных вяжущих веществ // Ползуновский альманах. 2019. № 2–1. С. 49–52. EDN WDSMQR.
19. Черных Т.Н., Ульрих Д.В., Кривишин М.В. Регулирование подвижности хлормagneзиальных ком-

позиций // Инженерный вестник Дона. 2021. № 12 (84). С. 409–419. EDN AGLGYU.

20. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В., Деберде-ев Т.Р., Лексин В.В. Прочность тяжелого бетона на портландцементе, обработанном в аппарате вихревого слоя // Строительные материалы. 2017. № 10. С. 28–31. EDN ZRPHGT.

21. Bikaeva Y., Ibragimov R., Korolev E., Kiyamov I., Kiyamova L. Low-temperature calcination composite binder from dolomite and its application to facing board materials // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. P. e02338. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02338

22. Макридин Н.И., Королев Е.В., Максимова И.Н. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов : монография. М. : МГСУ, 2013. 152 с. EDN ROKBII.

23. Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. М., 2007. 672 с. EDN MUYCUL.

24. Зимич В.В., Крамар Л.Я., Черных Т.Н., Пудовиков В.Н., Перминов А.В. Особенности влияния добавки золя гидроксида железа на структуру и свой-

ства магнезиального камня // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2011. № 35 (252). С. 25–32. EDN OJNPPD.

25. Винокуров С.Е., Куликова С.А., Крупская В.В., Тюпина Е.А. Влияние характеристик порошка оксида магния на состав и прочность магний-калий-фосфатного компаунда для отверждения радиоактивных отходов // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. №. 4. С. 450–457. DOI: 10.1134/S0044461819040042. EDN ZAQDRB.

26. Строкова В.В., Айзеништадт А.М., Сивальнева М.Н., Кобзев В.А., Нелюбова В.В. Оценка активности наноструктурированных вяжущих термодинамическим методом // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 3–9. EDN TJDRAB.

27. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В., Бикаева Ю.В., Ларионов И.С. Краевые углы смачивания порошков кварца и каустического доломита после механомагнитной обработки // Строительные материалы. 2024. № 3. С. 64–70. DOI: 10.31659/0585-430X2024-822-3-64-70. EDN CUIUFP.

Поступила в редакцию 29 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 16 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 16 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Юлия Вячеславовна Бикаева** — аспирант, ассистент кафедры технологии строительного производства; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 1045930, Scopus: 57213838597, ORCID: 0000-0003-2382-1023; info@kgasu.ru, uliyaevstigneeva@mail.ru;

Руслан Абдирашитович Ирагимов — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии строительного производства; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 619018, Scopus: 56504969400, ResearcherID: O-5968-2017, ORCID: 0000-0001-8879-1190; info@kgasu.ru, rusmag007@yandex.com;

Илья Дмитриевич Твердов — аналитик; **Университет Иннополис**; 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, д. 1; ORCID: 0000-0002-7524-3088; university@innopolis.ru, idtverdov@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Rakhimov R.Z. Fuel and energy complex, ecology and mineral binders. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2022; 3(61):67-74. DOI: 10.52409/20731523_2022_3_67. EDN HOAOTX. (rus.).

2. Khozin V.G. Prospects for the development of the building materials industry in the light of the use of secondary resources. *Polymers in Construction: Scientific Online Journal*. 2023; 1(11):22-29. EDN NEVNVS. (rus.).

3. Ermilova E.Yu., Kamalova Z.A. Blended Portland cements with complex mineral additives as a solution of the problem man-made industrial waste utilization. *Construction, Buildings and Structures*. 2023; 2(3):4-10. EDN KANWFM. (rus.).

4. Zyryanova V.N., Berdov G.I. Magnesium binders from high-magnesium waste. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2005; 10(562):46-53. EDN PFAKQX. (rus.).

5. Tretyakov Yu. *Solid-phase reactions*. Moscow, Khimiya, 1978; 359. (rus.).

6. Voskresenskaya L.E. Some Aspects of Making Next-Generation Magnesium Binders. *Education. Science. Culture : materials of the international scientific forum*. 2016; 857-862. EDN ZNZXHB. (rus.).

7. Marchik E.V. Hardening of magnesium cement based on caustic dolomite. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*. 2010; 3:10-14. EDN GBOZIK. (rus.).

8. Ibragimov R.A., Korolev E.V. Strength of composites on Portland cement modified with carbon nano-tubes and processed in a vortex layer apparatus. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 1:35-41. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.35-41. EDN UZUOSG. (rus.).
9. Malkin A.I. Regularities and mechanisms of the rehbinder's effect. *Colloid Journal*. 2012; 74(2):239. EDN OWEPSL. (rus.).
10. Golik V.I., Titova A.V. Combined activation technologies mineral raw materials. *Mining Industry*. 2021; 5:100-105. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-100-105. EDN NNYLBN. (rus.).
11. Ibragimov R.A., Potapova L.I., Korolev E.V. Investigation of structure formation of activated nanomodified cement stone by IR spectroscopy. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2021; 3(57):41-49. DOI: 10.52409/20731523_2021_3_41. EDN XHUPYY. (rus.).
12. Kosareva A.V., Savitskaya Yu.A., Kharlamova K.I. Evaluation of the effectiveness of fractionation methods of dispersed microparticles. *Polymers in Construction: Scientific Online Journal*. 2024; 1(12):100-103. EDN AENNLJ. (rus.).
13. Vdovin E.A., Bulanov P.E., Stroganov V.F. Improving the characteristics of road soil-cement with organosilicon compounds. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 4(66):301-309. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_301. EDN JZUJND. (rus.).
14. Makó É. The effect of quartz content on the mechanical activation of dolomite. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007; 27(2-3):535-540. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.170
15. Tole I., Habermehl-Cwirzen K., Rajczakowska M., Cwirzen A. Activation of a raw clay by Mechanochemical process — effects of various parameters on the process efficiency and cementitious properties. *Materials*. 2018; 11(10):1860. DOI: 10.3390/ma11101860
16. Khodakov G.S. *Grinding physics*. Moscow, Nauka, 1972; 307. (rus.).
17. Gadzhiev A.M., Kurbanov R.M., Khadzhishalapov Kh.N., Hejev T.A. The influence of the filler grain composition on the properties of the heat-resistant basaltic concrete. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2017; 44(3):146-155. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-3-146-155. EDN ZWDGFD. (rus.).
18. Vol'f A.V., Manokha A.M., Aladikova O.E. Effect of modifying additives on the properties of magnesium binders. *Polzunovsky Almanac*. 2019; 2-1:49-52. EDN WDSMQR. (rus.).
19. Chernykh T.N., Ulrikh D.V., Kriushin M.V. Plasticization of mixtures based on oxychloride cement using additives. *Engineering journal of Don*. 2021; 12(84):409-419. EDN AGLGYY. (rus.).
20. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Durability of heavy-weight concrete with Portland cement treated in apparatus of vortex layer. *Construction Materials*. 2017; 10:28-31. EDN ZRPHGT. (rus.).
21. Bikaeva Y., Ibragimov R., Korolev E., Kiyamov I., Kiyamova L. Low-temperature calcination composite binder from dolomite and its application to facing board materials. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19:e02338. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02338
22. Makridin N.I., Korolev E.V., Maksimova I.N. *Structure formation and structural strength of cement composites*. Moscow, MGSU, 2013; 152. EDN ROKBIJ. (rus.).
23. Fetisov G.V. Synchrotron radiation. *Methods of studying the structure of substances*. Moscow, 2007; 672. EDN MUYCUL. (rus.).
24. Zimich V.V., Kramar L.Ya., Chernich T.N., Pudovikov V.N., Perminov A.V. Peculiar features of influence of admixture of iron hydroxide sol on the structure and properties of magnesia stone. *Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2011; 35(252):25-32. EDN OJNPPD. (rus.).
25. Vinokurov S.E., Kulikova S.A., Krupskaya V.V., Tyupina E.A. Effect of characteristics of magnesium oxide powder on composition and strength of magnesium potassium phosphate compound for solidifying radioactive waste. *Journal of Applied Chemistry*. 2019; 92(4):450-457. DOI: 10.1134/S0044461819040042. EDN ZAQDRB. (rus.).
26. Strokova V.V., Aizenshtadt A.M., Sival'neva M.N., Kobzev V.A., Nelubova V.V. Activity evaluation of nano-structured binders with using thermodynamic method. *Construction Materials*. 2015; 2:3-9. EDN TJDRAB. (rus.).
27. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Bikaeva Yu.V., Larionov I.S. The contact angles of quartz and caustic dolomite powders after mechano-magnetic treatment. *Construction Materials*. 2024; 3:64-70. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-822-3-64-70. EDN CUIUFP. (rus.).

Received May 29, 2024.

Adopted in revised form on September 16, 2024.

Approved for publication on September 16, 2024.

B I O N O T E S: Yuliya V. Bikaeva — postgraduate student, assistant of the Department of Construction Production Technology; Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); 1 Zelenaya st., Kazan, 420043,

Russian Federation; ID RSCI: 1045930, Scopus: 57213838597, ORCID: 0000-0003-2382-1023; info@kgasu.ru, uliyaevstigneeva@mail.ru;

Ruslan A. Ibragimov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Construction Production Technology; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RSCI: 619018, Scopus: 56504969400, ResearcherID: O-5968-2017, ORCID: 0000-0001-8879-1190; info@kgasu.ru, uliyaevstigneeva@mail.ru;

Iliya D. Tverdov — analyst; **Innopolis University**; 1 Universitetskaya st., Innopolis, 420500, Russian Federation; university@innopolis.ru, idtverdov@gmail.com.

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

The authors have no conflict of interest.

Теоретические основы количественной оценки расширения лидирующей скважины щебеночной буронабивной сваи в нелинейной постановке

Армен Завенович Тер-Мартirosян, Чан Мань Тхием

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Известно, что для уплотнения слабых грунтов на глубине применяются различные методы, включая создание грунтовых колонн путем объемного расширения порции материала (щебень, песок и т.д.) под воздействием вертикальной нагрузки в забое скважины. С увеличением вертикальной нагрузки происходит увеличение диаметра рабочего материала до определенного значения, что приводит к возникновению значительных радиальных и тангенциальных напряжений в окружающем слабом грунте. Настоящая работа посвящена разработке теоретических основ изготовления щебеночной буронабивной сваи, позволяющих дать количественную оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) в грунтовом цилиндре вследствие расширения диаметра лидирующей скважины. Изложены постановка и решение задачи по оценке НДС толстостенного грунтового цилиндра ограниченных размеров (диаметр, высота) с диаметром скважины. По существу, это общеизвестная задача Лямэ о толстостенной трубе.

Материалы и методы. Задача рассмотрена в линейной и нелинейной постановках. Решение получено аналитическим методом. Для оценки НДС толстостенного грунтового цилиндра использовались решение задачи Лямэ о толстостенной трубе и системы физических уравнений Генки.

Результаты. Получены выражения для определения перемещения стенки скважины в радиальном направлении, радиального и касательного напряжений в грунтовом цилиндре. Показаны кривые зависимости радиального перемещения от давления на стенки скважины. Результаты отображены графически.

Выводы. Полученные решения могут быть применены для определения радиального перемещения стенки скважины при глубинном уплотнении слабых грунтов методом создания грунтовых колонн путем объемного расширения в линейной и нелинейной постановках. Построены кривые зависимости радиального перемещения от давления на стенки скважины при различных деформированных и прочностных параметрах окружающих грунтов, а также геометрических параметров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: слабые глинистые грунты, свая-дрена, фундамент, напряженно-деформированное состояние, преобразование слабых оснований, укрепление оснований

Благодарности. Основная идея статьи принадлежит профессору Завену Григорьевичу Тер-Мартirosяну и посвящается его памяти.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян А.З., Тхием Ч.М. Теоретические основы количественной оценки расширения лидирующей скважины щебеночной буронабивной сваи в нелинейной постановке // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 10. С. 1641–1650. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1641-1650

Автор, ответственный за переписку: Чан Мань Тхием, tranmanhthiem@gmail.com.

Theoretical basis for quantitative evaluation of the expansion of the leading hole of a crushed stone bored pile in a nonlinear setting

Armen Z. Ter-Martirosyan, Tran Manh Thiem

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

ABSTRACT

Introduction. It is known that various methods are used to compact soft soils at depth, including the creation of soil columns by volumetric expansion of a portion of material (crushed stone, sand, etc.) under the influence of vertical load at the bottom of the well. With an increase in vertical load, the diameter of the working material increases to a certain value, resulting in significant radial and tangential stresses in the surrounding soft soil. This work is devoted to the development of the theo-

retical foundations for the manufacture of crushed stone bored piles that make it possible to quantify the stress-strain state in a soil cylinder due to the expansion of the diameter of the leading well. The formulation and solution of the problem of estimating the stress-strain state of a thick-walled soil cylinder of limited dimensions (diameter, height) with the diameter of a well are presented. Essentially, this is the well-known Lamé problem of a thick-walled pipe.

Materials and methods. The problem was considered in linear and nonlinear formulations. The solution was obtained by the analytical method. To estimate the stress-strain state of a thick-walled soil cylinder, the solution to the Lamé problem of a thick-walled pipe and the system of Genki physical equations was used.

Results. The expressions are obtained to determine the radial displacement of the borehole wall, radial and tangential stresses in the soil cylinder. The curves dependency of the radial displacement on radial pressure of borehole wall are shown. The achieved results are illustrated with graphics.

Conclusions. The obtained solutions can be used to determine the radial displacement of the borehole wall during deep compaction of soft soils in linear and nonlinear formulations by adding crushed stone columns. The curves dependency of the radial displacement on radial pressure of borehole wall with various stiffness and strength parameters of the surrounding soils, as well as geometric parameters are presented.

KEYWORDS: soft clay soils, drain pile, foundation, stress-strain state, weak base conversion, foundation reinforcement

Acknowledgments. The main idea of the article belongs to Professor Zaven Grigorievich Ter-Martirosyan and is dedicated to his memory.

FOR CITATION: Ter-Martirosyan A.Z., Thiem T.M. Theoretical basis for quantitative evaluation of the expansion of the leading hole of a crushed stone bored pile in a nonlinear setting. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1641-1650. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1641-1650 (rus.).

Corresponding author: Tran Manh Thiem, tranmanhthiem@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, при глубинном уплотнении слабых грунтов используются различные технологии глубинного уплотнения, в том числе метод создания грунтовых колонн путем объемного расширения порции рабочего материала (щебень, песок и т.д.) при вертикальной нагрузке в забое скважины. Вопросы теоретического и практического обоснования глубинного уплотнения освещены в работах российских¹ и зарубежных авторов [1–14].

С ростом вертикальной нагрузки происходит увеличение диаметра рабочего материала до определенного значения, что приводит к возникновению радиальных и тангенциальных напряжений в окружающем слабом грунте. В свою очередь вызывает уплотнение и существенное упрочнение слабого грунта. Эксперименты, проведенные сотрудниками Научно-образовательного центра «Геотехника» НИУ МГСУ на опытной площадке в 2016 г. на объекте энергетического строительства, подтверждают эффективность метода глубинного уплотнения. Результаты контрольных испытаний демонстрируют увеличение модуля деформации слабого грунта с 5–10 до 25–30 МПа. Растет также плотность щебеночного материала под действием высокой нагрузки (до 200 т), его модуль деформации достигает 30–40 МПа и более. В результате формируется уплотненный грунтовый цилиндр, который содержит прочную щебеночную сваю. Подобная ячейка в конструкции плитного фундамента может выдерживать значительную нагрузку при относительно небольших перемещениях стенки. Количественная оценка деформации и несущей способности полу-

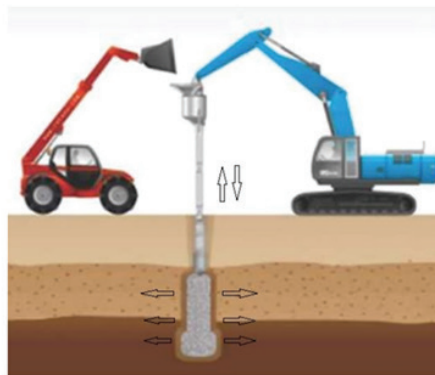


Рис. 1. Технология подачи и уплотнения рабочего материала (щебня) путем забивки лидирующей скважины, приводящая к возникновению радиальных и тангенциальных напряжений в окружающем грунте, которые способствуют уплотнению грунта

Fig. 1. Technology for supplying and compacting working material (crushed stone) by driving a leading hole, leading to the emergence of radial and tangential stresses in the surrounding soil, which contribute to soil compaction

ченной ячейки является самостоятельной задачей, и к ней мы вернемся в ближайшее время.

Настоящая работа посвящена разработке теоретических основ изготовления щебеночной буронабивной сваи, позволяющей дать количественную оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) в грунтовом цилиндре вследствие расширения диаметра лидирующей скважины, в том числе определение компонентов напряжения (σ_r , σ_t) и деформации (ε_r , ε_t); объемную деформацию окружающего грунта $\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_t/3$ в условиях плоской деформации $\varepsilon_z = 0$. При этом $\sigma_z = \sigma_r + \sigma_t/1 + \nu$. Решение поставленной задачи заключается в анализе НДС толстостенного грунтового цилиндра с определен-

¹ Абелев М.Ю., Крутов В.И. Технология уплотнения грунтов: учебное пособие. М.: Б. и., 1984. 48 с.

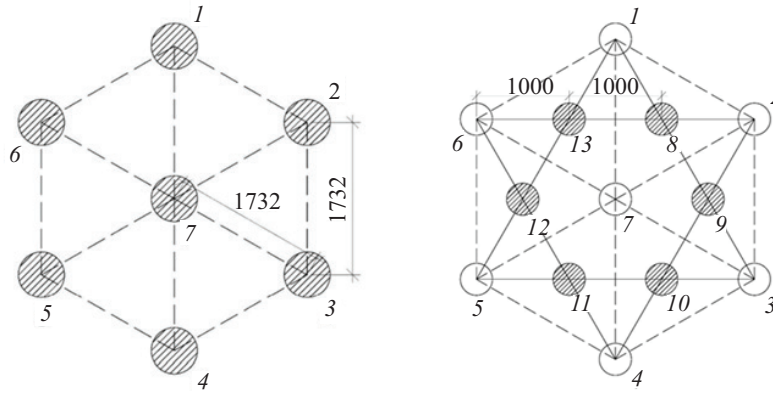


Рис. 2. Стандартное размещение щебеночных свай для уплотнения и порядок их выполнения на строительной площадке с промежутками 1732 и 1000 мм между осями

Fig. 2. Standard placement of crushed stone piles for compaction and the order of their implementation on the construction site with gaps of 1,732 and 1,000 mm between axes

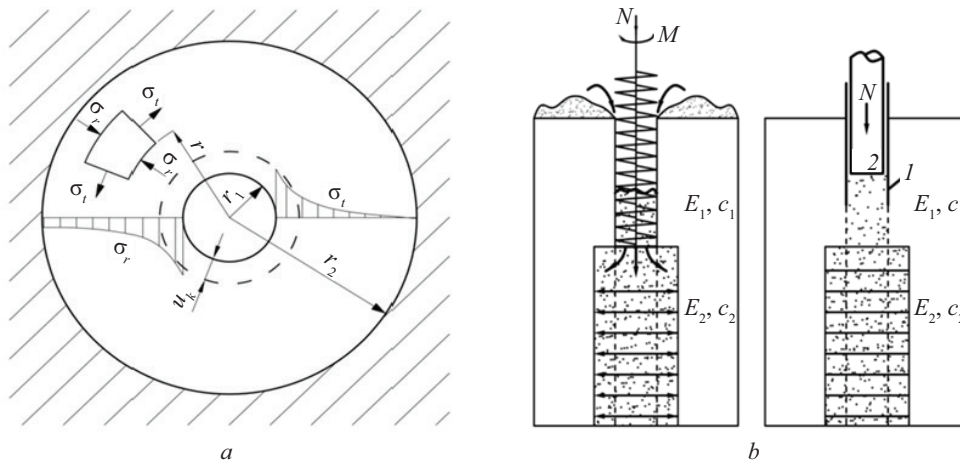


Рис. 3. Расчетная схема расширения диаметра лидирующей скважины (a) и технологии ее расширения (b) [15]: σ_r — радиальные напряжения; σ_t — тангенциальные напряжения; u_k — перемещение стенки скважины в радиальном направлении; E_1 — модуль деформации окружающего грунта; E_2 — модуль деформации колонны; C_1 — сцепление грунта; C_2 — сцепление щебня; N — ось продольных усилий; M — момент вращения рабочего органа

Fig. 3. Calculation scheme for expanding the diameter of the leading well (a) and the technology of stone column construction (b) [15]: σ_r — radial stresses; σ_t — tangential stresses; u_k — radial displacement of the well wall in the radial direction; E_1 — deformation modulus of the surrounding soil; E_2 — column deformation modulus; C_1 — soil cohesion; C_2 — cohesion of crushed stone; N — vertical forces; M — rotation moment

ными размерами (диаметр, высота) и диаметром скважины $d = 2a$. По существу, это общеизвестная задача Лямэ о толстостенной трубе.

Учитывая то обстоятельство, что метод создания щебеночной сваи в глинистом грунте основан на принципе глубинного уплотнения слабого грунта, этот принцип заключается в том, что диаметр лидирующей скважины принудительно расширяется в забое с помощью мощных домкратов (до 200 т) (рис. 1–3).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим НДС грунтового цилиндра (см. рис. 3) при расширении радиуса лидирующей скважины. В этом случае появляется осесимметричное

НДС в любом сечении цилиндра и не возникает касательных напряжения ($\tau_{r,t} = 0$). Уравнение равновесия в этом случае записывается следующим образом²:

$$\sigma_r - \sigma_t + r \frac{dr}{dt} = 0. \quad (1)$$

Деформации ϵ_r и ϵ_t связаны с радиальными перемещениями из зависимости:

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr}; \quad \epsilon_t = \frac{u}{r}. \quad (2)$$

² Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М. : МГСУ ; Изд-во АСВ, 2009. 551 с.

Физические уравнения при линейной деформации имеют вид [15, 16]:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_r + \varepsilon_t); \\ \sigma_t &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_t + \nu \cdot \varepsilon_r),\end{aligned}\quad (3)$$

где E — модуль деформации слабого грунта, кПа; ν — коэффициент Пуассона.

Подставляя геометрические уравнения (2) в (3), получаем:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{du}{dr} + \nu \cdot \frac{u}{r} \right); \\ \sigma_t &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{u}{r} + \nu \cdot \frac{du}{dr} \right).\end{aligned}\quad (4)$$

Подставляя эти выражения в формулу (1), получим разрешающее уравнение в методе напряжений задачи Лямэ в перемещениях:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} = \frac{u}{r^2}. \quad (5)$$

Общий интеграл этого уравнения известен и имеет вид:

$$u = A \cdot r + \frac{B}{r}. \quad (6)$$

Постоянные интегрирования A и B можно получить из граничных условий. В рассматриваемой в настоящей работе постановке они:

$$\begin{aligned}\sigma_{r=a} &= P_a; \\ u_{r=b} &= 0.\end{aligned}\quad (7)$$

Такие граничные условия продиктованы условиями, в которых находятся грунтовые цилиндры. Они установлены к стенке скважины и к внешней границе грунтового цилиндра.

Из условия $u_{r=b} = 0$ следует, что:

$$B = -A \cdot b^2 \text{ или } A = \frac{-B}{b^2}. \quad (8)$$

Используя эти условия, а также первое из формул при $\sigma_r = P_a$ из выражения (4), получаем:

$$\begin{aligned}P_a &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left[A \cdot (1+\nu) + A \cdot \frac{b^2}{a^2} \cdot (1-\nu) \right] = \\ &= \frac{AE}{1-\nu^2} \cdot \left[1 + \nu + \frac{b^2}{a^2} \cdot (1-\nu) \right]\end{aligned}\quad (9)$$

окончательно

$$A = P_a \cdot \frac{1-\nu^2}{E} \cdot \frac{a^2}{a^2 \cdot (1+\nu) + b^2 \cdot (1-\nu)}. \quad (10)$$

Подставляя это уравнение A в исходное уравнение (9), получаем:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= P_a \cdot \frac{a^2}{a^2 \cdot (1+\nu) + b^2 \cdot (1-\nu)} \times \\ &\times \left[1 + \nu + \frac{b^2}{r^2} \cdot (1-\nu) \right].\end{aligned}\quad (11)$$

Видно, что при $r = a$, $\sigma_r = P_a$.

Аналогично для σ_t можно записать:

$$\begin{aligned}\sigma_t &= P_a \cdot \frac{a^2}{a^2 \cdot (1+\nu) + b^2 \cdot (1-\nu)} \times \\ &\times \left[1 + \nu - \frac{b^2}{r^2} \cdot (1-\nu) \right]\end{aligned}\quad (12)$$

при $r = b$,

$$\sigma_t = P_a \cdot \frac{2 \cdot a^2}{a^2 \cdot (1+\nu) + b^2 \cdot (1-\nu)}; \quad (12 \text{ a})$$

$$\begin{aligned}\sigma_r + \sigma_t &= 2 \cdot P_a \cdot \frac{a^2 (1+\nu)}{a^2 (1+\nu) + b^2 (1-\nu)} = \text{const}; \\ \sigma_m &= \frac{(\sigma_r + \sigma_t)(1+\nu)}{3}.\end{aligned}\quad (13)$$

Для определения перемещения внутренней поверхности лидирующей скважины воспользуемся уравнением (6) и обозначениями параметров A и B , тогда:

$$\begin{aligned}U(r) &= A \cdot r + \frac{B}{r} = P_a \cdot \frac{1-\nu^2}{E} \times \\ &\times \frac{a^2}{a^2 \cdot (1+\nu) + b^2 \cdot (1-\nu)} \cdot \left[r - \frac{b^2}{r} \right].\end{aligned}\quad (13 \text{ a})$$

Исходные уравнения при решении задачи в упругопластической постановке

В соответствии с действующими нормативными документами³, при расчете осадки основания с учетом нелинейности деформирования грунтов [16] можно определить модули деформации E_{0i} для испытаний грунтов на разных глубинах в зависимости от действующих напряжений σ_{zi} . Эти модули, согласно уравнению Гука, определяют деформацию слоев $\varepsilon_i = 0,8 \cdot \sigma_{zi} / E_{0i}$. Осадка основания при нагрузках ниже расчетного сопротивления грунта R рассчитывается как сумма осадок слоев на центральной вертикальной оси в условиях компрессионного сжатия ($\varepsilon_x = 0$; $\varepsilon_y = 0$). Тогда $S_i = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot \Delta h_i$.

Исходя из предположения, что напряженное состояние основания устанавливается по методу Фламана⁴, можно косвенно учесть нелинейность деформирования грунтов основания.

В данной работе для прогнозирования перемещения стенки используется система уравнений Генки [17], которая описывает сумму сдвиговых и объемных деформаций ($\varepsilon_r = \varepsilon_{r_i} + \varepsilon_{r_v}$):

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r - \sigma_m}{G(\sigma_m, \tau_i / \tau_i^*)} + \frac{\sigma_m}{K(\sigma_m)}, \quad (14)$$

³ Пьянков С.А. Механика грунтов : учебное пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2018. 195 с.

⁴ Флорин В.А. Основы механики грунтов. Л. ; М. : Гостройиздат. Ленингр. отд-ние, 1959. Т. 1. 356 с.

где $G(\sigma_m, \tau_i/\tau_i^*)$ и $K(\sigma_m)$ — модули сдвиговой и объемной деформации, зависящие от среднего напряжения σ_m , а также отношения интенсивности касательных напряжений τ_i к ее предельному значению τ_i^* , где $\tau_i^* = \sigma \tan \phi + c$ (ϕ , c — угол внутреннего трения и сцепление грунта соответственно).

В частном случае, когда $G = \text{const}$ и $K = \text{const}$, уравнение (11) переходит в систему уравнений Гука. Параметры $G(\sigma_m, \tau_i/\tau_i^*)$ и $K(\sigma_m)$ определяются по результатам стандартных трехосных испытаний (рис. 4).

Уравнение Генки (11) позволяет учесть существенный различный характер кривых сдвигового и объемного деформирования (см. рис. 4) и описывает не только затухающие зависимости, но и незатухающие сдвиговые деформации грунтового основания. Более того, эти уравнения дают возможность прогнозировать перемещение стенки как при $p < R$ так и при $p > R$.

Также система физических уравнений Генки позволяет определить как линейную, так и нелинейную зависимости между напряжениями и деформациями [19]. Они имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \chi(\sigma_x - \sigma_m) + \chi^* \sigma_m; \gamma_{xy} = 2\chi \cdot \tau_{xy}; \\ \varepsilon_y &= \chi(\sigma_y - \sigma_m) + \chi^* \sigma_m; \gamma_{yz} = 2\chi \cdot \tau_{yz}; \\ \varepsilon_z &= \chi(\sigma_z - \sigma_m) + \chi^* \sigma_m; \gamma_{zy} = 2\chi \cdot \tau_{zy},\end{aligned}\quad (15)$$

где

$$\begin{aligned}\chi &= \frac{\gamma_i}{2 \cdot \tau_i} = \frac{f(\tau_i, \sigma_m, \mu_\sigma)}{2 \cdot \tau_i}; \\ \chi^* &= \frac{\varepsilon_m}{\sigma_m} = \frac{f(\tau_i, \sigma_m, \mu_\sigma)}{\sigma_m},\end{aligned}\quad (16)$$

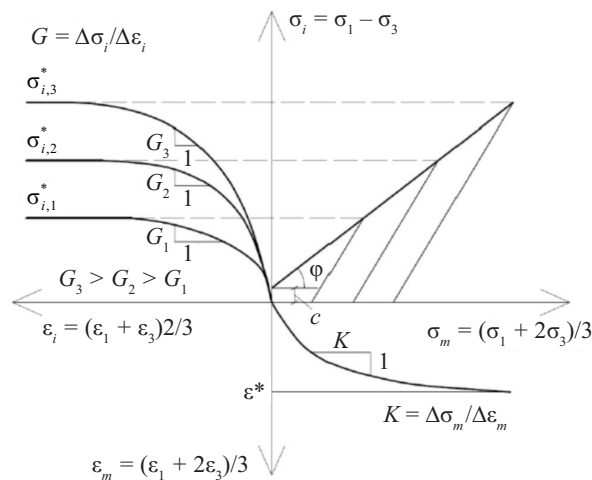


Рис. 4. Наглядное изображение результатов стандартных трехосных испытаний грунтов при кинематическом режиме нагружения ($\dot{\varepsilon}_i = \text{const}$ или $\dot{\sigma}_i = \text{const}$), который осуществляется по траектории раздавливания [18]

Fig. 4. Schematic representation of the results of standard triaxial tests of soils under kinematic loading conditions ($\dot{\varepsilon}_i = \text{const}$ or $\dot{\sigma}_i = \text{const}$) along a crushing trajectory [18]

где τ_i — интенсивность касательных напряжений; μ_σ — параметр вида НДС по Надаи-Доле.

Уравнение Генки при $\chi = \frac{1}{2G}$ и $\chi^* = \frac{1}{K}$, где $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ и $K = \frac{E}{(1-2\nu)}$ переходит в уравнения Гука.

Нелинейные объемные деформации определяются с использованием зависимости, предложенной академиком РАН С.С. Григоряном². Эта зависимость имеет следующий вид:

$$\varepsilon_m(\sigma_m) = \varepsilon^* (1 - e^{-\alpha \sigma_m}). \quad (17)$$

Секущий модуль объемной деформации K при этом можно установить, разделив в выражении ε_m на σ_m , т.е.:

$$\frac{\varepsilon_m}{\sigma_m} = \frac{1}{K} = \frac{\varepsilon^* (1 - e^{-\alpha \sigma_m})}{\sigma_m}; K = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m}, \quad (18)$$

причем при $\sigma_m \rightarrow \infty$; $\varepsilon_m \rightarrow \varepsilon^*$, а при $\alpha = 0$ и $\varepsilon^* = \varepsilon_m$ получим $\varepsilon_m = \sigma_m / K$.

Для определения упругопластических характеристик глинистых грунтов при сдвиге применяется формула С.П. Тимошенко, адаптированная для грунтовых сред:

$$\gamma_i = \frac{\tau_i}{G_c^e} \cdot \frac{\tau_i^*}{\tau_i - \tau_i^*}, \quad (19)$$

где τ_i и τ_i^* — интенсивность действующих и предельных касательных напряжений, соответственно, причем:

$$\tau_i^* = (\sigma_m + \sigma_g) \cdot \tan \phi_i + c_i, \quad (20)$$

где ϕ_i и c_i — предельные значения параметров прочности, определяемые по предельной прямой в плоскости $\tau_i - \sigma_m$, σ_g — природное напряжение.

В условиях нормально уплотненных грунтов природное напряжение устанавливается по формуле:

$$\sigma_g = \gamma \cdot h, \quad (21)$$

где γ — удельный вес; h — глубина, по которой определяется τ_i^* .

При выполнении расчетов в переуплотненных грунтах формула (21) записывается в виде:

$$\sigma_g' = \gamma \cdot h + \sigma_p, \quad (22)$$

где σ_p — остаточное напряжение в переуплотненных грунтах, определяемое по результатам компрессионных испытаний методом Казагранде [20]. Конкретная информация о принципах определения остаточных напряжений σ_p представлена в работе З.Г. Тер-Мартиросяна «Механика грунтов»².

Подставив формулу $G = \tau_i/\gamma_i$ в (19) с учетом выражения (22), получим:

$$G = G^e \cdot \left(1 - \frac{\tau_i}{\tau_i^*}\right), \quad (23)$$

где при $\tau_i = 0$; $G = G^e$, а при $\tau_i \rightarrow \tau_i^*$; $G \rightarrow 0$.

В случае линейной зависимости между напряжениями и деформациями можно определить перемещение стенки с помощью аналитического решения, используя параметры G и K :

$$S = \int_a^b \frac{\sigma_m}{K} dr + \int_a^b \frac{\sigma_r - \sigma_m}{2G} dr, \quad (24)$$

где σ_r ; σ_r ; σ_m определяются по формулам (11)–(13).

Прогноз перемещения стенки в упругопластической постановке

Изложенные выше материалы использованы для расчета осадки основания фундамента конечной ширины⁵. Было показано, что кривая осадка–нагрузка (S – P) имеет двойную кривизну и может заканчиваться с переходом в прогрессирующую фазу вплоть до прогрессирующей осадки, описанной в труде [21].

В настоящей работе авторы предлагают использовать эти исходные материалы применительно к решению поставленной задачи, полагая что окружающий щебеночную сваю грунт обладает упругопластическими свойствами по Тимошенко [22] и нелинейными свойствами при объемных деформациях по Григорян². Напряженное состояние вокруг щебеночной сваи будет существенно отличаться от задачи Фламана для плоскости и определяться в соответствии с системой уравнений по формулам (11)–(13). Полученные в результате решения задачи Лямэ для толстостенного грунтового цилиндра при граничных условиях: $r = a$, $\sigma_r = P_a$, $r = b$, $u_r = 0$. Отметим заранее, что при таких граничных условиях задача Лямэ не решалась. Выделим основные уравнения по напряженному состоянию, необходимые для дальнейшего изложения поставленной задачи напряженного состояния в грунтовом цилиндре:

$$\sigma_r = P_a \cdot \frac{a^2}{a^2 \cdot (1+\nu) + b^2 \cdot (1-\nu)} \times \left[1 + \nu + \frac{b^2}{r^2} \cdot (1-\nu) \right]; \quad (25)$$

$$\sigma_t = P_a \cdot \frac{a^2}{a^2 \cdot (1+\nu) + b^2 \cdot (1-\nu)} \times \left[1 + \nu - \frac{b^2}{r^2} \cdot (1-\nu) \right];$$

$$\sigma_r + \sigma_t = 2 \cdot P_a \cdot \frac{a^2 \cdot (1+\nu)}{a^2 \cdot (1+\nu) + b^2 \cdot (1-\nu)}; \quad (26)$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_r + \sigma_t) \cdot (1+\nu)}{3};$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}; \varepsilon_t = \frac{u}{r}; u = Ar + \frac{B}{r}, \text{ где } A \text{ и } B \text{ определяются}$$

по выражению (10):

$$\tau_i = \frac{\sigma_r - \sigma_t}{\sqrt{3}}; \tau_i^* = (\sigma_m + \sigma_g) \tan \varphi + c. \quad (27)$$

Кроме этого, система физических уравнений Генки (15) в рамках плоской задачи в полярных координатах представлена следующим образом:

$$\varepsilon_r = \chi \cdot (\sigma_r - \sigma_m) + \chi^* \cdot \sigma_m, \quad (28)$$

где

$$\chi = \frac{\gamma_i}{2\tau_i} = \frac{f(\tau_i, \sigma_m, \mu_\sigma)}{2\tau_i}; \quad (29)$$

$$\chi^* = \frac{\varepsilon_m}{\sigma_m} = \frac{f(\tau_i, \sigma_m, \mu_\sigma)}{\sigma_m};$$

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r - \sigma_m}{G(\sigma_m, \tau_i/\tau_i^*)} + \frac{\sigma_m}{K(\sigma_m)}, \quad (30)$$

где ε_m ; K ; γ_i ; σ_g ; σ_m ; G те же, что в первой части настоящей работы.

Анализ напряженного состояния толстостенного грунтового цилиндра вокруг свай, изложенный в первой части настоящей работы, показывает, что σ_r и σ_m неизменно зависят от радиуса в пределах $r = a$ до $r = b$. Следовательно, в этом интервале можно разделить n -е количество слоев толщиной δ_n , в которых σ_r , σ_t и σ_m , а также G и K будут отличаться. Тогда для очередного слоя можно записать:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r-\gamma} + \varepsilon_{r-\nu} = \frac{\sigma_r - \sigma_m}{G(\sigma_m, \tau_i/\tau_i^*)} + \varepsilon^* (1 - e^{-\alpha \sigma_m}). \quad (31)$$

Очевидно, что для каждого элементарного слоя толщиной δ_n будут соответствовать σ_m ; $\sigma_r - \sigma_m$; $\tau_i - \tau_i^*$ (рис. 5).

Общее перемещение стенки лидирующей скважины U_r можно определить методом послойного суммирования слоев, т.е.:

$$U_{r=a} = \sum_{n=1}^k U_n(r) = \sum_{n=1}^k \varepsilon_r(n) \cdot \delta, \quad (32)$$

где k — количество слоев.

В случае постоянства K и G окружающего грунта перемещение U_r можно определить интегрированием выражения вида:

$$U_r = \int_a^b \left[\frac{\sigma_m}{K} + \frac{\sigma_r - \sigma_m}{2 \cdot G} \right] dr. \quad (33)$$

Из формулы (31) можно сделать вывод, что компоненты объемной деформации $\varepsilon_{r-\nu}$ будут уменьшаться по мере увеличения σ_m и стремиться к предельному значению ε^* , в то время как девиаторная составляющая $\varepsilon_{r-\gamma}$ будет увеличиваться в соответствии с формулой (31), стремясь к бесконечности.

⁵ Федулов В.К., Артемова Л.Ю. Проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений : учебное пособие. М. : МАДИ, 2015. 84 с.

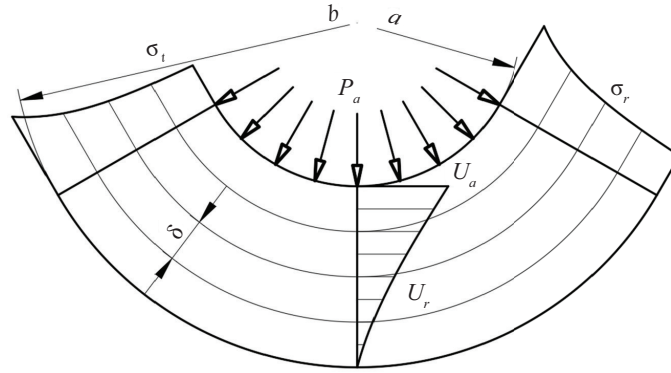


Рис. 5. Фрагмент расчетной схемы для определения величины деформации ε_r и слоев толщиной δ вокруг лидирующей скважины (радиус a) с общим видом эпюр σ_r ; σ_r^2 ; U_r^2

Fig. 5. Fragment of the calculation scheme for determining the magnitude of the deformation ε_r and the thickness δ of the layers around the leading well (radius a) with a general view of the diagrams σ_r ; σ_r^2 ; U_r^2

Очевидно, что суммарная деформация будет иметь двойную кривизну (рис. 6).

Заранее отметим, что это предположение подтвердилось при рассмотрении примеров:

$a = 0,3$ м; $b = 1,2$ м; $G = 15\,000$ кПа; $\varphi = \pi/10$; $c = 150$ кПа; $\gamma = 18$ кН/м³; $\alpha = 0,04$; $\varepsilon^* = 0,3$; $\sigma_p = 50$ кПа.

По результатам расчета примера с помощью ПК Mathcad рассчитано перемещение стенки k -го слоя $U_k = \varepsilon_k \cdot \delta$, где $\varepsilon_k = \varepsilon_{k-v} + \varepsilon_{k-\gamma}$ (рис. 7).

Как и следовало ожидать, пример расчета показывает, что перемещения стенки элементарного слоя толщиной δ аналогичны предполагаемым кривым на рис. 8.

Стоит также предположить, что зависимость суммы элементарных слоев толщиной δ в зависимости от действия радиальных напряжений P_a будет иметь двойную кривизну. Поскольку вид кривой $U_r - P_a$ зависит от многочисленных параметров, сле-

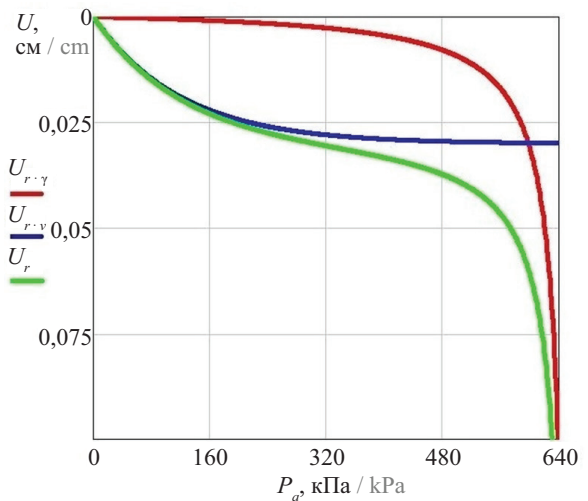


Рис. 7. Схематическое представление кривых U_{r-v} ; $U_{r-\gamma}$; U_r

Fig. 7. Schematic representation of the curves U_{r-v} ; $U_{r-\gamma}$; U_r

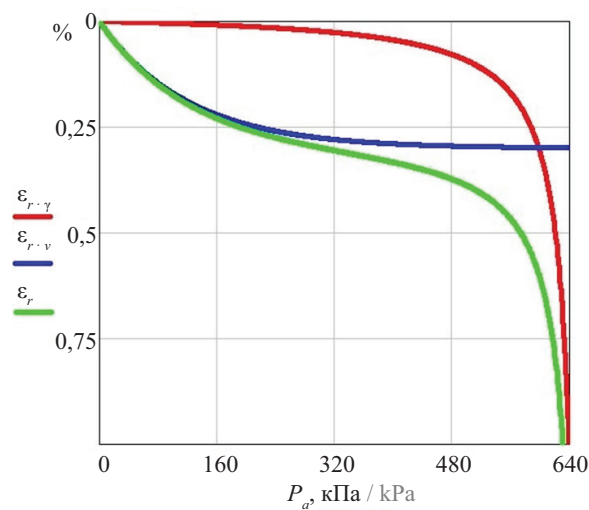


Рис. 6. Схематическое представление кривых ε_{r-v} ; $\varepsilon_{r-\gamma}$; ε_r по результатам анализа формулы (31)

Fig. 6. Schematic representation of curves ε_{r-v} ; $\varepsilon_{r-\gamma}$; ε_r based on the results of the formula (31)

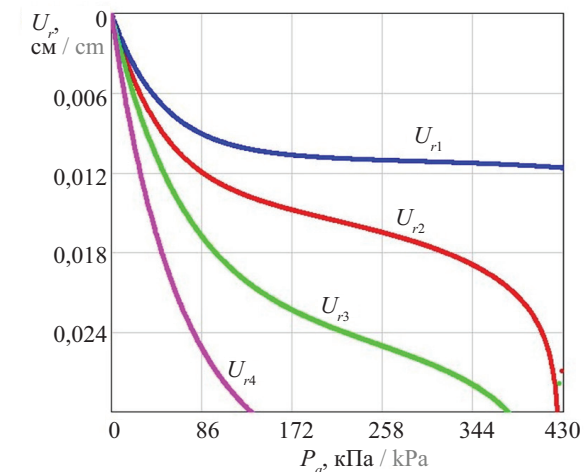


Рис. 8. Семейство кривых $U_r - P_a$ при разных параметрах свойств грунта

Fig. 8. Family of curves $U_r - P_a$ at different parameters of soil properties

дует также предположить, что можно получить семейство кривых $U_r - P_a$ на основе формул (30) и (33) при различных прочностных и деформированных параметрах (рис. 8).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведена работа по определению характеристик глубинного уплотнения слабых слоев при использовании щебеночной сваи. В рамках исследования получены количественные оценки таких параметров, как компоненты напряжения (σ_r ; σ_θ), деформация (ϵ_r ; ϵ_θ) и диаметр расширения, в зависимости от давления P_a и с учетом различных свойств грунтов.

Применение системы физических уравнений Генки, учитывающей упругопластические свойства при сдвиге по Тимошенко и нелинейные свойства при объемных деформациях по Григоряну, позволяет определить любые линейные деформации и сумму объемной и сдвиговой составляющих ($\epsilon = \epsilon_v + \epsilon_r$).

Принятая система при решении задачи о расширении лидирующей скважины в упругопластической постановке приводит к зависимости $U_r - P_a$ кривой,

имеющей двойную кривизну, в том числе затухающую и незатухающую части. Полученное решение позволяет построить семейство кривых $U_r - P_a$ при различных деформированных и прочностных параметрах окружающих грунтов, а также геометрических параметрах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Постановка и решение задачи о лидирующей скважине при устройстве щебеночной сваи. Полученное решение является основой для оценки параметров глубинного уплотнения слабых грунтовых слоев. При взаимодействии грунтовой колонны с окружающим грунтом с учетом упругопластических свойств образуется сложное НДС, которое описывается путем радиальных и тангенциальных напряжений, а также кривых объемной и сдвиговой деформаций. Анализ полученных кривых зависимостей радиальных перемещений стен лидирующей скважины U_r от давления уплотнения P_a показывает, что деформированные и прочностные параметры окружающих грунтов оказывают значительное влияние на значение прогрессирующей осадки, а также на кривизну кривых $U_r - P_a$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Barron R.A. Consolidation of fine-grained soils by drain wells // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1948. Vol. 113. Issue 1. Pp. 718–742. DOI: 10.1061/taceat.0006098
2. Shrivastava R.P., Shroff A.V. Theoretical simulation of experimental results with barron's theory for consolidation of soft clay by radial flow using PVD // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Pp. 275–291. DOI: 10.1007/978-981-16-5605-7_25
3. Basack S., Indraratna B., Rujikiatkamjorn C., Sihaan F. Modeling the stone column behavior in soft ground with special emphasis on lateral deformation // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2017. Vol. 143. Issue 6. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001652
4. Indraratna B., Basack S., Rujikiatkamjorn C. Numerical solution of stone column-improved soft soil considering arching, clogging, and smear effects // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2013. Vol. 139. Issue 3. Pp. 377–394. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000789
5. Kim Y.T., Nguyen B.P., Yun D.H. Analysis of consolidation behavior of PVD-improved ground considering a varied discharge capacity // Engineering Computations. 2018. Vol. 35. Issue 3. Pp. 1183–1202. DOI: 10.1108/ec-06-2017-0199
6. Basack S., Nimbalkar S. Load-settlement characteristics of stone column reinforced soft marine clay deposit: combined field and numerical studies // Sustainability. 2023. Vol. 15. Issue 9. P. 7457. DOI: 10.3390/su15097457
7. Pandey B.K., Rajesh S., Chandra S. Time-dependent behavior of embankment resting on soft clay reinforced

- with encased stone columns // Transportation Geotechnics. 2022. Vol. 36. P. 100809. DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100809
8. Thakur A., Rawat S., Gupta A.K. Experimental study of ground improvement by using encased stone columns // Innovative Infrastructure Solutions. 2021. Vol. 6. Issue 1. DOI: 10.1007/s41062-020-00383-y
9. Shehata H.F., Sorour T.M., Fayed A.L. Effect of stone column installation on soft clay behavior // International Journal of Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 15. Issue 5. Pp. 530–542. DOI: 10.1080/19386362.2018.1478245
10. Minaev O.P. The selection and use method of sandy ground compaction // Magazine of Civil Engineering. 2014. No. 7 (51). Pp. 66–73. DOI: 10.5862/MCE.51.8. EDN SYSMWF.
11. Минаев О.П. Основы и методы уплотнения грунтов оснований для возведения зданий и сооружений : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2018. 36 с.
12. Уколов С.А., Трепалин В.А., Викулова Л.Н., Симонова А.С. Совершенствование методов оценки степени уплотнения грунтов // Инженерный вестник Дона. 2023. № 5 (101). С. 590–598. EDN HWXPXX.
13. Сеськов В.Е. Уплотнение насыпных грунтов в сложных инженерно-геологических условиях // Гео-техника Беларуси: наука и практика : мат. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры оснований, фундаментов и инженерной геологии и 90-летию со дня рождения профессора Юрия Александровича Соболевского. 2013. С. 254–263.
14. Кочерженко В.В., Сулейманова Л.А. Инновационные свайные технологии в современном

фундаментостроении // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 57–67. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-57-67. EDN ZPPWAA.

15. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Анжелю Г.О. Взаимодействие нефилтующей щебеночной сваи (колонны) с окружающим консолидирующим грунтом и ростверком в составе свайно-плитного фундамента // Жилищное строительство. 2019. № 4. С. 19–23. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-4-19-23. EDN WQAGEY.

16. Христич Д.В., Астанов Ю.В., Артюх Е.В., Соколова М.Ю. Нелинейная модель деформирования сжимаемых грунтов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 4. С. 305–312. EDN KHRLPM.

17. Hencky H. Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen // ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1924. Vol. 4. Issue 4. Pp. 323–334. DOI: 10.1002/zamm.19240040405

18. Осман А. Напряженно-деформированное состояние не полностью водонасыщенных оснований при статическом и динамическом воздействиях : дис. ... канд. техн. наук. М., 2023. 139 с. EDN GVDZJP.

19. Дам Х.Х. Осадка и несущая способность барреты и барретного фундамента с учетом упруго-вязких и упруго-пластических свойств грунтов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2023. 152 с. EDN VPUZFE.

20. Casagrande A. The Determination of the Pre-Consolidation Load and its Practical Significance // Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics. 1936. Vol. 3.

21. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Курилин Н.О. Осадка и несущая способность оснований фундаментов конечной ширины // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2021. № 1. С. 8–13. EDN PZXDZM.

22. Струнин П.В. Напряженно-деформированное состояние грунтоцементных свай, взаимодействующих с грунтовым основанием и межсвайным пространством : дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 168 с. EDN SCEGHR.

Поступила в редакцию 2 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 16 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 17 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Армен Завенович Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, проректор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 675967; Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X; gic-mgsu@mail.ru;

Чан Мань Тхием — аспирант кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0009-0001-5151-0030; tranmanhthiem@gmail.com.

Вклад авторов:

Тер-Мартirosян А.З. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, научное редактирование текста.

Тхием Ч.М. — проведение аналитических расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Barron R.A. Consolidation of fine-grained soils by drain wells. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1948; 113(1):718-742. DOI: 10.1061/taceat.0006098

2. Shrivastava R.P., Shroff A.V. Theoretical simulation of experimental results with barron's theory for consolidation of soft clay by radial flow using PVD. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 275-291. DOI: 10.1007/978-981-16-5605-7_25

3. Basack S., Indraratna B., Rujikiatkamjorn C., Siahaan F. Modeling the stone column behavior in soft ground with special emphasis on lateral deformation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2017; 143(6). DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001652

4. Indraratna B., Basack S., Rujikiatkamjorn C. Numerical solution of stone column-improved soft soil considering arching, clogging, and smear effects. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2013; 139(3):377-394. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000789

5. Kim Y.T., Nguyen B.P., Yun D.H. Analysis of consolidation behavior of PVD-improved ground considering a varied discharge capacity. *Engineering Computations*. 2018; 35(3):1183-1202. DOI: 10.1108/ec-06-2017-0199

6. Basack S., Nimbalkar S. Load-Settlement Characteristics of Stone Column Reinforced Soft Marine Clay Deposit: Combined Field and Numerical Studies. *Sustainability*. 2023; 15(9):7457. DOI: 10.3390/su15097457

7. Pandey B.K., Rajesh S., Chandra S. Time-dependent behavior of embankment resting on soft clay reinforced with encased stone columns. *Transportation Geotechnics*. 2022; 36:100809. DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100809
8. Thakur A., Rawat S., Gupta A.K. Experimental study of ground improvement by using encased stone columns. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2021; 6(1). DOI: 10.1007/s41062-020-00383-y
9. Shehata H.F., Sorour T.M., Fayed A.L. Effect of stone column installation on soft clay behavior. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2021; 15(5):530-542. DOI: 10.1080/19386362.2018.1478245
10. Minaev O.P. The selection and use method of sandy ground compaction. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 7(51):66-73. DOI: 10.5862/MCE.51.8. EDN SYSMWF.
11. Minaev O.P. *Fundamentals and methods of soil compaction of foundations for the construction of buildings and structures : abstract of thesis ... doctor of technical sciences*. Moscow, 2018; 36. (rus.).
12. Ukolov S.A., Trepalin V.A., Vikulova L.N., Simonova A.S. Improving methods assessment of the degree of soil compaction. *Engineering journal of Don*. 2023; 5(101):590-598. EDN HWXPXX. (rus.).
13. Seskov V.E. Compaction of bulk soils in complex engineering-geological conditions. *Geotechnics of Belarus: science and practice : materials of the International scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of the Department of Foundations, Foundations and Engineering Geology and the 90th anniversary of the birth of Professor Yuri Aleksandrovich Sobolevsky*. 2013; 254-263. (rus.).
14. Kocherzhenko V., Suleymanova L. Innovative pile technologies in modern foundation construction. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022; 4:57-67. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-57-67. EDN ZPPWAA. (rus.).

15. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Anzhelo G.O. Interaction of non-filtering crushed stone pile (column) with surrounding consolidating soil and plate in the pile-slab foundation. *Housing Construction*. 2019; 4:19-23. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-4-19-23. EDN WQAGEY. (rus.).
16. Khristich D.V., Astapov Yu.V., Artyukh E.V., Sokolova M.Yu. Nonlinear model of deformation of compressible soils. *Izvestiya Tula State University*. 2019; 4:305-312. EDN KHRLPM. (rus.).
17. Hencky H. Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen. *ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1924; 4(4):323-334. DOI: 10.1002/zamm.19240040405
18. Osman A. *Stress-strain state of not completely water-saturated foundations under static and dynamic influences : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2023; 139. EDN GVDZJP. (rus.).
19. Dam H.H. *Settlement and bearing capacity of barrettes and barret foundations, taking into account the elastic-viscous and elastic-plastic properties of soils : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2023; 152. EDN VPUZFE. (rus.).
20. Casagrande A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. *Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics*. 1936; 3.
21. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Kurilin N.O. Bearing capacity of soil base and settlement of foundations of finite width. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021; 1:8-13. EDN PZXDZM. (rus.).
22. Strunin P.V. *Stress-strain state of soil-cement piles interacting with the soil foundation and interpile space : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2013; 168. EDN SCEGHR. (rus.).

Received February 2, 2024.

Adopted in revised form on April 16, 2024.

Approved for publication on April 17, 2024.

BIONOTES: **Armen Z. Ter-Martirosyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Vice-rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 675967; Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X; gic-mgsu@mail.ru;

Tran Manh Thiem — postgraduate of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0001-5151-0030; tranmanhthiem@gmail.com.

Contribution of the authors:

Armen Z. Ter-Martirosyan — scientific guidance, concept of research, development of methodology, scientific text editing.

Tran Manh Thiem — the product of analytical calculations, writing the source text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Санитарно-гигиенические вопросы при проектировании
индивидуальных систем теплоснабжения

Алексей Леонидович Торопов

Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При индивидуальном строительстве существующие нормы проектирования для централизованных систем теплоснабжения носят справочный характер. Владелец домохозяйства сам определяет, сколько горячей воды ему нужно, какова должна быть температура в помещении. Важно, чтобы не нарушались нормы пожарной безопасности, экологии, санитарные нормы и нормативы выделенной на домохозяйство энергии. Параметры горячего водоснабжения (ГВС) носят количественный характер. Возникают вопросы качества санитарной воды, имеющей контакт с кожей человека. Характер использования индивидуальных систем ГВС, их конструктивные особенности определяют риски роста болезнетворных бактерий в оборудовании, что может влиять на здоровье обитателей домохозяйств. Существуют инженерные решения, позволяющие исключить или значительно снизить указанные риски. Эти инженерные решения целесообразно применять на стадии проектирования.

Материалы и методы. На основании обобщения данных научных источников и опубликованных случаев массовых заболеваний выявлены основные виды болезнетворных бактерий, возникающих в индивидуальных системах водоснабжения. Это легионелла и синегнойная палочка. Рассмотрены пороги и условия жизнестойкости указанных бактерий. Классифицированы главные причины, вызывающие риски роста болезнетворных бактерий, илистых отложений.

Результаты. Требования соблюдения комплексных технических мероприятий при проектировании состоят в необходимости подбора оборудования систем индивидуального теплоснабжения при соблюдении условий контроля забора воды, обеспечения предварительного нагрева воды до температуры 65 °С в системах накопительного типа, постоянной циркуляции воды в контурах водоснабжения, использования проточных водонагревателей, подбора труб.

Выводы. Применение технических решений для систем теплоснабжения объектов индивидуального строительства позволяет существенно снизить или исключить полностью риски, связанные с возможностью возникновения болезнетворных бактерий и заболеваниями проживающих в домохозяйствах людей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: индивидуальное строительство, отопление, горячая вода, легионелла, гигиена, домохозяйство, проточные водонагреватели, контур циркуляции

Благодарности. Автор благодарит рецензентов за замечания по стилю изложения и научно-технической сути, способствующие более глубокому раскрытию темы научной работы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Торопов А.Л. Санитарно-гигиенические вопросы при проектировании индивидуальных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 10. С. 1651–1665. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1651-1665

Автор, ответственный за переписку: Алексей Леонидович Торопов, toropov@aprilgroup.ru.

Sanitary and hygienic issues in the design of individual heat
supply systems

Alexey L. Toropov

Engineering Center “April”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the case of individual construction, the existing design standards for district heating systems are of a reference nature. The owner of the household determines how much hot water he needs, what the temperature in the room should be. It is important that fire safety, environmental standards, sanitary standards and standards of energy allocated per household are not violated. The parameters of HWS are quantitative. There are questions about the quality of sanitary water that has contact with human skin. There are engineering solutions that can eliminate or significantly reduce these risks. It is advisable to apply these engineering solutions at the design stage.

Materials and methods. Based on the generalization of data from scientific sources and published cases of mass diseases, the main types of pathogenic bacteria occurring in individual water and heat supply systems were identified. These are Legionella and Pseudomonas aeruginosa. The thresholds and conditions of viability of these bacteria are considered. The main causes that cause the risks of growth of pathogenic bacteria are classified.

Results. Requirements of observance of complex technical measures at designing consist in necessity of selection of the equipment of systems of individual heat supply at observance of conditions of control of water intake, maintenance

of preliminary heating of water up to temperature 65 °C in systems of accumulation type, constant circulation of water in circuits of water supply, use of flowing water heaters, selection of pipes.

Conclusions. The use of technical solutions for heat supply systems of individual construction facilities can significantly reduce or completely eliminate the risks associated with the possibility of pathogenic bacteria and diseases of people living in households.

KEYWORDS: individual construction, heating, hot water, legionella, hygiene, household, flow water heaters, circulation circuit

Acknowledgements. The author thanks the reviewers for their comments, both in terms of the style of presentation and the scientific and technical essence, which contribute to a deeper disclosure of the topic of scientific work.

FOR CITATION: Toropov A.L. Sanitary and hygienic issues in the design of individual heat supply systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1651-1665. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1651-1665 (rus.).

Corresponding author: Alexey L. Toropov, toropov@aprilgroup.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие нормы проектирования систем водоснабжения и теплоснабжения для централизованных систем применительно к индивидуальному домостроению носят справочный характер. Владелец домохозяйства сам определяет внутренние количественные нормы потребления горячего водоснабжения (ГВС) и температуры помещения и другие параметры работы систем в зависимости от личных потребностей членов домохозяйства. Важно, чтобы в целом не нарушались нормы пожарной безопасности, экологии, санитарные нормы, нормативы выделенной на домохозяйство энергии.

Кроме индивидуальных многоквартирных домов, существует поквартирное теплоснабжение. С точки зрения общей классификации это индивидуальные системы теплоснабжения. Устанавливаются они, как правило, в многоквартирном доме, а генерация тепловой энергии в них происходит с помощью комбинированного настенного газового котла. Особенности поквартирного теплоснабжения заключаются в том, что технические характеристики режимов подготовки горячей воды и отопления ограничены параметрами работы настенного газового котла, которые устанавливаются по нормам централизованного теплоснабжения для многоквартирных домов. Значения параметров отопления и ГВС в основном носят количественный характер, но возникают вопросы качества воды. Прежде всего, это качество санитарной воды, имеющей контакт с кожей человека в индивидуальных системах теплоснабжения и питьевой воды (гигиена горячей и холодной воды).

С точки зрения соблюдения санитарных норм при снабжении холодной и горячей водой между централизованным и индивидуальным водоснабжением есть существенные отличия. В индивидуальном водоснабжении домохозяйств не существуют и не действуют нормативные правила контроля качества воды, которые разработаны для централизованного водоснабжения и исполнение которых контролируется государственными структурами. Отсутствие знаний по данному вопросу у собственников домохозяйств возлагает косвенную ответственность на проектировщиков и производителей

инженерного оборудования индивидуальных систем водоснабжения.

Важным отличием централизованного и индивидуального водоснабжения является характеристика источника воды. Для централизованного водоснабжения забор воды производится из открытых водных источников с низкой минерализацией или из межпластовых водоемов в достаточном количестве и высокого качества. Качество воды постоянно контролируется в соответствии с ГОСТ «Вода питьевая». В индивидуальном строительстве на объектах без подключения к централизованному водоснабжению в качестве источника воды используются колодцы с грунтовой водой и трубчатые колодцы (скважины) с составом воды, соответствующей месту расположения объекта, без контроля показателей качества воды.

Подготовка горячей воды на коммунальных и индивидуальных объектах также отличается. Если в централизованном ГВС применяются системы подготовки горячей воды нагревом холодной воды в теплообменниках, что соответствует быстрому нагреву и применению горячей воды, то в индивидуальном строительстве часто используются емкостные водонагреватели и бойлеры косвенного нагрева, в которых нагретая вода может длительно храниться перед потреблением. Неконтролируемость качества исходной воды и вероятность длительного хранения горячей воды перед применением в индивидуальных системах ГВС и холодного водоснабжения (ХВС) приводят к возникновению отложений в виде ила и твердых образований в застойных областях систем водоснабжения и участков трубопроводов, которые становятся идеальной средой для размножения болезнетворных бактерий. Основное влияние на процесс формирования илстых образований застойных зон оказывают температура среды, скорость движения воды, форма и геометрические размеры конструктивных элементов систем ГВС. Важными факторами служат время, характер и периодичность использования воды. Применяемые материалы трубопроводов индивидуальных систем водотеплоснабжения также влияют на процессы формирования зон коррозии элементов систем и образование накипи в связи с возможной периодической диффузией кислорода через стенки труб. Имеются инженерные

решения, позволяющие исключить или существенно снизить риски возникновения болезнетворных бактерий в оборудовании индивидуальных систем теплоснабжения и снабжения холодной водой. Данные инженерные решения целесообразно применять на стадии проектирования.

В последние годы зафиксирован рост числа сообщений о легионеллезе в Европейском союзе и Европейской экономической зоне. Рост случаев значителен: с 6947 сообщений в 2015 г. до 11 298 в 2019 г. [1–3]. Это вызывает тревогу, поскольку группа бактерий *Legionella* представляет серьезную угрозу здоровью человека. Инцидент массового заражения легионеллезом в Верхней Пышме Свердловской области в 2007 г.¹ [4], возможно, стал причиной появления нормативных материалов, определяющих правила и требования по обеспечению безопасности систем ГВС и профилактике легионеллеза^{2, 3, 4}. Ключевыми конструктивными особенностями систем водотеплоснабжения, при которых болезнетворные бактерии начинают размножаться, являются: повышенная температура воды, наличие застойных зон, осадочные отложения внутри ГВС и ХВС и на поверхности трубопроводов [5–7].

Термическая санация воды ГВС — наиболее действенный метод борьбы с болезнетворными бактериями. При температуре более 50 °С большинство бактерий не размножаются, поэтому в соответствии с рекомендациями ВОЗ необходимо поддерживать температуру ГВС выше 50 °С в трубопроводах и 60 °С в резервуарах с горячей водой⁵. В связи с тем, что поддержание постоянной высокой температуры воды — энергоемкий процесс применяются различные системы фильтрации воды в конечных точках потребления, состоящие из многоступенчатых фильтров предварительной и основной очистки воды [8]. Также используются методы дезинфекции

с помощью хлора, озона, ионизации воды [9], дезинфекция воды ультрафиолетом [10].

Недостатки методов борьбы с бактериями в системах теплоснабжения, альтернативных термической санации, — это необходимость периодического контроля и замены фильтрующих элементов, наличие системы дозирующих устройств, их квалифицированный сервис. В индивидуальных и поквартирных домохозяйствах соблюдение указанных требований практически невозможно. Кроме того, их реализация связана с высокими экономическими затратами. При несвоевременной замене фильтрующих элементов фильтры могут стать рассадниками болезней. Важны также и конструктивные решения систем подачи воды. Застойные зоны, тупиковые линии водоснабжения могут препятствовать попаданию дезинфицирующих средств, что снижает их эффективность. В настоящее время в Российской Федерации для предотвращения развития болезнетворных бактерий в системах централизованного водоснабжения используется метод предварительного хлорирования воды [11].

Все перечисленные нормы и правила проектирования и соблюдения санитарной гигиены распространяются на коммунальное хозяйство и централизованные системы. Индивидуальные системы водотеплоснабжения обладают рядом отличий. Главные причины, вызывающие риски роста болезнетворных бактерий, заключаются в конструктивных, социальных, юридических особенностях систем теплоснабжения индивидуальных домовладений, среди которых можно выделить [12]:

- отсутствие нормативных документов государства на проектирование, согласование, регистрацию проектно-конструкторской документации индивидуальных систем водотеплоснабжения;
- отсутствие норм контроля систем при вводе индивидуального объекта в эксплуатацию;
- отсутствие норм периодического контроля состояния систем;
- отсутствие норм и требований приводит к тому, что решение о конструкции систем и подбор оборудования принимает собственник, не имеющий знаний в данной области;
- финансирование строительства систем основывается на принципе максимальной экономии;
- параметры систем водотеплоснабжения определяет собственник;
- в ряде случаев источником воды в индивидуальных системах могут быть открытые непроточные водоемы, источники воды с неконтролируемым качеством и минерализацией;
- применение конструктивных решений ГВС с наличием емкостных систем подготовки и хранения холодной и горячей воды, застойных и тупиковых зон трубопроводов.

Отсутствие указанных нормативных требований к системам индивидуального водотеплоснабжения приводит к тому, что при проектировании и подбо-

¹ Зиянгирова Э. По делу о вспышке легионеллеза в Верхней Пышме предъявлены обвинения. URL: <https://www.nakanune.ru/news/2009/03/18/2150256/>

² СанПиН 2.1.4.2496–09. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 15 с.

³ СП 3.1.2.2626–10. Профилактика легионеллеза. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 22 с.

⁴ МУК 4.2.2217 07. 4.2. Методы контроля, биологические и микробиологические факторы. Выявление бактерий *Legionella pneumophila* в объектах окружающей среды. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2007. 27 с.

⁵ Минздрав одобрил снижение температуры горячей воды в квартирах. URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/583b0c649a79475b478b994a?from=copy>

ре оборудования для индивидуальных систем водотеплоснабжения должны учитываться их отличия от аналогичных для централизованных систем. Главное отличие — требование к минимизации квалификации специалистов при сервисе оборудования, минимизация контроля за расходными материалами, необходимыми для поддержания технологических процессов обеззараживания и дезинфекции, максимальное сокращение контроля над техническими параметрами, автоматизация процессов.

Цель работы — обобщение и выделение особых требований к проектированию, подбору оборудования и конструктивным решениям для индивидуальных систем водотеплоснабжения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Существует несколько видов болезнетворных бактерий, возникающих в индивидуальных системах водотеплоснабжения домохозяйств. Наиболее часто встречающимися и опасными являются легионелла и синегнойная палочка. Применительно к борьбе с легионеллой для централизованного водоснабжения разработаны профилактические мероприятия, санитарные нормы и правила. По отношению к синегнойной палочке таких систематизированных документов нет. Важность мероприятий по исключению или минимизации вероятности возникновения условий для размножения бактерий легионеллы и синегнойной палочки, как и самых распространенных бактерий, возникающих в системах водоснабжения, многократно обсуждалась Европейским центром по профилактике и контролю за заболеваниями^{6, 7} [13, 14]. В ряде развитых стран

⁶ Legionnaires' disease in Europe, 2012 // European Centre for Disease Prevention and Control. URL: <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/legionnaires-disease-europe-2012>

⁷ Legionnaires' disease in Europe, 2011 to 2015 // National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5508329/>

Европы смертность от болезней, вызванных легионеллой, превышает смертность от автомобильных аварий. На рис. 1 представлена диаграмма основных причин, вызвавших заболевание легионеллезом⁵, главной из которых являются системы теплоснабжения, доля которых составляет 62 %, бассейны — 8 %, градирни — 1 %, другие причины — 9 %, в 20 % случаев причина неизвестна.

На рис. 2 приведена диаграмма распределения легионеллеза в зависимости от возраста и пола людей.

Системы отопления и ГВС индивидуального домохозяйств состоят из [15, 16]:

- источника тепловой энергии в виде автономного нагревательного электрического, газового или твердотопливного котла;
- бойлера косвенного нагрева или теплового аккумулятора воды емкостного типа;
- трубопроводов и распределительных узлов контуров нагрева и потребления;
- циркуляционных насосов и блоков управления;
- расширительных баков для компенсации температурных расширений воды в системе теплоснабжения;
- отопительных приборов в виде системы «теплый пол», радиаторов, конвекторов;
- приборов потребления холодной и горячей воды в виде кранов, раковин, ванн, душа, унитазов, биде.

Условия размножения бактерий легионеллы в данных системах [17–22]:

- температура воды в системе ГВС соответствует температуре интенсивного размножения болезнетворных бактерий (30–50 °C);
- возникновение застойных зон в трубопроводах и узлах систем водотеплоснабжения;
- диффузия кислорода через стенки трубопроводов, поступление кислорода через элементы систем теплоснабжения, расширительные баки открытого типа;
- илстые образования, как результат окислительных процессов в воде из источников с неконтролируемой минерализацией;

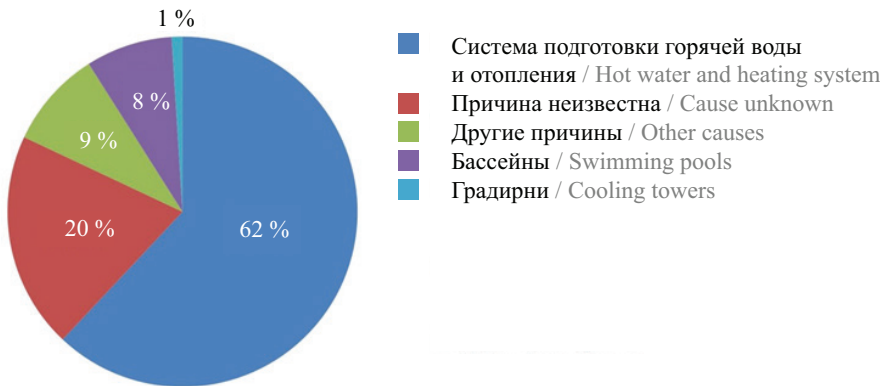


Рис. 1. Диаграмма причин возникновения легионеллеза

Fig. 1. Diagram of the causes of legionellosis

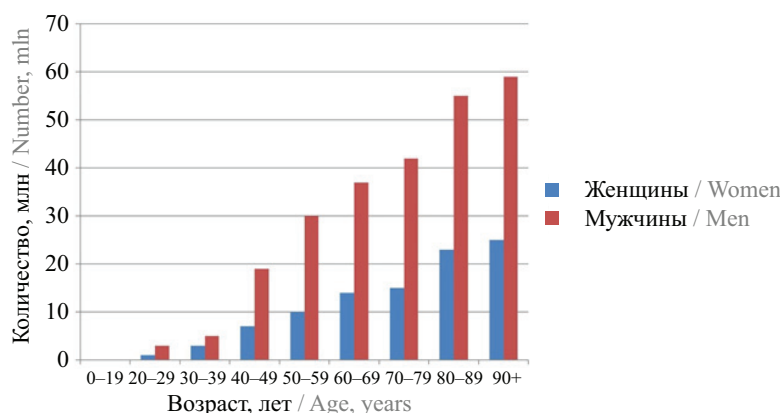


Рис. 2. Диаграмма распределения легионеллеза в зависимости от возраста и пола

Fig. 2. Diagram of distribution of legionellosis depending on age and gender

- наличие шероховатой поверхности в емкостях и трубопроводах, способствующих возникновению поверхностной бактериальной пленки.

Путь заражения бактериями:

- санитарно-гигиенические процедуры, проводимые обитателями домохозяйств (душ, ванная, мытье рук);
- вдыхание воздушно-капельной дисперсии, в том числе через рот, дыхательные пути;
- контакт поврежденной кожи с зараженной водой.

По сравнению с легионеллой у синегнойной палочки есть отличия среды обитания и размножения:

- для синегнойной палочки необходимо наличие и воды, и воздуха, в отличие от легионеллы, средой обитания которой является только вода;
- температурные условия развития бактерии от 4 до 45 °C;
- путями распространения бактерий могут быть контакты между людьми и животными, прием пищи.

Заболевание легионеллезом протекает с выраженной лихорадкой, общей интоксикацией, поражением легких, центральной нервной системы, органов пищеварения [23–30]. Места поражения синегнойной инфекции: ЛОР-органы, респираторный тракт, желудочно-кишечный тракт, глаза, кожа, мочевая система [31]. Температурные пороги, определяющие жизнеспособность и размножение для легионеллы, можно выразить так [32, 33]:

- 50 °C — бактерия выживает, но не размножается;
- 55 °C — при продолжительности температурного воздействия более 5 ч бактерия погибает в течение 5–6 ч;
- 60 °C — бактерия погибает за период времени до 30 мин;
- более 65 °C — бактерия погибает за 2 мин;
- более 70 °C — мгновенная температурная дезинфекция.

Благоприятной средой размножения болезнетворных бактерий служат застойные зоны илистых образований, возникающие в индивидуальных системах ГВС и отопления домовладений. Использование ГВС индивидуальных систем носит периодический характер со значительными паузами. Например, использование ГВС дачи только в выходные дни или праздники. При таком применении возможен процесс периодического насыщения воды, находящейся в системе без движения, кислородом через элементы системы или посредством диффузии кислорода через стенки трубопроводов, если они сделаны из пластиковых материалов без защитных барьерных металлических слоев с последующей реакцией с выпадением в осадок в виде ила растворенных в воде гидрокарбонатов кальция и магния.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проектировании и подборе оборудования систем индивидуального теплоснабжения необходимо соблюдать следующие условия:

- холодная вода должна поставляться при температуре ниже 20 °C;
- в качестве источника холодной воды при отсутствии централизованного водоснабжения холодной водой использовать скважины, колодцы. Не допускать заполнение скважин и колодцев грунтовыми водами. Исключить забор воды из открытых водных бассейнов со стоячей водой;
- исключить (уменьшить) возможность возникновения застойных зон, обеспечить циркуляцию воды в накопительных элементах систем отопления и горячего водоснабжения;
- накопительные емкости для потребления питьевой и санитарной воды должны быть либо с возможностью обновления воды раз в 3–4 ч, либо обеспечивающие периодический нагрев и выдерживание при температуре более 65 °C;
- обеспечить циркуляцию воды в трубопроводах и отсутствие в них тупиковых зон;

- осуществлять слив застойной воды перед применением;
- периодически прогревать воду в системе горячего водоснабжения аккумулирующего типа выше температуры 65 °С (в зонах, где исключена возможность ожогов кожи при случайном использовании);
- применять системы «мгновенной» подготовки горячей воды и проточные водонагреватели, минимизировать применение накопительных емкостей и хранение подготовленной горячей воды перед использованием;
- использовать конструкционные материалы, уменьшающие возможность формирования поверхностных бактериальных пленок;
- использовать трубопроводы с минимальными параметрами диффузии кислорода через их поверхность;
- не использовать системы отопления «открытого» типа с открытыми расширительными баками;
- применять алгоритмы и стратегии управления работой оборудования с циклами профилактического прогрева и циркуляции;
- использовать механическую очистку воды высокого уровня (ультрафильтрация, обратный осмос) для уменьшения возможности роста и переноса бактерий. Соблюдать своевременную смену фильтрующих элементов;
- применять устройства обеззараживания воды (химической очистки) или заменять их на системы автоматической подачи воды безаккумуляторного (проточного) типа.

Применительно к профилактике заражения синегнойной палочкой следует отметить, что местом наиболее вероятного скопления данных бактерий являются наконечники кранов-смесителей раковин и душевых, а также места сливов стоков в канализацию. В этих местах есть и благоприятные температурные условия, и наличие воды и воздуха. Снижение рисков заражения синегнойной палочкой производится за счет конструкций кранов, душевых леек, сливных решеток и других элементов кухни и ванных комнат, исключающих застой сливных зон, а также профилактической чисткой зон возможного застоя воды. Смесители горячей и холодной воды должны иметь разборную конструкцию изливов. Материалы труб должны иметь гладкую, непористую внутреннюю поверхность, препятствующую образованию бактериальной пленки. Рекомендуется повышенная скорость движения воды в трубопроводах. Особенное внимание вопросам санитарной гигиены надо уделять при проектировании оборудования для подготовки горячей воды в дошкольных учреждениях и яслях. По санитарным нормам температура горячей воды в таких учреждениях должна быть не выше 37 °С, а это самая комфортная температура для роста бактерий в застойных зонах.

Предлагается шесть основных конструктивных решений проектирования индивидуальных систем водотеплоснабжения домохозяйств.

Первое эффективное решение для исключения возникновения легионеллеза — применение принципа «тепловой санации систем теплоснабжения». Этот принцип базируется на жизнестойкости бактерий к температурным воздействиям. Температурные пороги для легионеллы можно выразить так [34]: нагрев воды до температуры 65 °С и выдерживание перед использованием в течение более 2 мин. При температуре 70 °С бактерии легионеллы погибают мгновенно. Данные рекомендации применимы к электрическим бытовым накопительным водонагревателям, бойлерам косвенного нагрева, трубопроводам с циркуляцией горячей воды. Проблема применения данного решения заключается в его низкой энергетической эффективности. Потери энергии при хранении горячей воды с температурой 60 °С в системах объемного типа, особенно настенных водонагревателях небольшого объема, составляют 1–3 кВт/сут. При периодическом пользовании горячей водой с большими промежутками времени стоимость литра горячей воды становится очень высокой. Безвозвратные потери при использовании накопительного электрического водонагревателя только в выходные дни, без выключения питания нагрева в рабочие дни недели, составят 250–300 рублей в месяц. Выключение водонагревателя в периоды отсутствия потребления также вызывают проблемы, поскольку на нагрев остывшего водонагревателя объемом 100–150 л трубчатым электронагревателем 1,5 кВт требуется около 4–6 ч. При отсутствии возможности использования проточных водонагревателей в индивидуальном домохозяйстве и применении водонагревателей накопительного типа после длительных пауз в потреблении горячей воды рекомендуется нагреть воду в водонагревателе до температуры не менее 65 °С и слить воду в течение 30 с из трубопроводов перед первым после паузы потреблением.

Вторым конструктивным решением можно рекомендовать принцип разделения контуров аккумуляции и потребления горячей воды. Выделяемый при нагреве воды осадок содержит нерастворимые в воде карбонаты натрия и магния. Это происходит из-за того, что в естественных условиях вода находится в равновесном состоянии и с точки зрения ионного обмена, и с точки зрения величины растворенных в ней кислорода и углекислого газа. При заборе воды из индивидуального источника для использования в индивидуальных системах ГВС и ХВС температура воды повышается, карбонатные равновесные состояния нарушаются и из растворенных в воде гидрокарбонатов кальция и магния образуются оксид углерода и нерастворимые карбонаты, которые выделяются и оседают на деталях и узлах системы ГВС, особенно в ее застойных зонах. Сво-

бодный оксид углерода может привести к повышенной коррозии элементов системы. Важнейшее значение в вопросах возникновения и объема отложений имеет карбонатная (временная), а не общая жесткость воды.

В исследованиях [35, 36] выявлено, что при эксплуатации ГВС с длительными возможными паузами в пользовании горячей водой соли жесткости начинают появляться при температуре 40 °С. Первоначально в виде ила с дальнейшим преобразованием в камень. Илистые образования в застойных зонах систем водоснабжения являются идеальной средой для размножения болезнетворных бактерий.

Температура воды в индивидуальных системах холодного теплоснабжения также выше ее температуры в равновесном состоянии при нахождении в природной среде, следовательно, и в застойных зонах систем ХВС могут образовываться илистые образования, связанные с образованием солей жесткости воды. Такие илистые образования возникают, например, в гидравлических аккумуляторах систем водоснабжения на резиновых мембранах и внутренней поверхности бака. Для исключения образования ила и твердых солей жесткости в системе ГВС с накопительными емкостями надо исключить постоянное появление «свежей» воды с дальнейшим ее хранением. Следует разделить контуры аккумуляции тепловой энергии и контуры потребления горячей воды. В этом случае объем выпадающих осадков в виде ила или камня определяется однократным объемом теплового аккумулятора и является малой величиной, находящейся в зоне, исключающей контакт с кожей человека.

На рис. 3 представлена схема разделения контуров аккумуляции и потребления тепловой энергии для индивидуальной системы теплоснабжения с тепловым аккумулятором [37]. Тепловой генератор в виде котла нагревает теплоноситель только в контуре с тепловым аккумулятором. Потребление тепловой энергии происходит через отдельные контуры отопления и горячей воды, которые выполняются через отдельные пластинчатые теплообменники. Подготовка горячей воды в данном случае происходит мгновенно нагревом протекающей через пластинчатый теплообменник холодной воды.

Третьим техническим решением предлагается использование проточных водонагревателей. С точки зрения энергоэффективности проточные водонагреватели обладают более высокими показателями, чем водонагреватели накопительного типа [38]. Экономия потребления энергии зависит от интенсивности потребления горячей воды и может составлять до 30 %. Это обусловлено тем, что в периоды пауз водопотребления в индивидуальных системах ГВС с накопительным водонагревателем происходят постоянные потери тепловой энергии через теплоизоляционный корпус бака. Величина потерь, кроме конструкции бойлера, зависит от мно-

гих субъективных факторов, связанных с обитателями домохозяйства (количества людей, их пола, возраста, привычек, социального уровня и многих других факторов). При использовании проточных водонагревателей подготовка горячей воды происходит в период пользования водой потребителем, а потери связаны с понятием тепловой инерционности генераторов тепловой энергии. При применении теплогенераторов с малой тепловой инерцией они минимальные. Главный недостаток проточных водонагревателей индивидуальных систем ГВС — величина подводимой для нагрева энергии. Для систем с двумя точками водоразбора мощность теплового генератора в период потребления воды должна быть около 25 кВт·ч. Наличие такой мощности, особенно при электрическом энергоснабжении ГВС, проблематично. Для решения вопроса ГВС при ограниченном энергоснабжении применяются комбинированные конструкции водонагревателей с небольшими объемами накопительных емкостей с хорошей теплоизоляцией.

Четвертое техническое решение при проектировании индивидуальных систем водоснабжения связано со снижением рисков распространения бактерий в контурах подачи и циркуляции воды. При строительстве индивидуальных домов актуален вопрос использования дешевых строительных материалов и узлов, труб. Решение о финансировании строительства индивидуального объекта принимает собственник. Наиболее дешевыми являются полимерные трубы, применяемые в системах теплоснабжения и снабжения холодной водой. Данные трубы имеют высокие показатели диффузии кислорода через их стенки, составляющие для полиэтиленовых и полипропиленовых труб 650–900 мг/м²/сут [39]. Показатели диффузии кислорода через стенки труб различного типа приведены в таблице.

Для исключения вопросов, связанных с образованием илистых образований в застойных участках трубопроводов систем водотеплоснабжения из-за возможной диффузии кислорода, целесообразно применять в индивидуальном строительстве полипропиленовые трубы, армированные алюминием, и металлопластиковые полиэтиленовые трубы повышенной термостойкости или металлические трубы. При монтаже труб в ограждающих конструкциях стоит применять теплоизоляцию для увеличения времени остывания труб с горячей водой и времени нагрева для труб ХВС. Кроме того, теплоизоляция труб водоснабжения повышает энергетическую эффективность систем и снижает время ожидания получения воды нужной температуры на конце трубопроводов в точке водоразбора. Важно также правильно размещать трубы водоснабжения в общих каналах или строительных конструкциях. Если трубопроводы горячей и холодной воды расположены рядом, то при отсутствии потребления воды происходит выравнивание температуры за счет взаимного влияния,

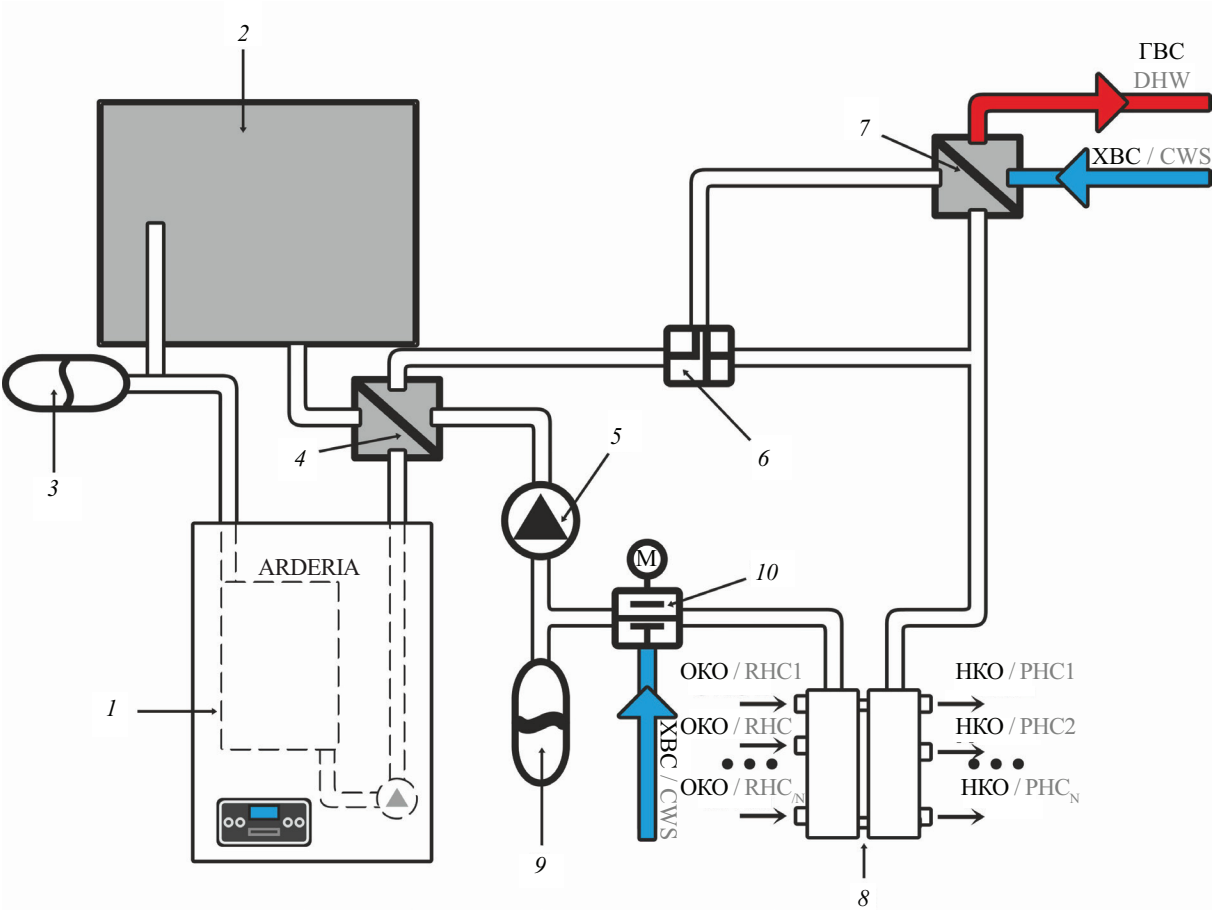


Рис. 3. Схема разделения контуров аккумулирования и потребления тепловой энергии систем теплоснабжения индивидуального домохозяйства: 1 — электрический котел с встроенным циркуляционным насосом контура генерации тепловой энергии, 9 кВт/ч для 1–2-комнатных квартир, 12 кВт/ч для 3–4-комнатных квартир; 2 — тепловой аккумулятор объемом 150 л для 1–2-комнатных квартир, 200 л для 3–4-комнатных квартир; 3 — расширительный бак контура генерации тепловой энергии; 4 — пластинчатый теплообменник контура генерации тепловой энергии; 5 — циркуляционный насос контура теплоснабжения; 6 — трехходовой кран переключения отопление-ГВС; 7 — пластинчатый теплообменник контура ГВС; 8 — коллекторы напорного отопительного контура (НКО) и обратного отопительного контура (ОКО); 9 — расширительный бак контура теплоснабжения; 10 — узел автоматической подпитки контура теплоснабжения

Fig. 3. Scheme for separating the circuits of accumulation and consumption of thermal energy in individual household heat supply systems: 1 — electric boiler with a built-in circulation pump for the thermal energy generation circuit, 9 kW/h for 1–2-room apartments, 12 kW/h for 3–4-room apartments; 2 — heat accumulator with a volume of 150 l for 1–2-room apartments, 200 l for 3–4-room apartments; 3 — expansion tank of the thermal energy generation circuit; 4 — plate heat exchanger of the thermal energy generation circuit; 5 — circulation pump of the heating circuit; 6 — three-way valve for switching heating-HWS; 7 — plate heat exchanger of the HWS circuit; 8 — collectors of the pressure heating circuit (PHC) and return heating circuit (RHC); 9 — expansion tank of the heating circuit; 10 — automatic replenishment unit for the heating circuit

что негативно способствует созданию благоприятных условий для размножения болезнетворных бактерий⁸ [40, 41]. При монтаже канализационных труб их можно использовать как теплоизоляционный барьер, располагая линии горячего и холодного водоснабжения по разные стороны от канализационной трубы. Необходимо также отделять греющие кон-

туры отопительных приборов (радиаторы, «теплый пол») от контуров водоснабжения.

Пятое техническое решение — периодическая циркуляция и прокачка воды в системе ГВС. Основным элементом, обеспечивающим циркуляцию потока воды при закрытом смесителе в точке водоразбора — «водяная розетка», один из вариантов которой представлен на рис. 4. Данные устройства позволяют делать проточными линии подачи горячей воды при закрытом смесителе в точке водоразбора. Разводка труб к разным точкам водоразбора выполняется последовательно. Наиболее частая точка потре-

⁸ Хомайко Л. Как победить бактерии в системе водоснабжения: активные и пассивные способы. URL: <https://www.forumhouse.ru/journal/articles/8397-kak-pobedit-bakterii-v-sisteme-vodosnabzheniya-aktivnye-i-passivnye-sposoby>

Показатели диффузии кислорода через поверхности труб, применяемых в системах индивидуального водоснабжения
Oxygen diffusion rates through the surfaces of pipes used in individual water supply systems

Тип трубопровода Pipeline type	Обозначение Designation	Диффузия кислорода, мг/м²/сут Oxygen diffusion, mg/m²/day
Однослойные трубы Single layer pipes		
Трубы из сшитого полиэтилена Cross-linked polyethylene tubes	PEX	650
Трубы из полипропилена Polypropylene pipes	PPR	900
Многослойные трубы Multilayer pipes		
Трубы из сшитого полиэтилена с барьерным слоем Pipe made of cross-linked polyethylene with a barrier layer	PEX-EVON-PEX	0,32
Трубы полипропиленовые, армированные стекловолокном Polypropylene pipes reinforced with glass fiber	PPR-FG-PPR	900
Трубы полипропиленовые, армированные алюминием Polypropylene pipes reinforced with aluminum	PPR-AI-PPR	0
Трубы металлопластиковые из полиэтилена повышенной термостойкости Metal-plastic pipes made of polyethylene with increased heat resistance	PERT-AI-PERT	0



Рис. 4. Водяная проточная розетка
Fig. 4. Water flow outlet

бления воды устанавливается последней по очереди, среди точек, имеющих контакт с кожей человека. При пользовании водой в одной точке вода обновляется во всех предшествующих по линии водоснабжения. Если в линии подачи воды находятся точки разбора, не предназначенные для прямого контакта с кожей человека (стиральные, посудомоечные машины), то они ставятся после точек разбора постоянного потребления.

Удлинение трубопроводов ведет к необходимости поддержания температуры в контуре ГВС. Этот принцип также называют zero cold water. Это решение выполняется организацией циркуляции горячей воды при отсутствии потребления через контуры ГВС. При этом в контуре снабжения горячей водой всегда поддерживается температура воды около 55 °С за счет установки специального циркуляционного насоса малой мощности. Обеспечение циркуляции воды в замкнутом контуре при отсутствии потребления не требует высоких энергетических затрат, поэтому номинальная мощность таких циркуляционных насосов составляет 10–20 Вт·ч. Общее суточное потребление энергии для организации периодической циркуляции воды в контуре ГВС при автономных источниках тепловой генерации составляет около 50 Вт/сут. Энергетические



a



b

Рис. 5. Станция автоматического поддержания давления (a); блок управления работой водяного насоса с электронным реле давления (b)

Fig. 5. Automatic pressure maintenance station (a); control unit for the operation of the water pump with an electronic pressure switch (b)

затраты на поддержание постоянной температуры в контуре ГВС компенсируют потери на слив воды по трубам в период ожидания поступления горячей воды при отсутствии контура циркуляции и обеспечивают комфорт практически мгновенного получения горячей воды потребителем. Температура воды 55 °С исключает размножение болезнетворных бактерий, периодическая прокачка всех точек водоразбора конструктивно исключает образование застойных зон. Организация такого контура должна быть выполнена при проектировании новых объектов.

При описании инженерных решений, снижающих риски распространения болезнетворных бактерий, рассматривают в основном системы отопления и горячего водоснабжения. Необходимо отметить, что индивидуальные системы ХВС также являются местом возможного распространения болезнетворных бактерий. Температура воды в источниках водозабора (скважины, колодцы) обычно ниже 20 °С, что служит порогом начала размножения бактерий. Но в индивидуальных системах ХВС используются резервуары пластиковые или стальные для хранения воды, гидравлические аккумуляторы, трубы внутренней разводки водоснабжения. Все эти узлы и элементы располагаются в помещениях с температурой выше 20 °С и большую часть времени эксплуатации находятся в режиме ожидания потребления без движения воды. Гидравлические аккумуляторы имеют разделительную резиновую мембрану, а трубы и емкости часто выполнены из полимеров. Поверхности резины и полимерных труб без движения в них воды являются идеальными условиями для возникновения бактериальной плен-

ки. Клетки легионелл в биопленках отличаются от обычных, находящихся в несвязанном состоянии клеток, повышенной устойчивостью к различным дезинфицирующим веществам, в том числе к хлорсодержащим [42–44]. В ряде стран Европы разрешены только проточные гидроаккумуляторы, обеспечивающие периодическую промывку емкостей. В индивидуальных системах ХВС рекомендуется использовать проточные автоматические электронные станции системы поддержания давления воды для нескольких точек разбора или станции водоснабжения с электронными реле давления без гидравлического аккумулятора. Внешний вид устройств холодного водоснабжения индивидуальных домохозяйств показан на рис. 5. Данные устройства практически полностью исключают возможность роста болезнетворных бактерий. Дорогим, но эффективным методом борьбы с болезнетворными бактериями является применение медных труб внутренней разводки. Медные трубы обладают нулевой диффузией, а ионы меди — дезинфицирующими свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отсутствие нормативных документов для проектирования индивидуальных систем горячего и холодного водоснабжения и наличие особенностей конструкций этих систем по сравнению с централизованными приводят к рискам, связанным с качеством потребляемой воды и ее санитарно-гигиеническим состоянием. Обобщены и классифицированы причины возникновения и роста болезнетворных бактерий в индивидуальных системах

водотеплоснабжения домохозяйств. Выделены пять основных конструктивных решений проектирования индивидуальных систем водотеплоснабжения, снижающих или исключающих полностью риски развития болезнетворных бактерий типа легионеллы и синегнойная палочка в индивидуальных системах ГВС, отопления и ХВС, это:

- температурная санация в системах теплоснабжения емкостного типа перед потреблением воды;
- разделение контуров генерации тепловой энергии и контуров подготовки горячей воды;
- максимальное использование проточного способа подготовки горячей воды;
- разделение и отдельная теплоизоляция трубопроводов горячего и холодного водоснабжения

для исключения взаимного теплообмена, применение медных, металлических или полимерных труб с металлическим барьерным слоем;

- применение контуров циркуляции и поддержания высокой температуры в системе подачи горячей воды для быстрой ее доставки к точке потребления (технология zero cold water), периодическая (ручная или автоматическая) промывка и слив холодной воды из застойных и тупиковых зон. Минимизация использования емкостей для хранения горячей и холодной воды, использование проточных автоматических систем ХВС без гидравлических аккумуляторов.

Применение указанных технических решений целесообразно на стадии проектирования индивидуальных систем водотеплоснабжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kanarek P., Bogiel T., Breza-Boruta B. Legionellosis risk — an overview of Legionella spp. habitats in Europe // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. Issue 51. Pp. 76532–76542. DOI: 10.1007/s11356-022-22950-9

2. Campese C., Roche D., Clément C., Fierobe F., Jarraud S., de Waelle P. et al. Cluster of Legionnaires' disease associated with a public whirlpool spa // Euro Surveill. 2010. Vol. 15. Issue 26. P. 19602.

3. Coetsee N., Duggal H., Hawker J., Ibbotson S., Harrison T.G., Phin N. et al. An outbreak of Legionnaires' disease associated with a display spa pool in retail premises // Euro Surveill. 2012. Vol. 17. Issue 37. P. 20271.

4. Онищенко Г.Г., Лазикова Г.Ф., Чистякова Г.Г., Демина Ю.В., Никонов Б.И., Романенко В.В. и др. Эпидемиологическая характеристика вспышки легионеллеза в г. Верхняя Пышма // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2008. № 2. С. 82–85. EDN JSBTCF.

5. Груздева О.А. Научно-методические основы профилактики легионеллеза в гостиничных комплексах // Эпидемиология и вакцинопрофилактика. 2014. № 2 (75). С. 49–53. EDN SBEUMJ.

6. Van der Kooij D., Veenendaal H.R., Schelfer W. Biofilm formation and multiplication of Legionella in a model warm water system with pipes of copper, stainless steel and cross-linked polyethylene // Water Research. 2005. Vol. 39. Issue 13. Pp. 2789–2798. DOI: 10.1016/j.watres.2005.04.075

7. Percival S.L., Williams D.W., Gray N.F., Yates M.V., Chalmers R.M. Microbiology of waterborne diseases. Academic Press, Elsevier Ltd., 2014. 695 p. DOI: 10.1016/C2010-0-67101-X

8. Baron J.L., Peters T., Shafer R., MacMurray B., Stout J.E. Field evaluation of a new point-of-use faucet filter for preventing exposure to Legionella and other

waterborne pathogens in health care facilities // American Journal of Infection Control. 2014. Vol. 42. Issue 11. Pp. 1193–1196. DOI: 10.1016/j.ajic.2014.08.002

9. Систер В.Г., Цедилин А.Н., Иванникова Е.М., Тартаковский И.С., Шульга Е.Г. Фильтрационные методы обеззараживания систем горячего водоснабжения от легионелл // Известия МГТУ МАМИ. 2013. Т. 2. № 3 (17). С. 7–12. EDN RYEAJF.

10. Ульянов А.Н. Ультрафиолетовая дезинфекция природных аэробных спор для проверки ультрафиолетового реактора // АВОК. 2005. № 4. С. 28–30.

11. Онищенко Г.Г., Покровский В.И., Тартаковский И.С., Малеев В.В., Лазикова Г.Ф., Чистякова Г.Г. и др. Современные взгляды на эпидемиологию легионеллеза: алгоритм действий при эпидемических вспышках и профилактическом мониторинге // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2008. № 2. С. 1–10. EDN JSBSUX.

12. Торопов А.Л. О проблемах возникновения легионеллы и других бактерий в индивидуальных и децентрализованных системах отопления и горячего водоснабжения комбинированных гелиосистем // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3–2. С. 256–260. EDN BIYCWO.

13. Graham F.F., Hales S., White P.S., Baker M.G. Review Global seroprevalence of legionellosis — a systematic review and meta-analysis // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-020-63740-y

14. Ghernaout D., Elboughdiri N., Lajimi R. Legionella: health impacts, exposure evaluation, and hazard reduction // Algerian Journal of Engineering and Technology. 2022. Vol. 6. Pp. 43–61.

15. Торопов А.Л. Автономные системы теплоснабжения малой мощности. Настенные газовые котлы и тепловые аккумуляторы. М. : Национальный исследовательский технологический универси-

тет «МИСиС», 2022. 176 с. DOI: 10.22227/978-5-7264-3110-9.2022.176. EDN CJWKLO.

16. *Toropov A.* Gas-electric hybrid wall-mounted boiler // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 458. P. 01032. DOI: 10.1051/e3sconf/202345801032

17. *Wiik R., Krøvel A.V.* Necessity and effect of combating legionella pneumophila in municipal shower systems // PLoS ONE. 2014. Vol. 9. Issue 12. P. e114331. DOI: 10.1371/journal.pone.0114331

18. *Van Kenhove E., Dinne K., Janssens A., Laverge J.* Overview and comparison of Legionella regulations worldwide // American Journal of Infection Control. 2019. Vol. 47. Issue 8. Pp. 968–978. DOI: 10.1016/j.ajic.2018.10.006

19. *Тартаковский И.С., Груздева О.А., Карпова Т.И., Дронина Ю.Е., Тарасова Т.А., Логинова О.Г. и др.* Анализ эффективности различных методических подходов, направленных на элиминацию планктонных клеток и биопленок легионелл в потенциально опасных водных системах // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2018. № 4. С. 119–124. DOI: 10.36233/0372-9311-2018-4-119-124. EDN ZAMEZV.

20. *Stavrou V., Chatziprodromidou I., Vantarakis A.* The battle against Legionella. Disinfection in man-made water systems : a systematic review // Journal of Environmental Science and Public Health. 2020. Vol. 4. Issue 3. DOI: 10.26502/jesph.96120098

21. *Тартаковский И.С., Демина Ю.В., Карпова Т.И.* Стандартизация методических подходов к определению и мониторингу легионелл в потенциально опасных водных системах в Российской Федерации // Вопросы аналитического контроля качества вод : мат. XIII науч.-практ. семинара. 2008. С. 62–64.

22. *Harrison T.G., Coetzee N., Duggal H. et. al.* Outbreak in Stoke-on-Trent. Abst. of 1st meeting of the ESCMID study group for Legionella infection (ESGLI). Dresden, Germany, 2012. 21 p.

23. *Благодарова А.С., Чубукова О.А.* Современные подходы к диагностике легионеллеза // Медицинский альманах. 2009. № 2 (7). С. 58–61. EDN KIZVBJ.

24. *Тартаковский И.С., Груздева О.А., Габриэлян Н.И.* Современное состояние проблемы нозокомиального легионеллеза // Вестник трансплантологии и искусственных органов. 2010. Т. 12. № 4. С. 61–71. EDN NRDNVH.

25. *Еприкян Г.Э., Борисов Б.Н.* Загрязнение легионеллой в системах ГВС // Современные научные исследования и инновации. 2021. № 2 (118). С. 4. EDN FBRSPZ.

26. *Портнягина О.А.* Болезни, вызываемые легионеллами // Студенческий научный форум : мат. VII Междунар. студ. науч. конф. 2015.

27. *Гучев И.А., Мелехина Е.В., Марьин Г.Г., Клочков О.И.* Легионеллез: эпидемиология, клиника,

терапия и профилактика // Санитарный врач. 2009. № 9. С. 11–21. EDN RSQDGT.

28. *Зайцев А.А.* Легионеллезная пневмония // Справочник врача общей практики. 2009. № 10. С. 49–54. EDN RVSWND.

29. *Тартаковский И.С., Синопальников А.И.* Легионеллез: роль в инфекционной патологии человека // Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия. 2007. Т. 9. № 3. С. 219–233. EDN IAWQKX.

30. *Груздева О.А., Тартаковский И.С., Карпова Т.И., Мариненко О.В.* Особенности эпидемиологии и методы профилактики нозокомиального легионеллеза // Эпидемиология и вакцинопрофилактика. 2014. № 1 (74). С. 19–23. EDN RWLHLB.

31. *Харченко Л.А.* Синегнойная палочка: современные реальности антибактериальной терапии // Медицина неотложных состояний. 2015. № 1 (64). С. 164–168. EDN TZFLHR.

32. *Тартаковский И.С., Карпова Т.И., Груздева О.А., Мариненко О.В., Дронина Ю.Е.* Влияние температуры на жизнеспособность планктонных клеток и модельных биопленок Legionella Pneumophila в воде // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2015. № 5. С. 7–12. EDN ZQJYBT.

33. *Груздева О.А.* Научно-методические основы обеспечения профилактики легионеллеза в условиях мегаполиса : автореф. дис. ... д-ра мед. наук. М., 2017. 48 с.

34. *Kirschner A.K.T.* Determination of viable legionellae in engineered water systems: Do we find what we are looking for? // Water Research. 2016. Vol. 93. Pp. 276–288. DOI: 10.1016/j.watres.2016.02.016

35. *Шафлик В.* Современные системы горячего водоснабжения. Киев : ДП ИПЦ «Такі справи», 2010. 316 с.

36. *Татаринцев В.А.* Особенности накипеобразования в трубах теплообменных аппаратов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2022. Т. 22. № 1. С. 97–105. DOI: 10.14529/power220111. EDN MRZDPD.

37. *Торопов А.Л.* Применение электрических котлов для водяного поквартирного теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 9. С. 1451–1465. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1451-1465

38. *Schoenbauer B.* Measured performance of natural gas tankless and storage water heaters. Center for Energy and Environment, 2012. 59 p.

39. *Крикотин В.В., Попов М.А.* Диффузия кислорода в полимерных трубах // Новости теплоснабжения. 2013. № 5 (153).

40. *Силенко М.* ЖКХ не должно быть причиной страданий людей, или О том, что такое легионелла и как с ней бороться // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2007. № 11.

41. *Шонина Н.А.* Выбор схемы распределения ГВС для снижения риска распространения легионеллы // Сантехника. 2012. № 4.

42. Ерусланов Б.В., Светоч Э.А., Мицевич И.П. Легионеллез и его лабораторная диагностика // Бактериология. 2018. Т. 3. № 3. С. 58–67. DOI: 10.20953/2500-1027-2018-3-58-67. EDN VUDKXK.

43. Storey M.V., Ashbolt J., Stenström T.A. Biofilms, thermophilic amoebae and Legionella pneumophila — a quantitative risk assessment for distributed

water // Water Science and Technology. 2004. Vol. 50. Issue 1. Pp. 77–82. DOI: 10.2166/wst.2004.0023

44. Khweek A.A., Amer A.O. Factors mediating environmental biofilm formation by Legionella Pneumophila // Frontiers in Cellular and Infection Microbiology. 2018. Vol. 8. DOI: 10.3389/fcimb.2018.00038

Поступила в редакцию 2 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 16 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 17 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: Алексей Леонидович Торопов — кандидат технических наук, генеральный директор — главный конструктор; Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); 105122, г. Москва, Щелковское шоссе, д. 13; РИНЦ ID: 1030472, Scopus: 58406665800, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

REFERENCES

1. Kanarek P., Bogiel T., Breza-Boruta B. Legionellosis risk — an overview of Legionella spp. habitats in Europe. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022; 29(51):76532-76542. DOI: 10.1007/s11356-022-22950-9

2. Campese C., Roche D., Clément C., Fierobe F., Jarraud S., de Waelle P. et al. Cluster of Legionnaires' disease associated with a public whirlpool spa. *Euro Surveill*. 2010; 15(26):19602.

3. Coetzee N., Duggal H., Hawker J., Ibbotson S., Harrison T.G., Phin N. et al. An outbreak of Legionnaires' disease associated with a display spa pool in retail premises. *Euro Surveill*. 2012; 17(37):20271.

4. Onishchenko G.C., Lazikova G.F., Chistyakova G.G., Demina Yu.V., Nikonov B.I., Romanenko V.V. et al. Epidemiologic characteristic of legionnaires' disease outbreak in town Verkhnyaya Pyshma. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*. 2008; 2:82-85. EDN JSBTCF. (rus.).

5. Gruzdeva O.A. Scientific and methodological framework for prevention of legionellosis in the hotel complexes. *Epidemiology and Vaccinal Prevention*. 2014; 2(75):49-53. EDN SBEUMJ. (rus.).

6. Van der Kooij D., Veenendaal H.R., Scheffer W. Biofilm formation and multiplication of Legionella in a model warm water system with pipes of copper, stainless steel and cross-linked polyethylene. *Water Research*. 2005; 39(13):2789-2798. DOI: 10.1016/j.watres.2005.04.075

7. Percival S.L., Williams D.W., Gray N.F., Yates M.V., Chalmers R.M. *Microbiology of Waterborne Diseases*. Academic Press, Elsevier Ltd., 2014; 695. DOI: 10.1016/C2010-0-67101-X

8. Baron J.L., Peters T., Shafer R., MacMurray B., Stout J.E. Field evaluation of a new point-of-use faucet filter for preventing exposure to Legionella and other waterborne pathogens in health care facilities. *American Journal of Infection Control*. 2014; 42(11):1193-1196. DOI: 10.1016/j.ajic.2014.08.002

9. Sister V.G., Tsedilin A.N., Ivannikova E.M., Tartakovskiy I.S., Shulga E.G. Filtering decontamination methods of hot water systems from legionella. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2013; 2(3):7-12. EDN RYEAFFJ. (rus.).

10. Ul'yanov A.N. Ultraviolet disinfection of natural aerobic spores for testing an ultraviolet reactor. *AVOK*. 2005; 4:28-30. (rus.).

11. Onishchenko G.G., Pokrovsky V.I., Tartakovskii I.S., Maleev V.V., Lazikova G.F., Chistyakova G.G., Demina Yu.V. et al. Modern views on the epidemiology of legionellosis: operations procedure during epidemic outbreaks and preventive monitoring. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*. 2008; 2:1-10. EDN JSBSUX. (rus.).

12. Toropov A.L. On the problems of legionella and other bacteria in individual and decentralized heating systems and hot water supply of combined heliosystems. *Modern High Technologies*. 2019; 3-2:256-260. EDN BIYCW. (rus.).

13. Graham F.F., Hales S., White P.S., Baker M.G. Review Global seroprevalence of legionellosis — a systematic review and meta-analysis. *Scientific Reports*. 2020; 10(1). DOI: 10.1038/s41598-020-63740-y

14. Ghernaout D., Elboughdiri N., Lajimi R. Legionella: health impacts, exposure evaluation, and hazard reduction. *Algerian Journal of Engineering and Technology*. 2022; 6:43-61.

15. Toropov A.L. *Autonomous low-power heat supply systems. Wall-mounted gas boilers and heat accumulators*. Moscow, National Research Technological University "MISiS", 2022; 176. DOI: 10.22227/978-5-7264-3110-9.2022.176. EDN CJWKLO. (rus.).

16. Toropov A. Gas-electric hybrid wall-mounted boiler. *E3S Web of Conferences*. 2023; 458:01032. DOI: 10.1051/e3sconf/202345801032

17. Wiik R., Krøvel A.V. Necessity and effect of combating legionella pneumophila in municipal

shower systems. *PLoS ONE*. 2014; 9(12):e114331. DOI: 10.1371/journal.pone.0114331

18. Van Kenhove E., Dinne K., Janssens A., Lave-
rge J. Overview and comparison of Legionella regula-
tions worldwide. *American Journal of Infection Con-
trol*. 2019; 47(8):968-978. DOI: 10.1016/j.ajic.2018.
10.006

19. Tartakovsky I.S., Gruzdeva O.A., Karpova T.I.,
Dronina Yu.E., Tarasova T.A., Loginova O.G. et al.
Analysis of the different methodical approaches directed
on the elimination of plankton forms and legionella bio-
films from potentially dangerous water systems. *Jour-
nal of Microbiology, Epidemiology and Immunobio-
logy*. 2018; 4:119-124. DOI: 10.36233/0372-9311-2018-
4-119-124. EDN ZAMEZV. (rus.).

20. Stavrou V., Chatziprodromidou I., Vantara-
kis A. The battle against Legionella. Disinfection in
manmade water systems: a systematic review. *Journal
of Environmental Science and Public Health*. 2020;
4(3). DOI: 10.26502/jesph.96120098

21. Tartakovsky I.S., Demina Yu.V., Karmo-
va T.I. Standardization of methodological approaches
to the determination and monitoring of Legionella in po-
tentially hazardous water systems in the Russian Federa-
tion. *Questions of analytical control of water quality :
materials of the XIII scientific and practical seminar*.
2008; 62-64. (rus.).

22. Harrison T.G., Coetzee N., Duggal H. et. al.
*Outbreak in Stoke-on-Trent. Abst. of 1st meeting
of the ESCMID study group for Legionella infection
(ESGLI)*. Dresden, Germany, 2012; 21.

23. Blagonravova A.S., Chubukova O.A. Contem-
porary approaches to diagnostics of legionellosis. *Medi-
cal Almanac*. 2009; 2(7):58-61. EDN KIZVBJ. (rus.).

24. Tartakovsky I.S., Gruzdeva O.A., Gabriely-
an N.I. Current aspects of nosocomial Legionellosis
profi laxis. *Russian Journal of Transplantology and
Artificial Organs*. 2010; 12(4):61-71. EDN NRDNVH.
(rus.).

25. Yeprikyan G.E., Borisov B.N. Legionella con-
tamination in hot water supply systems. *Modern Sci-
entific Research and Innovation*. 2021; 2(118):4. EDN
FBRSP. (rus.).

26. Portnyagina O.A. *Diseases caused by Legionella*.
*Student Scientific Forum : materials of the VII Interna-
tional Student Scientific Conference*. 2015. (rus.).

27. Guchev I.A., Melehina E.V., Maryin G.G.,
Klochkov O.I. Legionellosis: epidemiology, clinic, ther-
apy and prophylaxis. *Sanitary Doctor*. 2009; 9:11-21.
EDN RSQDGT. (rus.).

28. Zaitsev A.A. Legionella pneumonia. *Direc-
tory of General Practitioners*. 2009; 10:49-54. EDN
RVSWND. (rus.).

29. Tartakovsky L.S., Sinopalnikov A.L. Legio-
nellosis: the role in human infectious diseases. *Clinical
Microbiology and Antimicrobial Chemotherapy*. 2007;
9(3):219-233. EDN IAWQKX. (rus.).

30. Gruzdeva O.A., Tartakovskiy I.S., Karmo-
va T.I., Marinenko O.V. Features of epidemiology and
prevention methods of nosocomial legionellosis. *Epi-
demiology and Vaccinal Prevention*. 2014; 1(74):19-23.
EDN RWLHLB. (rus.).

31. Kharchenko L.A. Pseudomonas aeruginosa:
modern realities of antibiotic therapy. *Emergency Medi-
cine*. 2015; 1(64):164-168. EDN TZFLHR. (rus.).

32. Tartakovsky I.S., Karpova T.I., Gruzdeva O.A.,
Marinenko O.V., Dronina Yu.E. Effect of temperature
on the viability of plankton cells and model legionella
pneumophila biofilms in water. *Journal of Microbiology,
Epidemiology and Immunobiology*. 2015; 5:7-12. EDN
ZQJYBT. (rus.).

33. Gruzdeva O.A. *Scientific and methodologi-
cal basis for ensuring the prevention of legionellosis in
a megalopolis : abstract of dis. ... doctor of medical
sciences*. Moscow, 2017; 48. (rus.).

34. Kirschner A.K.T. Determination of viable le-
gionellae in engineered water systems: Do we find what
we are looking for? *Water Research*. 2016; 93:276-288.
DOI: 10.1016/j.watres.2016.02.016

35. Shaflik V. *Modern hot water supply systems*.
Kyiv, DP IP. "Taki spravi", 2010; 316. (rus.).

36. Tatarintsev V.A. Features of scale formation in
heat exchanger tubes. *Bulletin of South Ural State Univer-
sity. Series "Power Engineering"*. 2022; 22(1):97-105.
DOI: 10.14529/power220111. EDN MRZDPD. (rus.).

37. Toropov A.L. Application of electric boilers
for water apartment heat supply. *Vestnik MGSU [Month-
ly Journal on Construction and Architecture]*. 2023;
18(9):1451-1465. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.
1451-1465 (rus.).

38. Schoenbauer B. *Measured Performance
of Natural Gas Tankless and Storage Water Heaters*.
Center for Energy and Environment, 2012; 59.

39. Krikotin V.V., Popov M.A. Oxygen diffusion
in polymer pipes. *Heat Supply News*. 2013; 05(153).
(rus.).

40. Silenko M. Housing and communal services
should not be the cause of people's suffering, or about
what legionella is and how to fight it. *Plumbing, Heat-
ing, Air Conditioning*. 2007; 11. (rus.).

41. Shonina N.A. Selecting a hot water distribu-
tion scheme to reduce the risk of the spread of Legionel-
la. *Plumbing. Heating. Conditioning. Energy Efficiency*.
2012; 4. (rus.).

42. Yeruslanov B.V., Svetoch E.A., Mitsevich I.P.
Legionellosis and its laboratory diagnosis. *Bacteriology*.
2018; 3(3):58-67. DOI: 10.20953/2500-1027-2018-3-58-67.
EDN VUDKXK. (rus.).

43. Storey M.V., Ashbolt J., Stenström T.A. Bio-
films, thermophilic amoebae and Legionella pneumo-
phila — a quantitative risk assessment for distributed wa-
ter. *Water Science and Technology*. 2004; 50(1):77-82.
DOI: 10.2166/wst.2004.0023

44. Khweek A.A., Amer A.O. Factors mediating environmental biofilm formation by legionella pneumophila. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2018; 8. DOI: 10.3389/fcimb.2018.00038

Received February 2, 2024.

Adopted in revised form on April 16, 2024.

Approved for publication on April 17, 2024.

BIONOTES: **Alexey L. Toropov** — Candidate of Technical Sciences, General Director — Chief Designer; **Engineering Center “April”**; 13 Schelkovskoe shosse, Moscow, 105122, Russian Federation; ID RSCI: 1030472, Scopus: 58406665800, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.009

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1666-1675

Применение функционально ориентированных систем моделирования при осуществлении строительного контроля

Азарий Абрамович Лапидус, Алексей Юрьевич Щукин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведено исследование функциональных зависимостей между основными участниками строительного контроля, такими как технический заказчик, генеральный подрядчик и генеральный проектировщик.

Материалы и методы. Структура их взаимодействия показана в виде блок-схемы, которая составлена с использованием функционально ориентированной методологии анализа. Представление информации в виде блок-схемы дает возможность проанализировать взаимодействие участников на каждом этапе выполнения строительного контроля. Также интеграция метода IDEF0-моделирования позволяет производить анализ и корректировать взаимосвязи между функциональными блоками.

Результаты. Создание декомпозиции строительного контроля происходит путем формирования функциональных блоков, которые состоят из основных этапов осуществления строительного контроля. Затем выполняется комплексная декомпозиция этих блоков, что позволяет получить «микроуровень» каждого из основных блоков. Такой подход к формированию взаимосвязей между основными участниками строительного контроля в последующем даст возможность выявить основные проблемы, которые встречаются на этапе контроля, и поможет повышению эффективности и структурированию системы строительного контроля.

Выводы. Предлагается по-новому взглянуть на строительный контроль с точки зрения функционального взаимодействия участников контроля, что в будущем приведет к уменьшению количества некачественно выполненной строительной продукции или операций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительный контроль, организационные структуры, взаимодействие участников строительства, функциональные блоки, схема проведения строительного контроля, модули-этапы, декомпозиция IDEF0, организация строительства

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лапидус А.А., Щукин А.Ю. Применение функционально ориентированных систем моделирования при осуществлении строительного контроля // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 10. С. 1666–1675. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1666-1675

Автор, ответственный за переписку: Алексей Юрьевич Щукин, 89834045064@mail.ru.

Application of function-oriented modelling systems in construction control implementation

Azariy A. Lapidus, Aleksei Yu. Shchukin

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

ABSTRACT

Introduction. The study of functional dependencies between the main participants of construction control, such as technical customer, general contractor and general designer, is carried out.

Materials and methods. The structure of their interaction is presented in the form of a flowchart, which is drawn up using function-oriented analysis methodology. Presentation of information in the form of a flowchart makes it possible to analyze the interaction of participants at each stage of construction control. Also, integration of IDEF0 modelling method allows to analyze and correct the relationships between functional blocks.

Results. Construction control decomposition is created by forming functional blocks, which consist of the main stages of construction control realization. Then a complex decomposition of these blocks is performed, which allows us to obtain a "micro-level" of each of the main blocks. This approach to the formation of interrelationships between the main participants

of construction control will subsequently allow to identify the main problems that are encountered at the stage of control and will help to improve the efficiency and structuring of the construction control system.

Conclusions. It is proposed to take a new look at construction control from the point of view of functional interaction of control participants, which in the future will lead to a reduction in the number of poor-quality construction products or operations.

KEYWORDS: construction control, organizational structures, interaction of construction participants, functional blocks, construction control scheme, modules-stages, IDEF0 decomposition, construction organization

FOR CITATION: Lapidus A.A., Shchukin A.Yu. Application of function-oriented modelling systems in construction control implementation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1666-1675. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1666-1675 (rus.).

Corresponding author: Aleksei Yu. Shchukin, 89834045064@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В наше время сложно представить современный город без возведения новых жилых, промышленных и уникальных зданий и сооружений. Однако ни одно строительство не может осуществляться без участия строительного контроля, так как оно является сложным и состоит из множества этапов технологических процессов [1].

Из-за неточного распределения функций между техническим заказчиком, генеральным проектировщиком и генеральным подрядчиком возникает несогласованность действий, что приводит к увеличению сроков строительства, плохому качеству выполненных работ и строительных конструкций. Решением данной проблемы может стать сформированная схема взаимодействия проведения строительного контроля в виде блок-схемы с функциональным взаимодействием всех участников.

Изучив нормативную документацию, такую как СП 48.13330.2019 «Организация строительства», Постановление Правительства РФ от 21.06.2010 № 468 «О порядке проведения строительного контроля при осуществлении строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов капитального строительства», Градостроительный кодекс РФ (ст. 53), а также статьи различных авторов, можно сделать вывод, что в научном сообществе представление систем выполнения строительного контроля чаще всего представляется в табличном или письменном виде [2].

Задача данной статьи — представить структуру проведения строительного контроля в виде блок-схемы, состоящей из четырех блоков, которые описывают основные этапы с их последующей декомпозицией для более наглядного и понятного представления структуры строительного контроля [3, 4]. На сегодняшний день применение функционально ориентированных систем моделирования помогает создать одну из самых точных декомпозиций структуры организации строительного контроля.

Основные этапы при выполнении строительного контроля [5, 6]:

А. Входной контроль проектной и рабочей документации [7].

Б. Осуществление входного контроля на строительной площадке [8].

В. Проведение операционного контроля [9].

Г. Выполнение приемочного контроля [10].

Согласно нормативным документам и законодательным документам РФ, основные участники строительного контроля [11]:

- технический заказчик;
- генеральный подрядчик;
- генеральный проектировщик.

В ходе исследования необходимо изучить и составить структуры проведения строительного контроля, используя функционально ориентированные методологии анализа и моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Главный предмет исследования при составлении структуры — изучение функциональных связей между элементами и участниками строительного контроля [12]. Как и в любой другой системе, для обеспечения структурированной и корректно выполняемой работы необходимо точно понимать, в какой последовательности будут выполняться работы [13]. Для этого используем методологию моделирования производственной деятельности, представленную на рис. 1.

С целью описания функциональных связей используем функционально ориентированную методологию анализа, которая включает [14, 15]:

1. IDEF0 — создание функциональной модели.
2. IDEF1 — создание информационной модели и базы данных.
3. IDEF2 — создание динамической модели.
4. IDEF3 — описание потоков работ.
5. IDEF4 — проектирование клиент-серверных систем.
6. IDEF5 — описание онтологий.
7. DFD — описание сети функций, связанных потоками данных.

В данной статье используется IDEF0-моделирование, так как следует создать функциональную модель, которая отображает структуру и функцию системы, а также потоки информации и материальных объектов, связывающих эти функции [16, 17].

На рис. 2 приведена схема, отображающая основные элементы при использовании технологии IDEF0.

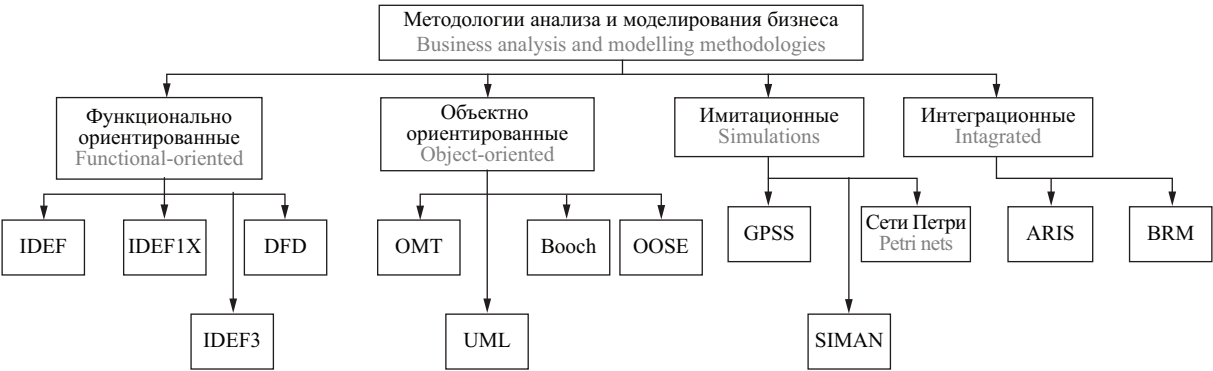


Рис. 1. Методология моделирования производственной деятельности
Fig. 1. Methodology of modeling of production activity

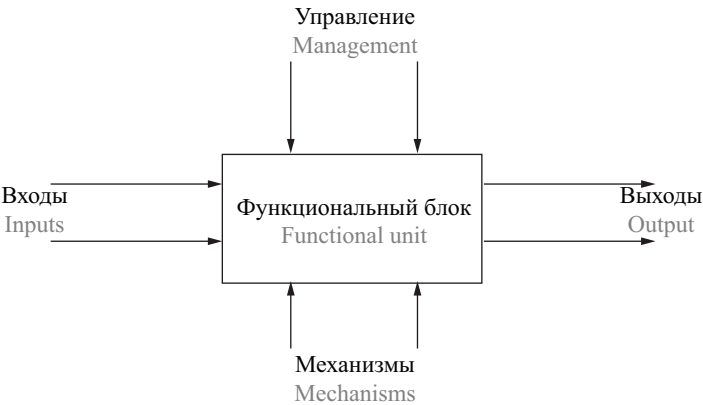


Рис. 2. Описание функционального блока
Fig. 2. Description of the functional block

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При применении IDEF0-моделирования функциональным блоком будет проведение строительного контроля [18]. На вход будут поступать следующие сведения: рабочая документация (РД), проектная документация (ПД), строительные материалы, конструкция здания, строительно-монтажные работы (СМР). На выходе

необходимо получить акт проверки, в котором будет указано соответствие выполненных работ проектной и рабочей документации, а также требования строительных норм и правил. В блок управления включены: нормативная документация, внутренние регламенты и процессы, геодезический и лабораторный контроль. Основные участники: генеральный подрядчик, технический заказчик и генеральный проектировщик [19].

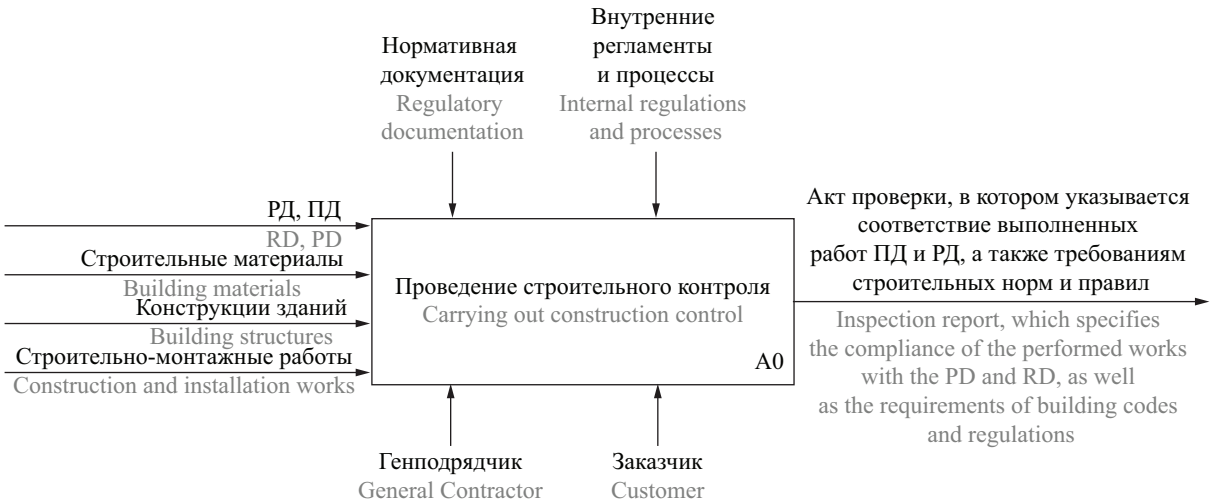


Рис. 3. Декомпозиция функционального блока A0
Fig. 3. Decomposition of the functional block A0

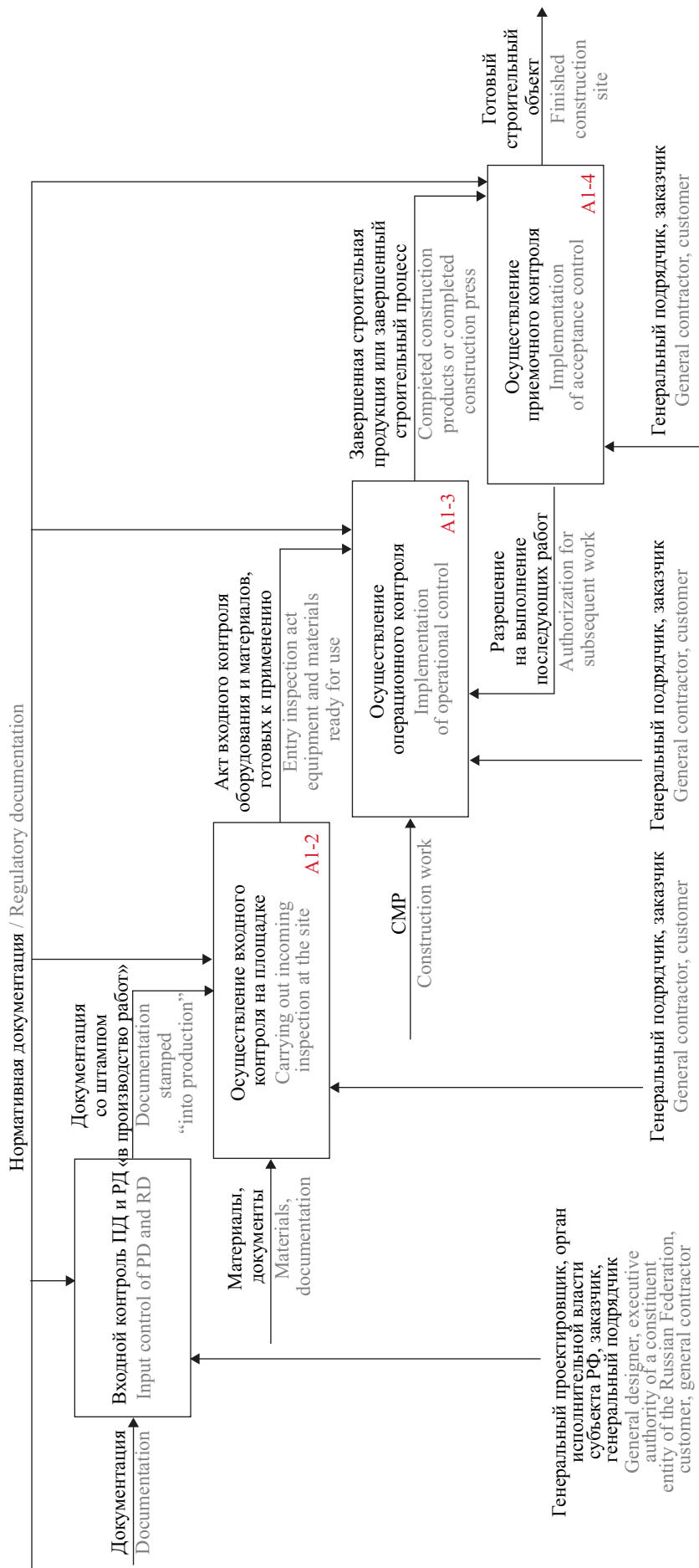


Рис. 4. Декомпозиция уровня А1
Fig. 4. Level A1 decomposition

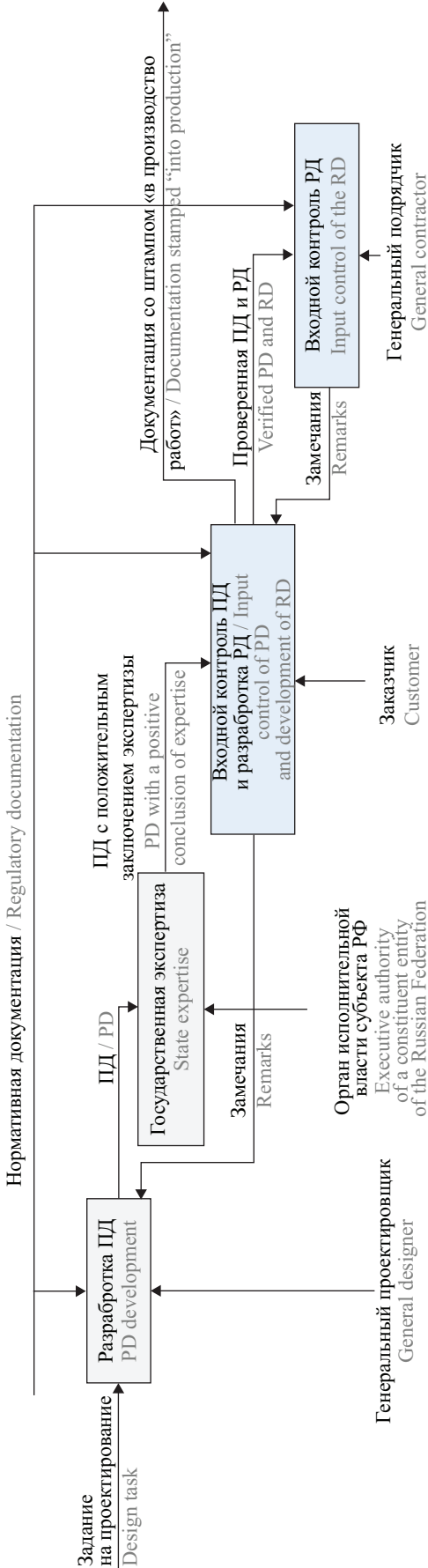


Рис. 5. Декомпозиция функционального блока A1-1

Fig. 5. Decomposition of functional block A1-1

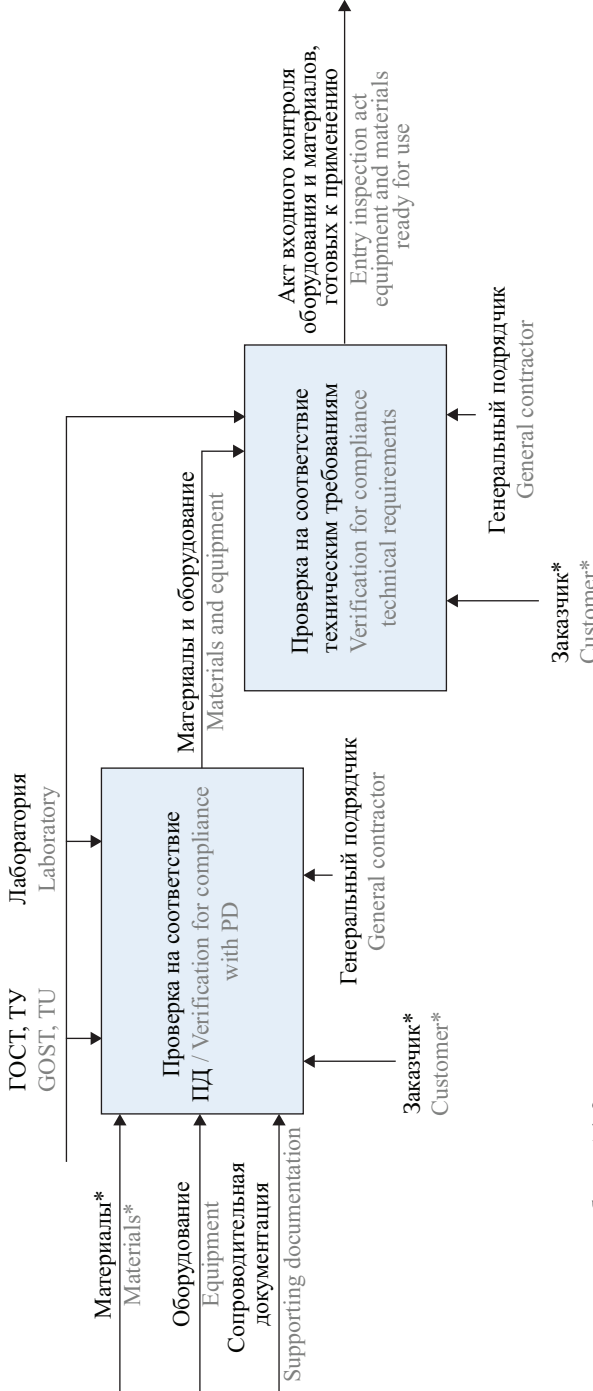


Рис. 6. Декомпозиция функционального блока A1-2

Fig. 6. Decomposition of functional block A1-2

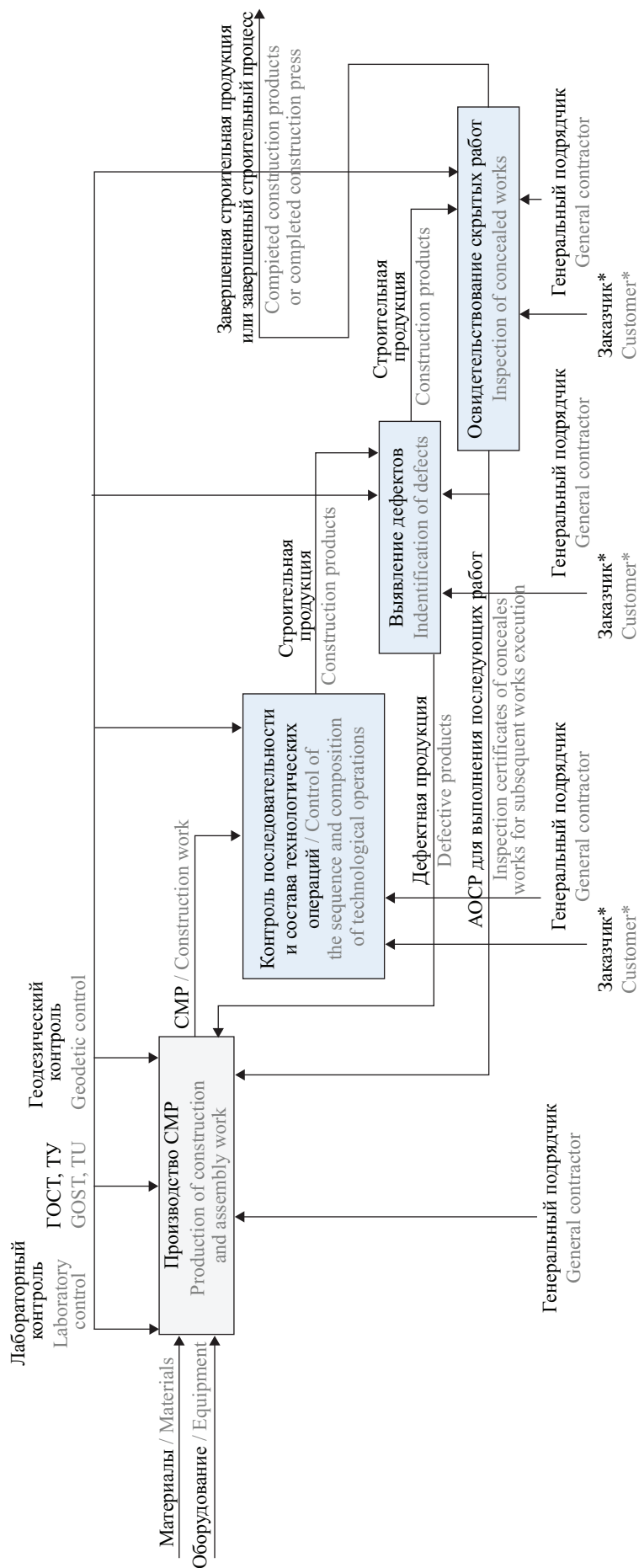


Рис. 7. Декомпозиция функционального блока А1-3
Fig. 7. Decomposition of functional block A1-3

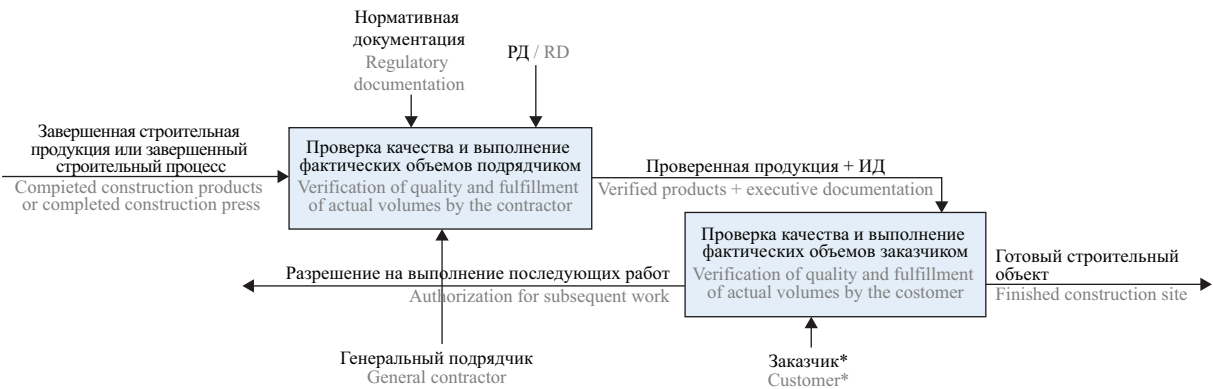


Рис. 8. Декомпозиция функционального блока А1-4

Fig. 8. Decomposition of functional block A1-4

Функциональный блок А0 представлен на рис. 3. Как было сказано ранее, основной идеей при IDEF0-моделировании служит декомпозиция блоков [20]. При декомпозиции функционального блока А0 получили следующее:

- функциональный блок А1-1: входной контроль рабочей и проектной документации;
- функциональный блок А1-2: проведение входного контроля на строительной площадке;
- функциональный блок А1-3: выполнение операционного контроля;
- функциональный блок А1-4: осуществление приемочного контроля.

Декомпозиция уровня А1 показана на рис. 4.

Для структурирования системы проведения строительного контроля на рисунках ниже показано функциональное взаимодействие в функциональных блоках декомпозиции А1.

На рис. 5 представлена декомпозиция функционального блока А1-1: входной контроль ПД и РД.

На рис. 6 приведена декомпозиция функционального блока А1-2: осуществление входного контроля на строительной площадке.

На рис. 7 представлена декомпозиция функционального блока А1-3: выполнение операционного контроля.

На рис. 8 показана декомпозиция функционального блока А1-4: проведение приемочного контроля.

В результате исследования составлена схема проведения строительного контроля при строительстве зданий и сооружений в виде блок-схемы с функциональным взаимодействием. Ключевыми элементами исследования являются функциональное взаимодействие между участниками строительного контроля и их структуризация с использованием методологии IDEF0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сделать ряд выводов, представляющих интерес для научного сообщества.

Анализ существующей литературы и практики выполнения строительного контроля показывает, что описание функционального взаимодействия между участниками строительного контроля в табличном и письменном виде не отображает точно структурированности, которую может показать блочная схема.

При проведении исследования было предложено выделять функциональные блоки при осуществлении строительного контроля (А1-1: входной контроль ПД и РД; А1-2: выполнение входного контроля на строительной площадке; А1-3: проведение операционного контроля; А1-4: осуществление приемочного контроля). Использование функциональных блоков (А1-1, А1-2, А1-3, А1-4) поможет установить четкие этапы строительного контроля и отслеживать выполнение каждого из них.

Декомпозиция функциональных блоков, которая описывает структуру взаимодействия участников строительного контроля и отражает управление над функциональными блоками, позволит избавиться от нечеткого распределения функций между участниками строительного контроля и, благодаря наглядному отображению взаимосвязей между основными участниками строительства с помощью IDEF0-диаграммы, поможет повысить качество выполняемых работ и уменьшить сроки строительства.

На основании данных схем в дальнейшем исследовании планируется предложить сформированную организационную структуру для улучшения проведения работ строительного контроля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Акулов А.О., Рада А.О., Кононова С.А. Анализ современных видов контроля строительных работ и проблемы их развития // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 9. С. 73–79. DOI: 10.17513/snt.39763. EDN WLWHZM.
2. Пиеничникова Я.В., Марыгина Л.В. Роль строительного контроля и надзора при реализации инвестиционно-строительных проектов // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2022. № 1. С. 137–140. EDN XFOTDX.
3. Скакалов В.А. Организационно-технологическая модель ведения строительного контроля как средство сведения к минимуму финансовых и временных затрат заказчика // Символ науки: международный научный журнал. 2017. № 6. С. 20–24. EDN YUNAIT.
4. Владыццев Н.В., Извольская И.В. Принцип моделирования бизнес-процессов в стандарте IDEF0 // Экономический анализ: теория и практика. 2008. № 9 (114). С. 11–17. EDN IJUNEZ.
5. Немихина С.А. Строительный контроль при строительстве автомобильных дорог // Образование. Наука. Производство : сб. докл. XV Междунар. молодежного форума. 2023. С. 93–96. EDN OTVIGN.
6. Липидус А.А., Макаров А.Н., Коротеев Д.Д., Болотова А.С. Строительный контроль в промышленном и гражданском строительстве : учебное пособие. М. : Издательство МИСИ – МГСУ, 2023.
7. Баулин А.В., Перунов А.С., Ермаков В.А. Периодичность и порядок составления документации по строительному контролю на объекте строительства // Вестник евразийской науки. 2019. Т. 11. № 5. С. 60. EDN ORDKNI.
8. Аглиева В.Ф. Совершенствование системы входного контроля качества строительных материалов // Фундаментальные и прикладные исследования гуманитарных и естественных наук: экономические, социальные, философские, политические, правовые, общенаучные аспекты : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 9–12. EDN YUXJVC.
9. Бродский В.И. Организация операционного контроля в системе качества строительного производства // Системные технологии. 2020. № 3 (36). С. 15–18. EDN DBYWXN.
10. Смирнов С.А. Строительный контроль // Мат. Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей им. Д.И. Менделеева, посвящ. 10-летию института промышленных технологий и инжиниринга. 2019. С. 256–258. EDN VXKUWC.
11. Олейник П.П. Основные тенденции развития организации строительного производства // Строительное производство. 2022. № 2. С. 21–25. DOI: 10.54950/26585340_2022_2_21. EDN VEAEPD.
12. Поверинова В.В. Совершенствование систем строительного контроля и надзора // Fundamental and Applied Approaches to Solving Scientific Problems : сб. ст. по мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 245–248. EDN UGJSXL.
13. Тебекин А.В. Методология функционального моделирования сложных технических систем модульного типа // Журнал технических исследований. 2021. Т. 7. № 2. С. 3–12. EDN ZJHCICQ.
14. Kiseleva E.V., Dambiev T.B., Stepanets V.E., Valkova S.S. Building Functional Diagram of Cargo Delivery to Describe and Research Processes in Freight Forwarding Company based on the IDEF0 Standard (SADT) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. Issue 2. P. 022060. DOI: 10.1088/1755-1315/988/2/022060
15. Газизова Г.И. Создание IDEF0-модели для анализа материальных потоков производства строительных материалов // Актуальные проблемы науки и техники : мат. II Междунар. науч.-техн. конф. 2022. С. 619–623. EDN RUNVWX.
16. Черемных С.В., Семенов И.О., Ручкин В.С. Структурный анализ систем: IDEF-технологии. М. : Финансы и статистика, 2001.
17. Чемисов С.Б. Применение методологии IDEF0 с целью моделирования бизнес-процессов на предприятии // Проблемы современной экономики. 2009. № 4 (32). С. 446–449. EDN MVTZCP.
18. Лапина М.А., Ржевская Н.В., Медведева А.С., Золотова А.Г. Применение диаграммы IDEF0 для наглядного представления структуры проекта // Auditorium. 2023. № 1 (37). С. 64–69. EDN SLZELT.
19. Симонов А.А., Алфимов А.В. Общий анализ деятельности заказчика и подрядчика как субъектов строительного контроля // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений : сб. науч. тр. 4-й Всерос. науч.-практ. конф. 2022. С. 485–487. EDN VMFKNT.
20. Прудников В.А. SADT-технология в построении IDEF-диаграмм в формировании структурной композиции информационных систем // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2020. № 1 (177). С. 36–47. EDN YMVMXB.

Поступила в редакцию 31 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 30 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 27 августа 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Азaрий Абрамович Лapidус** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; Lapidusaa@mgsu.ru;

Алексей Юрьевич Щукин — магистр кафедры технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0001-7754-8478; 89834045064@mail.ru.

Вклад авторов:

Лapidус А.А. — научное руководство, развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Щукин А.Ю. — развитие методологии, концепция исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Akulov A.O., Rada A.O., Kononova S.A. Analysis of modern types of control of construction works and problems of their development. *Modern High Technologies*. 2023; 9:73-79. DOI: 10.17513/snt.39763. EDN WLWHZM. (rus.).
2. Pshenichnikova Y.V., Marygina L.V. The role of construction control and supervision in the implementation of investment and construction projects. *Far East: Problems of Development of Architectural and Construction Complex*. 2022; 1:137-140. EDN XFOTDX. (rus.).
3. Skakalov V.A. Organizational and technological model of construction control as a means of minimizing the financial and time costs of the customer. *Symbol of Science: International Scientific Journal*. 2017; 6:20-24. EDN YUNAIT. (rus.).
4. Vladymtsev N.V., Izvolskaya I.V. The principle of modeling business processes in the IDEF0 standard. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2008; 9(114):11-17. EDN IJUNEZ. (rus.).
5. Nemikhina S.A. Construction control during the construction of highways. *Education. Science. Production : collection of reports of the XV International Youth Forum*. 2023. С. 93–96. EDN OTVIGN. (rus.).
6. Lapidus A.A., Makarov A.N., Koroteev D.D., Bolotova A.S. *Construction control in industrial and civil construction : textbook*. Moscow, Publishing house MISS – MGSU, 2023. (rus.).
7. Baulin A.V., Perunov A.S., Ermakov V.A. Frequency and procedure of preparation of documentation for construction control at the construction site. *Eurasian Scientific Journal*. 2019; 11(5):60. EDN ORDKNI. (rus.).
8. Aglieva V.F. Improvement of the system of incoming quality control of construction materials. *Fundamental and applied research of humanities and natural sciences: economic, social, philosophical, political, legal, general scientific aspects : materials of the international scientific and practical conference*. 2018; 9-12. EDN YUXJVC. (rus.).
9. Brodskiy V.I. Organizing in-process control in construction operations quality system. *System Technologies*. 2020; 3(36):15-18. EDN DBYWXN. (rus.).
10. Smirnov S.A. Construction control. *Materials of the international scientific and practical conference of young researchers named after D.I. Mendeleev, dedicated to the 10th anniversary of the Institute of Industrial Technologies and Engineering*. 2019; 256-258. EDN VXXUWC. (rus.).
11. Oleynik P.P. Main development trends organizations of construction production. *Construction Production*. 2022; 2:21-25. DOI: 10.54950/26585340_2022_2_21. EDN VEAEPD. (rus.).
12. Poverinova V.V. Improvement of construction control and supervision systems. *Fundamental and Applied Approaches to Solving Scientific Problems : a collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference*. 2019; 245-248. EDN UGJSXL. (rus.).
13. Tebekin A. Methodology for functional modeling of complex technical systems of modular type. *Journal of Technical Research*. 2021; 7(2):3-12. EDN ZJHCIQ. (rus.).
14. Kiseleva E.V., Dambiev T.B., Stepanets V.E., Valkova S.S. Building Functional Diagram of Cargo Delivery to Describe and Research Processes in Freight Forwarding Company based on the IDEFO Standard (SADT). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 988(2):022060. DOI: 10.1088/1755-1315/988/2/022060
15. Gazizova G.I. Creation of IDEF0-model for the analysis of material flows of building materials production. *Actual problems of science and technology : materials of the II International Scientific and Technical Conference*. 2022; 619-623. EDN RUNVWX. (rus.).
16. Cheremnykh S.V., Semenov I.O., Ruchkin V.S. *Structural analysis of systems: IDEF technologies*. Moscow, Finance and Statistics, 2001. (rus.).
17. Chemisov S.B. Application of IDEF0 methodology for the purposes of modeling of business-pro-

cesses at an enterprise. *Problems of Modern Economics*. 2009; 4(32):446-449. EDN MVTZCP. (rus.).

18. Lapina M.A., Rzhavska N.V., Medvedeva A.S., Zolotova A.G. Application of the IDEF0 diagram for a visual representation the structure of the project. *Auditorium*. 2023; 1(37):64-69. EDN SLZELT. (rus.).

19. Simonov A.A., Alfimov A.V. General analysis of customer and contractor activities as subjects of construction control. *Innovative Methods of Designing*

Building Structures of Buildings and Structures : collection of scientific papers of the 4th All-Russian scientific-practical conference. 2022; 485-487. EDN VMFKNT. (rus.).

20. Prudnikov V.A. SADT-technology in construction of IDEF-diagrams in the formation of the structural composition inside information systems. *Information Technologies of CAD/CAM/CAE*. 2020; 1(177):36-47. EDN YMVMXB. (rus.).

Received January 31, 2024.

Adopted in revised form on March 30, 2024.

Approved for publication on August 27, 2024.

B I O N O T E S : **Azariy A. Lapidus** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; Lapidusaa@mgsu.ru;

Aleksei Yu. Shchukin — master 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; ORCID: 0000-0001-7754-8478; 89834045064@mail.ru.

Contribution of the authors:

Azariy A. Lapidus — scientific guidance, methodology development, text finalization, final conclusions.

Aleksei Yu. Shchukin — development of methodology, research concept, writing the original text, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

Формирование эффективного графика производства работ при строительстве монолитного железобетонного дома

Надежда Владимировна Розанцева¹, Владимир Викторович Золотарев²

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Главстрой-Регионы; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующие принципы организации строительства, основанные на ранних разработках, не учитывающих современную ситуацию, в значительной степени становятся препятствием на пути развития строительной отрасли. Сложившаяся ситуация требует внедрения новых подходов в управлении строительством, позволяющих адаптироваться к изменяющимся экономическим условиям и способствующих сокращению продолжительности строительства. Задачей исследования была разработка проекта организации работ, позволяющая сократить сроки возведения монолитного этажа с 14 до 6 рабочих дней. Научная новизна заключается в разработке комбинаций различных технологических этапов, которые дали возможность сократить продолжительность строительства, не нарушая технологий строительного производства; оперативно принимать решения в конкретной ситуации и вести полный контроль за расходом строительных материалов, возможными потерями и трудозатратами, не направленными на выполнение основных задач, с целью повышения технико-экономических показателей строительства.

Материалы и методы. Изучены типовые технологические процессы и нормативные документы. Выявлено, что снижению трудозатрат и расхода строительных материалов, повышению производительности и улучшению качества способствуют оптимизация технологических процессов и использование принципов бережливого строительства; разработка и внедрение технологии зависит от конечной поставленной цели и задачи проекта, подразумевает последовательность принятия решений.

Результаты. Разработан алгоритм принятия конкретных решений. Для достижения поставленной цели проведен анализ технологии монолитного домостроения, выявлены моменты, оказывающие непосредственное влияние на увеличение продолжительности строительства и возможных потерь, предложены варианты внесения изменений, способствующие решению этих проблем.

Выводы. Предлагаемая система организации работ может иметь большой потенциал в дальнейшем, несмотря на свою простоту. Разработанные технические и технологические решения, направленные на бережливое отношение в производстве и организации строительства, во многом будут способствовать повышению конкурентоспособности строительных компаний, снижая себестоимость продукции посредством сокращения прямых затрат, увеличения производительности и повышения качества продукции. Этапы дальнейшего внедрения будут выстраиваться всецело на обосновании и разработке модели управления бережливым строительством и шагов по внедрению данной системы, определении зоны ответственности каждого участника.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: производительность труда, трудозатраты, потери, бережливое строительство, бережливое производство, монолитное строительство

Благодарности. Главстрой-Регионы выражает благодарность рецензентам, положительно оценившим данную работу.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Розанцева Н.В., Золотарев В.В. Формирование эффективного графика производства работ при строительстве монолитного железобетонного дома // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 10. С. 1676–1686. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1676-1686

Автор, ответственный за переписку: Надежда Владимировна Розанцева, nrozanceva@lan.spbgasu.ru.

Formation of an effective schedule of work during the construction of a monolithic reinforced concrete house

Nadezhda V. Ryazantseva¹, Vladimir V. Zolotarev²

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
St. Petersburg, Russian Federation;

² Glavstroy-Regions; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The existing principles of construction organization, based on early developments that do not take into account the current situation, to a large extent become an obstacle to the development of the construction industry. The current situation requires the introduction of new approaches in construction management, allowing to adapt to changing economic

conditions, and contributing to a reduction in the duration of construction. The task of the study was to develop a project for the organization of work, which allows reducing the time for the construction of a monolithic floor from 14 to 6 working days. The scientific novelty of the work lies in the development of such combinations of various technological stages that made it possible to reduce the duration of construction without violating construction production technologies; to make decisions promptly in a specific situation and maintain full control over the consumption of building materials, possible losses and labour costs not aimed at fulfilling the main tasks, in order to improve the technical and economic indicators of construction.

Materials and methods. Standard technological processes and regulatory documents were studied. It is revealed that the optimization of technological processes and the use of the principles of “lean construction” contributes to reducing labour costs and consumption of building materials, increasing productivity and improving quality; the development and implementation of technology depends on the final goal and task of the project, implies a sequence of decision-making.

Results. In the course of the research, an algorithm for making specific decisions was developed. To achieve this goal, an analysis of the technology of monolithic housing construction was carried out, the moments that have a direct impact on increasing the duration of construction and possible losses were identified, and options for making changes that contribute to solving these problems were proposed.

Conclusions. The proposed work organization system may have great potential in the future, despite its simplicity. The developed technical and technological solutions aimed at a lean attitude in production and organization of construction will greatly contribute to improving the competitiveness of construction companies, reducing the cost of production by reducing direct costs, increasing productivity and improving product quality. The stages of further implementation will be built entirely on the justification and development of a lean construction management model, and steps to implement this system, determining the area of responsibility of each participant.

KEYWORDS: labour productivity, labour costs, losses, lean construction, lean manufacturing, monolithic construction

Acknowledgments. Glavstroy-Regions expresses gratitude to the reviewers who positively assessed this work.

FOR CITATION: Ryazantseva N.V., Zolotarev V.V. Formation of an effective schedule of work during the construction of a monolithic reinforced concrete house. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1676-1686. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1676-1686 (rus.).

Corresponding author: Nadezhda V. Ryazantseva, nrozanceva@lan.spbgasu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Общепринятые методы организации строительства базируются на многолетнем опыте производства работ, но в сложившейся экономической ситуации они не позволяют строительным компаниям получать достаточные дивиденды для успешной конкуренции на рынке. Льготные программы, в том числе и по ипотеке, позволившие увеличить прибыль многим строительным компаниям, с июля 2024 г. будут значительно сокращаться. Эти обстоятельства требуют кардинального пересмотра многих ранее принятых методов ведения работ и внедрения бережливого производства.

Теоретические постулаты этой разработки наиболее подробно были в свое время описаны Джеймсом П. Вумekom и Дэниелом Т. Джонсом [1, 2]. Данная концепция начала разрабатываться в сложнейших условиях после Второй мировой войны компанией Toyota, что позволило ей совершить практически невозможное на тот промежуток времени — поднять производство с максимальной отдачей и минимальными затратами ресурсов.

Разработчик концепции Тайити Оно говорил: «Рассматривая промежуток времени с того момента, когда покупатель делает заказ, и заканчивая получением оплаты, избегая лишних издержек, мы сокращаем это время» [3, 4]. Основная идея бережливого производства заключается в исключении лишних затрат и ресурсов путем сокращения потерь, тем самым повышается производительность и улучшается качество продукции [5]. Разработанная Тайити Оно концепция выделяла семь видов потерь: излишние запасы материалов; лишние технологиче-

ские операции; излишняя обработка; простои из-за ожидания в результате появления технических и технологических перерывов; излишняя транспортировка в случае неграмотного расположения мест складирования; наличие брака, исправлений; и перепроизводство при отправлении продукции на длительное хранение в случае отсутствия покупательского спроса. Бережливое строительство — это один из вариантов применения концепции бережливого производства¹, но в отличие от массового конвейерного производства в данном случае любой проект является индивидуальным, требующим конкретизации каждого решения. Сложность внедрения этой системы с целью уменьшения затрат, оптимизации процессов без ухудшения качественных и эксплуатационных показателей состоит в необходимости обязательной заинтересованности каждого работника. Была выдвинута гипотеза о *невозможности сразу взять под контроль весь процесс производства — всю стройку, ввиду большого объема разнохарактерных работ, но можно качественно и грамотно выполнять работы на конкретно взятом участке с целью внедрения принципов бережливого строительства.*

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования выбрано строительство многоэтажного монолитного жилого дома в Санкт-Петербурге. Обращение к указанной

¹ ГОСТ Р 56906–2016. Бережливое производство. Организация рабочего пространства (5S). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200133736>

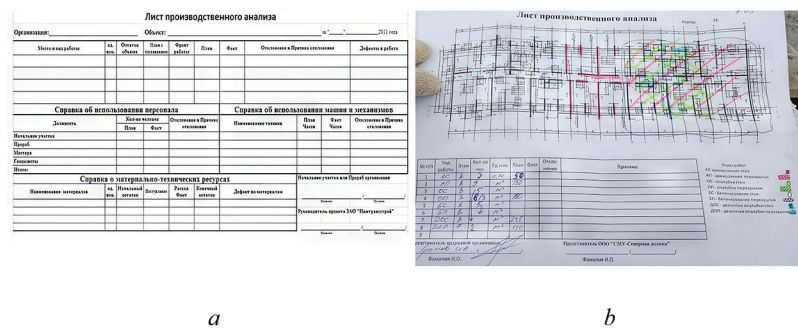


Рис. 1. Лист производственного анализа: а — вариант разработки (лист производственного анализа учитывает местоположение объекта и вид работ, справки об использовании персонала, машин и механизмов, объеме использованных материально-технических ресурсов); б — пример заполнения листа производственного анализа

Fig. 1. Production analysis sheet: а — development option (the production analysis sheet takes into account the location of the facility and the type of work, information on the use of personnel, machines and mechanisms, the amount of material and technical resources used); б — example of filling in the production analysis sheet (LPA)

концепции обусловлено существенными задержками на подготовительном этапе строительства, вызвавшими позднее начало производства работ и отставание от тендерных от 26 дней до 3 месяцев, необходимостью сокращения отставания от графика во избежание срыва сроков строительства корпусов.

Цели работы:

1) на основании проведенных аналитических и экспериментальных исследований разработать проект работ по устройству монолитного каркаса с нормативным сроком строительства 9,7 месяцев, позволяющий без нарушения технологии строительства сократить продолжительность выполнения работ до 8,5 месяцев^{2, 3};

2) сокращение продолжительности подъема монолитного типового этажа каркаса с 14–10 дней до 6 дней.

Для решения таких амбициозных задач было принято решение взять за исходные сведения результаты строительства предыдущих корпусов, а надвижку производить исходя из целей сокращения сроков производства монолитных работ.

На первом этапе с целью выявления проблем и сопутствующих потерь [6] при производстве монолитных работ [7, 8] разработан лист производственного анализа (ЛПА), как инструмент бережливого строительства (рис. 1). В отличие от общего журнала ведения работ, отражающего технологическую последовательность, в ЛПА отражаются сведения о выработке на рабочих местах. Это дает возможность сравнить использование машин, материалов и рабочей силы на местах, плановые и фактические результаты и выявить отклонения.

² СП 435.1325800.2018. Конструкции бетонные и железобетонные монолитные. Правила производства и приемки работ. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293730/4293730484.pdf?ysclid=lrfggqc68x928834115>

³ СНиП 1.04.03–85*. Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений.

Ответственным за монолитные участки было рекомендовано вести ежедневный учет и производить последующие корректировки по итогам прошедших суток в соответствии с выявленными общими показателями.

Наглядность информации — «Визуализация» внесенных данных позволяла в реальном времени по «шахматке» корпусов отслеживать ситуацию. Анализ производства монолитных работ выявил ряд проблем [9, 10], связанных с хранением, организацией и качеством производства строительно-монтажных работ СМР:

- хранение: отсутствие организации рационального размещения материалов, в частности нет отдельного хранения арматурных каркасов и обрезков арматуры, из-за чего: затрудняется свободный доступ к материалам, усложняется номенклатурный поиск, возможны ошибки выбора, увеличивается время сборки заготовок и армирования монтажного горизонта;
- организация: отсутствие поточной организации строительства [11–13]. Возведение арматурных конструкций на монтажном горизонте производилось без привязки к потоку, под арматурные работы выделяется отдельный цикл, в результате затягивается общее время строительства, увеличивается время на ожидание следующих процессов строительства: армирование одного пилона $L = 1200$ мм 2 рабочих производили за 40 мин, армирование одной балки 4 рабочих производили за 4 ч;
- отсутствие предварительной нарезки в наземных условиях и изготовление заготовок на монтажном горизонте добавляет время на выверку, обрезку и подгонку. В результате образуется лишний этап обработки, возникает необходимость выделения времени на ожидание и складирование, увеличивается общий срок строительства и снижается качество СМР, средняя потеря времени на элемент составляет до 14 мин (рис. 2);
- резка заготовок размером больше чертежного «с запасом» требует дополнительных операций: вы-



Рис. 2. Сборка каркасов пилона и балки на монтажном горизонте

Fig. 2. Assembly of the pylon and beam frames on the mounting horizon

верки, подрезки, доводки, уборки отходов, как следствие, появляются дополнительные неучтенные работы, увеличивающие продолжительность строительства, снижающие производительность и качество работ. При этом загромождение территории отходами резки способствует повышению травматизма. Средняя потеря времени на элемент составляет до 30 мин (рис. 2);

- качество производства работ;
- необходимость предварительной разметки.

Любые малейшие отклонения арматурных каркасов от проектного шага — это дополнительные затраты времени на исправление и снижение несущей способности (рис. 3) (средняя потеря времени от 2 до 24 ч на один элемент).

На основании вышеперечисленного выделены основополагающие причины увеличения продолжительности строительства и составлена матрица 4М [14] (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный анализ позволил выделить определенную последовательность и составить план мероприятий с последующей их реализацией в программе Spider Project Lite:

1. Переустройство склада арматуры: удобство доступа, адресное хранение номенклатуры.
2. Централизованное производство заготовок в наземных условиях во внешнем цикле: нарезка на захватку, точно в размер, с идентификацией пе-



Рис. 3. Нарушение шага установки стеновых каркасов

Fig. 3. Violation of the installation step of wall frames

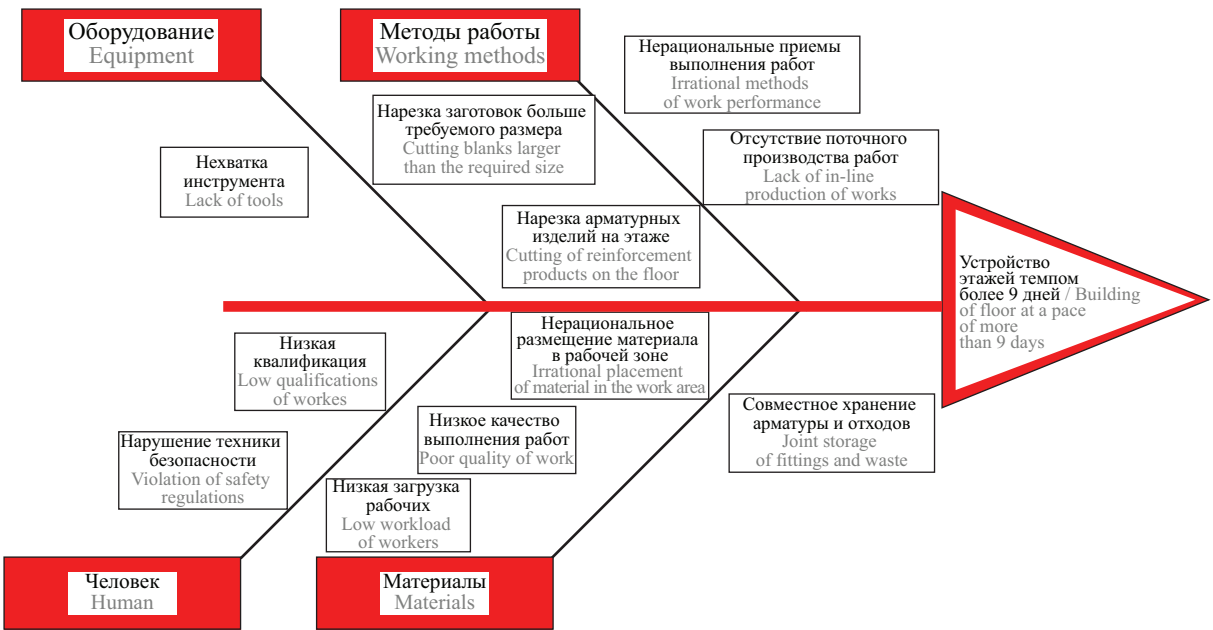


Рис. 4. Выявление и систематизация причин длительности цикла возведения монолитного каркаса типового этажа по диаграмме Исикавы (матрица 4М)

Fig. 4. Identification and systematization of the reasons for the duration of the cycle of construction of a monolithic frame of a typical floor according to the Ishikawa diagram (matrix 4M)

ред отправкой на монтажный горизонт, разделение на потоки выполнение работ (раскладка арматуры по местам сборки — в ночную смену, вязка арматуры — в дневную смену).

3. Организация работы арматурного цеха в соответствии с потоком производства работ по вертикальным и горизонтальным захваткам, заданием (запас в размере одной смены).

4. Разбивка проведения работ на поток с максимальным дроблением по видам работ, маркировкой захваток и зонирование рабочих мест, что позволяет в период выдержки бетона на одном участке вести параллельно укрупнительную сборку отдельных элементов в наземном положении во внешнем цикле¹.

Результат: если ранее на установку и обвязку одного пилона было затрачено 40 мин, то при при-

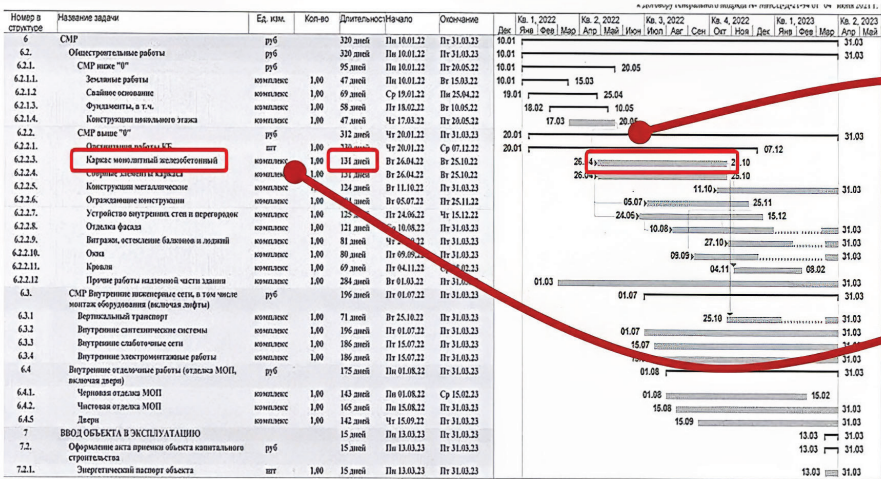


Рис. 5. Определение темпа монтажа конструкций, за номером строки 6.2.2.3 выделен «Каркас монолитный железобетонный». Расчетная продолжительность комплекса составляет 131 день, а принятая определяется временем потока: T_i — время потока; T — полезное производственное время (фонд рабочего времени); V — объем заказа (производственная программа)

Fig. 5. Determination of the rate of installation of structures, line number 6.2.2.3 is followed by “Monolithic reinforced concrete frame”. The estimated duration of the complex is 131 days, and the accepted duration is determined by the flow time: T_i is the flow time; T is the useful production time (working time fund); V is the order volume (production program)

нятой организации работ потребовалось 8 мин, монтаж балки сократился по продолжительности выполнения работ с 4 ч до 5 мин.

5. Этажный горизонт разбит на вертикальные и горизонтальные захватки.

Конструкции разбиты по высоте и в плане на захватки с максимальным разделением по видам работ, что необходимо для организации поточного производства. Проведено экспериментальное тактическое планирование времени [15]. Разработана визуализированная схема захваток⁴ [16].

Размер захватки принят таким, чтобы продолжительность выполнения отдельного вида работ на захватке равнялась одной смене. График разработан в программе Project. Выведена формула и определен темп потока монтажа конструкций (рис. 5).

На основании предварительного расчета темпа монтажа конструкций установлен ритм потока, по-

строен график поточной организации работ по устройству монолитного каркаса с заданным темпом потока 6 дней/этаж [17–19]. Принятое решение позволило достичь поставленной цели без нарушения технологических этапов производства работ и выполнить их в плановые установленные сроки (рис. 6).

6. Разработан ряд мероприятий, способствующих обеспечению качества производства работ:

- для снижения вероятности ошибки при разбивке составляется геодезическая схема координатных осей забивки дюбелей и разбивка горизонтов геодезистами;

- установка арматурных каркасов по шаблону с размещением маяков защитного слоя с целью обеспечения соответствия требованиям по несущей способности и качеству производства работ. Это предотвращает потери по исправлению допущенных ошибок и упрощает сборку конструкций, сокращаются дополнительные трудозатраты от одной смены до минимальных показателей, приравненных к 0 ч;

⁴ ГОСТ Р 56907–2016. Бережливое производство. Визуализация.

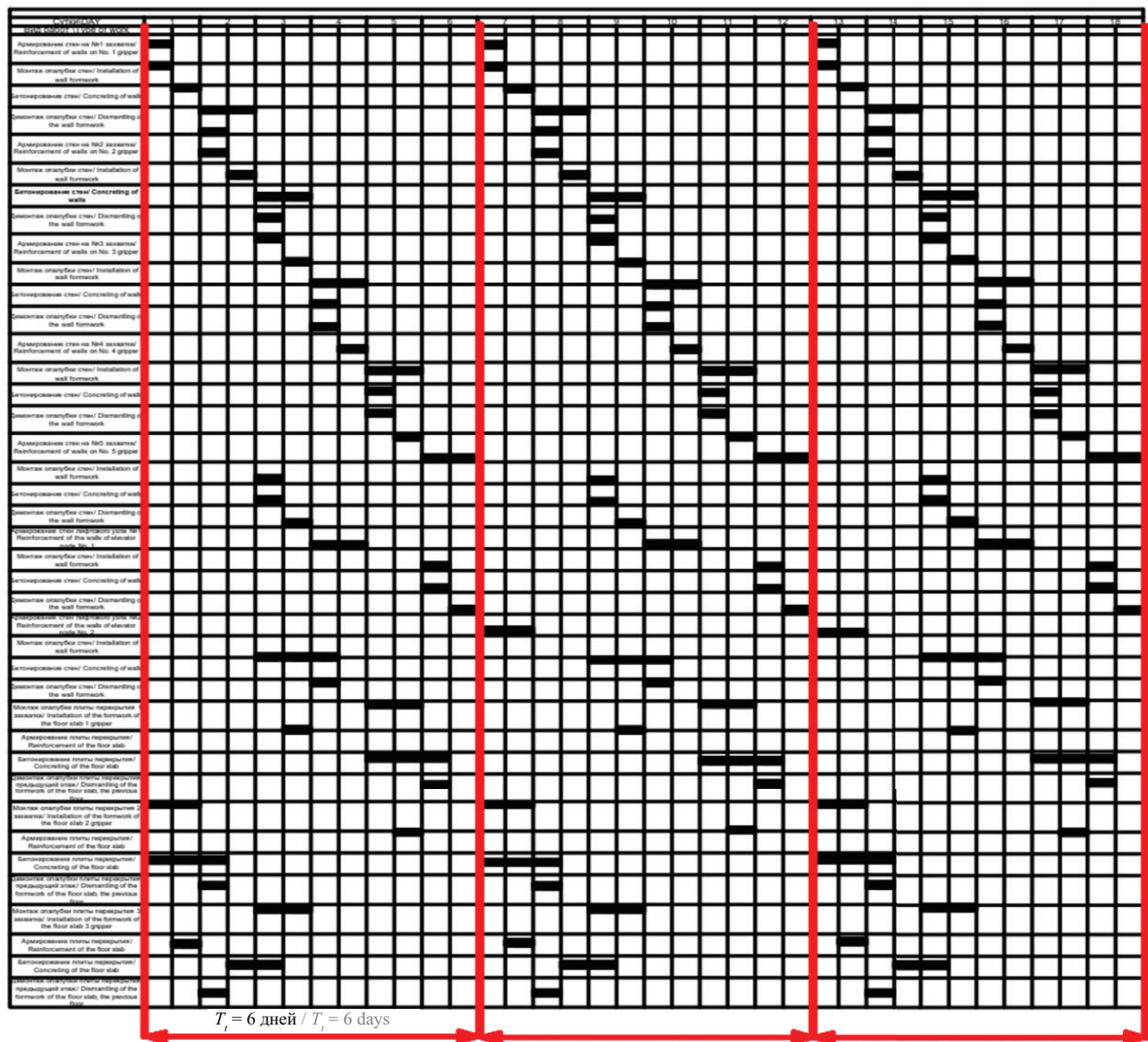


Рис. 6. Целевой график с темпом 6 дней на этаж

Fig. 6. Target schedule with a rate of 6 days per floor

- организация и поддержание порядка на рабочем месте, включая такие этапы, как сортировка, стандартизация, соблюдение порядка и чистоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен анализ эффективности СМР по возведению монолитного каркаса многоквартирного жилого дома.

Определены ресурсные потери при производстве работ, разработаны мероприятия по устранению этих потерь и повышению эффективности строительства. Формирование ежедневного задания, расчет потребности материалов позволили сократить потери материалов и простои.

Установлено влияние организации потока строительных работ на производительность [20, 21]. Выполнена разбивка календарного плана на более мелкие, отдельно взятые операции, что позволило: произвести максимальное совмещение с выбором наиболее эффективных комбинаций различных технологических этапов и сократить продолжительность строительства, не нарушая технологию строительства. Перенос производства работ с монтажных горизонтов в наземные условия, применение предварительной заготовки, шаблонов, укрупнительной сборки в наземных условиях также способствовали выполнению поставленной цели.

Произведена апробация разработанных мероприятий.

Разработка алгоритма организации проекта производства работ, направленного на сокращение сроков и стоимости работ, а также повышение качества продукции дали возможность принять ряд практических и технологических решений, которые в конечном итоге будут способствовать достижению поставленной цели — организации бережливого строительства [22].

В качестве приложения к договору подряда разработана технологическая карта на производство монолитных работ. Информация о технологических аспектах данной технологической карты была доведена до всего рабочего коллектива. Указанные в ней требования обязательны к исполнению и содержат полный перечень процессов и средств производства, а также график выполнения работ⁵ [23].

Выработанный стандарт технологической карты позволяет оптимизировать проведение работ и повысить их качество.

Результаты проделанной работы отображены на рис. 7 и в таблице.

Установление темпа потока способствовало уточнению и разработке календарного плана, обеспечивающего своевременное и эффективное производство работ [24].

⁵ Чередниченко Н.Д., Пугач Е.М., Ефимов В.В., Базанов В.Е. Проект производства работ на возведение многоэтажного жилого дома : учебно-методическое пособие // Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. М. : Издательство МИСИ – МГСУ, 2020.

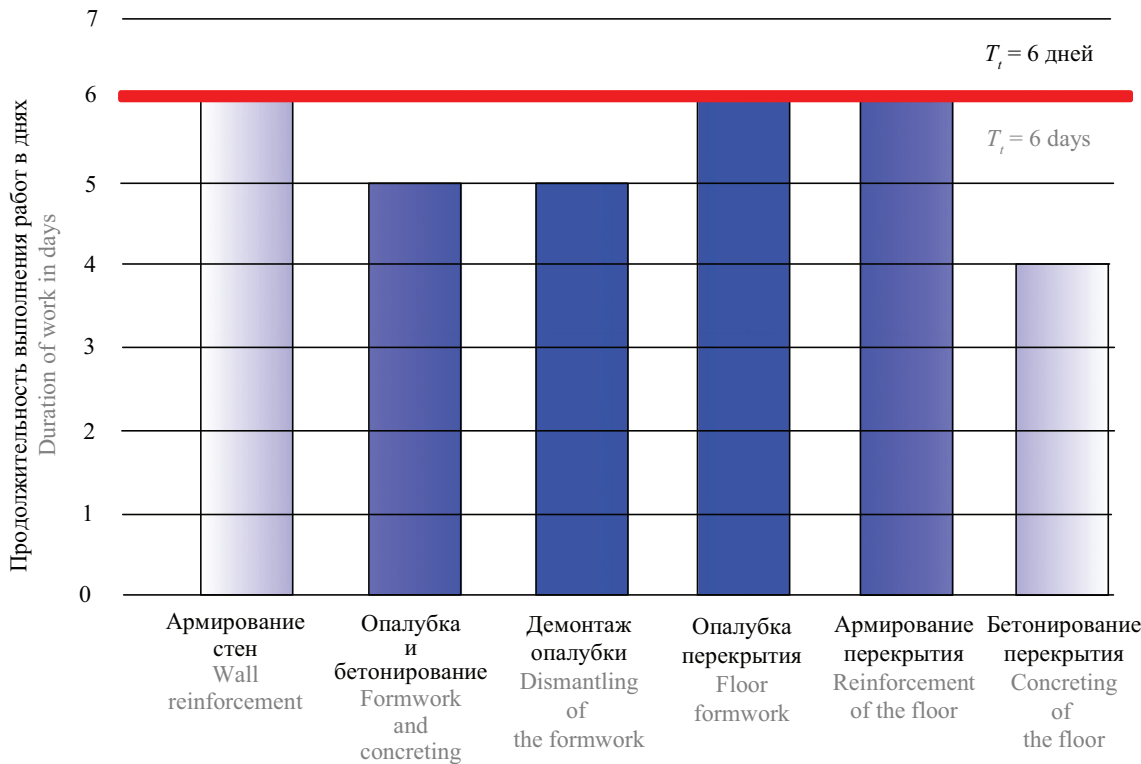


Рис. 7. Диаграмма сбалансированной работы над типовым этажом

Fig. 7. Diagram of balanced work on a typical floor

Результаты работы по возведению монолитного каркаса

The results of the work on the construction of a monolithic frame

Корпуса Building	Проведение тендера по плану / Conducting a tender for works according to the plan	Проведение тендера по факту / Conducting a tender for work on the fact	Отставание от графика тендеров, дни The backlog from the schedule of work according to tenders in days	Начало монолитных работ по плану The beginning of monolithic works according to the plan	Количество дней нормативного производства СМР по графику / The number of days of standard production of construction and installation works according to the schedule	Смещение графика начала работ, дни Offset of the work start schedule in days	Начало СМР по факту / The beginning of construction and installation works after the fact	Завершение СМР по факту / Completion of construction and installation works upon completion	Количество дней СМР по факту / The number of days of construction and installation work duration in fact	Сокращение продолжительности работ от применения данного решения в днях Reduction of the duration of work from the application of this solution in days
34	07.11.19	02.12.19	26	16.12.19	290	19	13.12.19	26.08.20	258	32
35						36	21.01.20	23.09.20	247	43
36						26	11.01.20	05.10.20	269	21
39	09.01.20	05.03.20	57	17.02.20	288	38	17.03.20	29.10.20	227	61

Пилотными корпусами были № 34–36, 39, поставленные задачи по организации и эффективному ведению работ на них были полностью выполнены.

Данная работа подтверждает, что бережливое производство подходит для всех отраслей. Оно направлено на создание более эффективных и устойчивых строительных проектов, которые отвечают потребностям клиентов и окружающей среды, а также сокращают затраты для всех участников.

Разработаны мероприятия по устранению потерь и повышению эффективности строительства путем внедрения инструментов бережливого производства.

Однако эта система имеет ряд затруднений, несмотря на обоснование необходимости применения, в первую очередь эти затруднения связаны с привычками и стереотипами, выработанными участниками строительства [25].

Научная новизна работы заключается в разработке, апробации и последующем внедрении мероприятий, которые позволили сократить продолжительность строительства, не нарушая его технологию; оперативно принимать решения по конкретной ситуации; вести полный контроль как расхода строительных материалов, так и возможных по-

терь, или не направленных на выполнение основных задач трудозатрат, с целью повышения технико-экономических показателей строительства. Принятые решения дали возможность контролировать как отдельные участки или направления, так и объект в целом, тем самым внедрив инструментарий бережливого производства.

В процессе работы над проектом разработаны и внедрены технологическая карта на производство монолитных работ при строительстве многоэтажного жилого дома и принятый ООО «Главстрой-СПб» «Стандарт выполнения монолитных и кладочных работ на объектах» ООО «Главстрой-СПб специализированный застройщик».

Предлагаемая система организации работ может иметь большой потенциал для применения в будущих исследованиях, несмотря на свою простоту. Этапы дальнейшего внедрения будут выстраиваться всецело на обосновании и разработке модели управления бережливым строительством и шагов по внедрению данной системы, а также определении зоны ответственности каждого участника, так как на сегодняшний день выбор методов управления строительством в большей мере зависит от опыта и профессионализма руководителя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вумек П.Д., Джонс Д.Т. Бережливое производство: как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. 12-е изд. М. : Приоритет, 2021. 478 с.

2. Womack J.P., Jones D.T. Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. Revised and Updated Hardcover. Free Press, 2003. 396 p.

3. *Taiichi O.* Производственная система Тойоты: уходя от массового производства. 3-е изд. М. : Институт комплексных стратегических исследований, 2008. 194 с.

4. *Taiichi Ohno.* Taiichi Ohnos Workplace Management: Special 100th Birthday Edition. McGraw Hill, 2012. 208 p.

5. *Киселев И.* У истоков Бережливого производства. 2011. URL: <https://tobetter.ru/lean/u-istokov-berezhlivogo-proizvodstva/>

6. *Arashpour M., Arashpour M.* Analysis of workflow variability and its impacts on productivity and performance in construction of multistorey buildings // *Journal of Management in Engineering*. 2015. Vol. 31. Issue 6. DOI: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000363

7. *Липидус А.А., Демидов Л.П.* Исследование факторов, влияющих на показатель потенциала строительной площадки // *Вестник МГСУ*. 2014. № 4. С. 160–166.

8. *Асаул М.А., Рыбнов Е.И.* Формирование интегрированных структур для реализации инвестиционно-строительных проектов // *Вестник гражданских инженеров*. 2008. № 3 (16). С. 97–101. EDN JVRZAR.

9. *Болотин С.А., Биче-оол Х.В., Бохан Х.А., Хурейни Н.К.Р.* Прикладные аспекты энтропийного показателя оценки актуального графика строительства // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 4 (93). С. 65–72. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-65-72. EDN XVUERA.

10. *Sacks R.* What constitutes good production flow in construction? // *Construction Management and Economics*. 2016. Vol. 34. Issue 9. Pp. 641–656. DOI: 10.1080/01446193.2016.1200733

11. *Липидус А.А.* Потенциал эффективности организационно-технологических решений строительного объекта // *Вестник МГСУ*. 2014. № 1. С. 175–180.

12. *Липидус А.А., Степанов А.Е.* Формирование организационно-технологических параметров эффективности возведения монолитных конструкций многоэтажных жилых зданий // *Наука и бизнес: пути развития*. 2019. № 2 (92). С. 128–131. EDN YYTCYX.

13. *Степанов А.Е.* Поточный метод организации работ при устройстве монолитных конструкций жилых зданий // *Наука и бизнес: пути развития*. 2019. № 5 (95). С. 172–173. EDN MJZYMZ.

14. *Liliana L.* A new model of Ishikawa diagram for quality assessment // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 161. P. 012099. DOI: 10.1088/1757-899X/161/1/012099

15. *Linnik M., Berghede K.* An experiment in takt time planning applied to non-repetitive work // 21st

Annual Conference of the International Group for Lean Construction. 2013.

16. *Болотин С.А., Аль-Жанаби М.А., Бохан Х.А.* Прогнозирование окончания строительства на основе моделирования нелинейной зависимости от задержек отдельных работ // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 2 (91). С. 83–90. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-83-90. EDN OGVLBZ.

17. *Болотин С.А., Бохан Х.А.* Нейтрализация задержек работ на основе анализа графиков строительства, сформированных методом неопределенных ресурсных коэффициентов // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 1 (90). С. 48–54. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-1-48-54. EDN QINEIU.

18. *Юдина А.Ф., Григорьев С.Ю., Величкин В.З.* Использование BIM-технологий для контроля качества проектов строительной инфраструктуры // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 2 (79). С. 132–137. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-132-137. EDN NLIPBT.

19. *Murguia D., Rathnayake A., Middleton C.* Master schedule optimisation with the use of flowlines and performance data // *Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 2023. Pp. 1463–1474. DOI: 10.24928/2023/0121

20. *Rathnayake A., Murguia D., Middleton C.* Analysing the impact of construction flow on productivity // *Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 2023. DOI: 10.24928/2023/0172

21. *Tommelein I.D., Singh V.V., Coelho R.V., Lehtovaara J.* So Many Flows! // *Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 2022. Pp. 878–889. DOI: 10.24928/2022/0199

22. *Муря В.А., Липидус А.А.* Влияние комплексного показателя качества организационно-технологических решений на конструктивные элементы многоэтажных железобетонных зданий // *Перспективы науки*. 2018. № 9 (108). С. 27–30. EDN YIZQSD.

23. *Петрова Т.М., Смирнова О.М.* Бетоны с повышенной ранней прочностью на основе портландцементов ПЦ500-Д0-Н и ЦЕМ 1 42,5Н // *Вестник гражданских инженеров*. 2011. № 4 (29). С. 91–96. EDN OPBYMD.

24. *Липидус А.А.* Формирование интегрального потенциала организационно-технологических решений посредством декомпозиции основных элементов строительного проекта // *Вестник МГСУ*. 2016. № 12. С. 114–123. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.114-123

25. *Белова Н.Е., Долгов А.А., Петров А.А., Токунова Г.Ф., Харитонович А.В.* Современные проблемы управления региональным инвестиционно-строительным комплексом. СПб. : СПбГАСУ, 2013. 144 с. EDN TXYNMX.

Поступила в редакцию 27 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 мая 2024 г.

Одобрена для публикации 26 июня 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Надежда Владимировна Розанцева** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры организации строительства; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; SPIN-код: 7138-7182, РИНЦ ID: 870835, Scopus: 57205443634, ORCID: 0009-0008-1341-4743; nrozanceva@lan.spbgasu.ru;

Владимир Викторович Золотарев — директор по производственной системе; **Главстрой-Регионы**; 119034, г. Москва, ул. Тверская, д. 6, стр. 2; zolotonn@mail.ru.

Вклад авторов:

Розанцева Н.В. — обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста.

Золотарев В.В. — сбор и предоставление материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vumek P.D., Jones D.T. *Lean manufacturing: How to get rid of losses and achieve prosperity for your company*. 12th ed. Moscow, Priority, 2021; 478. (rus.).
2. Womack J.P., Jones D.T. *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. Revised and Updated Hardcover*. Free Press, 2003; 396.
3. Taiichi O. *Toyota Production System. Moving away from mass production*. 3rd ed. Moscow, Institute of Integrated Strategic Studies, 2008; 194. (rus.).
4. Taiichi Ohno. *Taiichi Ohnos Workplace Management: Special 100th Birthday Edition*. McGraw Hill, 2012; 208.
5. Kiselyov I. *At the origins of Lean production*. 2011. URL: <https://tobetter.ru/lean/u-istokov-ber-ezhlivogo-proizvodstva/> (rus.).
6. Arashpour M., Arashpour M. Analysis of workflow variability and its impacts on productivity and performance in construction of multistory buildings. *Journal of Management in Engineering*. 2015; 31(6). DOI: 10.1061/(asce)jme.1943-5479.0000363
7. Lapidus A.A., Demidov L.P. Investigation of the Factors Influencing the Potential Indicator of a Construction Site. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 4:160-166. (rus.).
8. Rybnov E.I., Asaul M.A. Formation of integrated structures for the implementation of investment and construction projects. *Bulletin of Civil Engineers*. 2008; 3(16):97-101. EDN JVRZAR. (rus.).
9. Bolotin S.A., Biche-ool H.V., Bohan Kh.A., Huraini N.Q.R. Applied aspects of the entropy indicator of the current construction schedule assessment. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 4(93):65-72. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-4-65-72. EDN XVUERA. (rus.).
10. Sacks R. What constitutes good production flow in construction? *Construction Management and Economics*. 2016; 34(9):641-656. DOI: 10.1080/01446193.2016.1200733
11. Lapidus A.A. Efficiency Potential of Management and Technical Solutions for a Construction Object. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 1:175-180. (rus.).
12. Lapidus A.A., Stepanov A.E. Formation of organizational and technological parameters of efficiency in construction of cast-in-situ structures of high-rise residential buildings. *Science and Business: Ways of Development*. 2019; 2(92):128-131. EDN YYTCYX. (rus.).
13. Stepanov A.E. The line production method for in-situ construction of residential buildings. *Science and Business: Ways of Development*. 2019; 5(95):172-173. EDN MJZYM. (rus.).
14. Liliana L. A new model of Ishikawa diagram for quality assessment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016; 161:012099. DOI: 10.1088/1757-899X/161/1/012099
15. Linnik M., Berghede K. An experiment in takt time planning applied to non-repetitive work. *21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 2013
16. Bolotin S.A., Al-Janabi M.A., Bohan Kh.A. Forecasting of the construction completion based on the modeling of nonlinear dependence on delays of individual works. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 2(91):83-90. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-83-90. EDN OGVLBZ. (rus.).
17. Bolotin S.A., Bohan Kh.A. Neutralization of work delays based on the analysis of construction schedules formed by the method of undetermined resource coefficients. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 1(90):48-54. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-1-48-54. EDN QINEIU. (rus.).
18. Yudina A.F., Grigoryev S.Yu., Velichkin V.Z. Using of BIM technologies for quality control of construction infrastructure projects. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 2(79):132-137. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-132-137. EDN NLIPBT. (rus.).
19. Murguia D., Rathnayake A., Middleton C. Master schedule optimisation with the use of flowlines and performance data. *Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 2023; 1463-1474. DOI: 10.24928/2023/0121
20. Rathnayake A., Murguia D., Middleton C. Analysing the impact of construction flow on productivity. *Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 2023. DOI: 10.24928/2023/0172
21. Tommelein I.D., Singh V.V., Coelho R.V., Lehtovaara J. So Many Flows! *Annual Conference of the Inter-*

national Group for Lean Construction. 2022; 878-889. DOI: 10.24928/2022/0199

22. Murya V.A., Lapidus A.A. The influence of the integrated quality indicator of organizational and technological solutions on structural elements of multi-storey reinforced concrete buildings. *Science Prospects*. 2018; 9(108):27-30. EDN YIZQSD. (rus.).

23. Petrova T.M., Smirnova O.M. Concrete with increased early strength based on ordinary Portland cement PC 500-DO-N and CEM I 42,5N. *Bulletin of Civil Engineers*. 2011; 4(29):91-96. EDN OPBYMD. (rus.).

24. Lapidus A.A. Formation of an Integral Potential of Organizational and Technological Solutions through the Decomposition of the Main Elements of a Construction Project. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 12:114-123. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.114-123 (rus.).

25. Belova N.E., Dolgov A.A., Petrov A.A., Tokunova G.F., Kharitonovich A.V. *Modern problems of management of the regional investment and construction complex*. St. Petersburg, SPbGASU, 2013; 144. EDN TXYNMX. (rus.).

Received February 27, 2024.

Adopted in revised form on May 27, 2024.

Approved for publication on June 26, 2024.

B I O N O T E S: **Nadezhda V. Ryazantseva** — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer at the Department of Construction Organization; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 7138-7182, ID RSCI: 870835, Scopus: 57205443634, ORCID: 0009-0008-1341-4743; nrozanceva@lan.spbgasu.ru;

Vladimir V. Zolotarev — Director of Production Systems; **Glavstroy-Regions**; build. 2, 6 Tverskaya st., Moscow, 119034, Russian Federation; zolotonn@mail.ru.

Contribution of the authors:

Nadezhda V. Ryazantseva — material processing, article writing, scientific text editing.

Vladimir V. Zolotarev — collection of material and provision of material.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 658.513.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1687-1695

Методика расчета резервов времени при планировании продолжительности сооружения АЭС

Александр Сергеевич Павлов¹, Роман Вадимович Островский²

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

² Атомстройэкспорт (АСЭ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются вопросы возникновения в процессе строительства атомных электростанций рисков и проблемных ситуаций, а также методики реагирования и предотвращения таких сценариев. Анализируются имеющиеся аналоги разработанной системы среди известных информационных систем, осуществляющих расчеты календарно-сетевых моделей и построение прогнозов завершения строительства.

Материалы и методы. В частности, освещена методика создания системы резервирования времени при формировании и утверждении календарно-сетевых графиков производства строительно-монтажных работ. Приводится поэтапный план подготовки исходных данных, необходимого статистического анализа и непосредственного расчета резервов времени по методу Монте-Карло с использованием одноименного, разработанного в рамках текущего научного исследования, программного комплекса. В качестве исходных сведений применяется информация анализа срыва сроков уже завершённых работ на референтных АЭС, имеющих определённую классификацию, а также результаты проведения экспертного опроса о влиянии внутренних и внешних факторов на продолжительность сооружения станции.

Результаты. Показаны примеры использования разработки в рамках процесса управления сроками строительства АЭС «Эль-Дабаа» в Арабской Республике Египет. Указана возможность применения данной методики на различных уровнях управления проектом.

Выводы. Сформулировано обобщенное заключение о вопросе определения продолжительности строительства атомных электростанций с учетом формирования резервов времени для графиков производства работ, поэтапном плане расчета резервов времени и положительной апробации методики при сооружении АЭС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство АЭС, сроки строительства, календарно-сетевое планирование, критический путь, методика расчета резервов времени, метод Монте-Карло, Monte-Carlo Network, общий временной резерв

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Павлов А.С., Островский Р.В. Методика расчета резервов времени при планировании продолжительности сооружения АЭС // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 10. С. 1687–1695. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1687-1695

Автор, ответственный за переписку: Роман Вадимович Островский, rchkp@rambler.ru.

Methodology of calculation of time reserves when planning the duration of NPP construction

Alexander S. Pavlov¹, Roman V. Ostrovskii²

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

² Atomstroyexport (ASE); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The issues of risk and problem situations arising during the construction of nuclear power plants, as well as methods of response and prevention of such scenarios are considered. The available analogues of the developed system among the known information systems which carry out calculations of calendar-network models and construction completion forecasts are analyzed.

Materials and methods. In particular, the methodology of creating a system of time reservation during the formation and approval of calendar-network schedules of construction and installation works is highlighted. A step-by-step plan of initial data preparation, necessary statistical analysis and direct calculation of time reserves by Monte-Carlo method using the software package of the same name developed within the framework of the current research is presented. As the initial data, the information of the analysis of disruption of the deadlines of already completed works at reference NPP with a certain classification, as well as the results of an expert survey on the influence of internal and external factors on the duration of plant construction are used.

Results. Examples of using the development within the process of managing the construction schedule of El-Dabaa NPP in the Arab Republic of Egypt are described. The possibility of applying this methodology at different levels of project management is indicated.

Conclusions. A generalized conclusion on the issue of determining the duration of construction of nuclear power plants taking into account the formation of time reserves for work schedules, a step-by-step plan for calculating time reserves and positive approbation of the methodology for NPP construction is formulated.

KEYWORDS: NPP construction, construction time, schedule-network planning, critical path, time reserve calculation methodology, Monte-Carlo method, Monte-Carlo Network, total time reserve

FOR CITATION: Pavlov A.S., Ostrovskii R.V. Methodology of calculation of time reserves when planning the duration of NPP construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1687-1695. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1687-1695 (rus.).

Corresponding author: Roman V. Ostrovskii, rchkp@rambler.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство атомных электростанций (АЭС) — один из важнейших индикаторов развития электроэнергетики как в России, так и за рубежом. Объемы сооружаемых и введенных в эксплуатацию энергоблоков стабильно растут за счет новых реализуемых проектов, в особенности в азиатском и африканском регионах [1, 2]. Зачастую данные инвестиционно-строительные проекты характеризуются высокой сложностью и сопровождаются рядом рисков и проблемных вопросов, что предсказуемо приводит к увеличению стоимости строительства АЭС и увеличению декларируемых сроков сооружения объекта.

Длительность основного периода возведения энергоблока типовой атомной электростанции, сооружаемой по российским проектам, составляет около 65 мес (5,5 лет). Данная длительность утверждается в графике производства работ, который является приложением к подписываемому контракту на сооружение АЭС между заказчиком и генподрядчиком строительства [3].

Неисполнение обязательств по срокам сооружения влечет за собой значительные финансовые издержки на покрытие инфляционных расходов, страховых случаев, штрафных санкций и прочих потерь [4, 5].

Низкое качество выпускаемой проектной и рабочей документации, отсутствие четко выстроенных процедур контрактации и логистики материалов и оборудования, несвоевременная поставка, низкое качество инженерно-технического и непосредственно рабочего персонала, невысокое качество строительно-монтажных работ (СМР) и многие другие факторы становятся причинами возникновения срывов сроков работ.

На ранних этапах реализации подобных проектов в ряде случаев осуществляется риск-анализ и произвольное финансовое страхование рисков увеличения плановых длительностей сооружения. Тем не менее соблюдение заявленных изначально сроков выполнения работ чаще всего нарушается. При этом утвержденная изначально продолжительность строительства может увеличиться в 2–3 раза.

Согласно проводимому исследованию, альтернативным методом митигации подобных рисков может быть многократное имитационное модели-

рование [6, 7] процесса сооружения атомной электростанции по известному математическому принципу Монте-Карло на основе графика производства работ и создание системы резервирования времени в календарно-сетевых моделях сооружения АЭС [8–10].

Цель настоящего исследования — разработка и апробация механизма определения продолжительности строительства АЭС с учетом установленного научными методами временного резерва.

В качестве аналогов, решающих схожие задачи по расчету календарно-сетевых моделей и построению прогнозов завершения строительства, можно привести следующие: Primavera P6, MS Project, MS Excel, Spider Project, Oracle Crystal Ball [11–13]. Эти программные комплексы позволяют обеспечивать разработку планов, распределение ресурсов по задачам, отслеживание прогресса и анализ объемов работ, генерировать расписания критического пути.

Также в их функционал могут входить возможности по составлению ряда различных форм проектной отчетности, бизнес-аналитики, идентификации и оценке рисков.

В некоторых из них присутствует вероятность детерминированного определения частных резервов отдельно взятых работ, которая строится на анализе последовательности работ и их обеспеченности ресурсами.

Однако в них отсутствует перспектива расчета резервов на основе многократного прохождения сценария (графика) строительства АЭС с учетом статистической вариабельности каждой работы в графике. А также невыполнимы визуальное построение графика распределения всевозможных длительностей проекта и оценка страховки проекта от неблагоприятных исходов со срывами сроков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод временного резервирования предполагает, что между работами имеется запас времени и срывы сроков по отдельным работам не вызывают срыва срока сооружения объекта в целом. Временной резерв принимается исходя из среднего коэффициента увеличения продолжительности работ.

В рамках исследования совместно с научным руководителем был разработан и запатентован программный комплекс Monte-Carlo Network [14] (да-

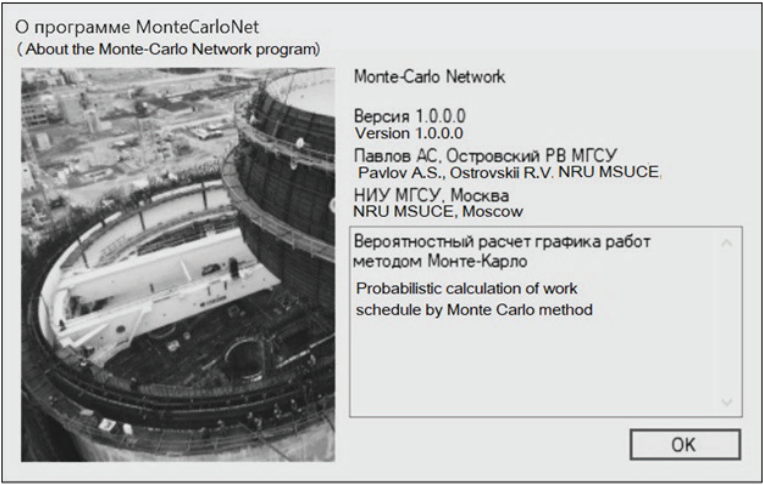


Рис. 1. Программный комплекс Monte-Carlo Network

Fig. 1. Monte-Carlo Network software package

лее — ПК), предназначенный для моделирования стохастических (т.е. случайных) строительных процессов с применением метода Монте-Карло (рис. 1).

Программа многократно генерирует набор сценариев, или псевдослучайных значений продолжительности отдельных процессов, и рассчитывает общую продолжительность строительства заданного комплекса. При этом может моделироваться нормальное или логнормальное распределение вероятности выполнения отдельных работ. Полученные значения можно получить в виде гистограммы, на которой наглядно отражается распределение возможных длительностей проекта в зависимости от количества сценариев выборки, настроенной изначально.

Предусмотрен ввод сведений в виде последовательности строительных процессов (т.е. графика производства работ) с указанием относительного уровня волатильности каждого из них.

Этап 1

На первом этапе производится сбор и подготовка исходных данных для проведения расчета. За основу принимается график производства ра-

бот с указанием наименований работ, сроков старта и финиша, информации о последовательности их производства в формате последователей и предшественников.

Отдельным образом составляется статистика срыва работ, присутствующих в графике [15]. Для этого осуществляется анализ аналогичных работ на уже введенных в эксплуатацию атомных станциях. Работы разделяются на типовые категории с присвоением каждому типу уникальных показателей волатильности (вероятность превышения фактической длительности относительно плановой и средняя относительная величина задержки). Ввод данных в программу предусмотрен в формате графика строительных процессов с указанием относительного уровня волатильности каждого из них (табл. 1). График формируется в виде критического пути, т.е. последовательности, определяющей минимальную продолжительность проекта и обеспечивающей его завершение [16, 17].

Заключительным действием на данном этапе являются идентификация и анализ факторов, имеющих максимальное влияние на строительные процессы. Данные показатели могут быть установлены

Табл. 1. График производства работ

Table 1. Work schedule

Номер работы Work	Номер предшественника Predecessor	Наименование работы Name of work	Длительность, дни Duration, days	Относительные Relative	
				Математическое ожидание Math expectation	Вариатбельность Variability
1	0	Фундаментная плита на 19,300. Геометрические размеры Foundation slab at 19.300. Geometric dimensions	64,00	1,24	0,37
2	1	Стены с 19,300 до 15,700. Армирование Walls from 19.300 to 15.700. Reinforcement	53,00	1,11	0,30
3	2	Стены с 19,300 до 15,700. Геометрические размеры Walls from 19.300 to 15.700. Geometric dimensions	48,00	1,24	0,37

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Номер работы Work	Номер предшественника Predecessor	Наименование работы Name of work	Длительность, дни Duration, days	Относительные Relative	
				Математическое ожидание Math expectation	Вариатбельность Variability
4	3	Заполнение пустот бетоном (пазух, образованных стенами кольцевого коридора) от отм. 22,400 до отм. 15,700 Filling voids with concrete (slots formed by the walls of the ring corridor) from 22.400 to 15.700	38,00	1,24	0,37
5	3,8	Плита перекрытия 15,100. Армирование Floor slab at 15.100. Reinforcement	29,00	1,11	0,30
6	5	Плита перекрытия 15,100. Геометрические размеры Floor slab on 15.100. Geometric dimensions	29,00	1,24	0,37
7	1	Лестницы с 19,300 до 15,100. Армирование Stairs from 19.300 to 15.100. Reinforcement	29,00	1,11	0,30
8	7,18	Лестницы с 19,300 до 15,100. Геометрические размеры Stairs from 19.300 to 15.100. Geometric dimensions	24,00	1,24	0,37
9	3	Гидроизоляция по стенам здания до отм. 0,000 Waterproofing on the walls of the building up to the level 0.000	356,00	1,06	0,28
10	6,15,32	Стены с 15,100 до 11,750. Армирование Walls from 15.100 to 11.750. Reinforcement	53,00	1,11	0,30
11	10	Стены с 15,100 до 11,750. Геометрические размеры Walls from 15.100 to 11.750. Geometric dimensions	48,00	1,24	0,37

на основе реестра рисков инжиниринговой организации [18, 19] и должны быть разделены на внешние и внутренние, исходя из характера источника возникновения факторов по отношению к генподрядчику. Полученный перечень проходит экспертную оценку по каждому пункту с присвоением веса значимости фактора [20, 21]. После получения от экспертов результатов оценки первоочередная задача — определение согласованности оценок путем вычисления коэффициента вариации, расчет согласованности мнений экспертов и установление уточ-

ненной средней оценки для внутренних и внешних факторов.

Возможно использование вычисленных уточненных средних оценок внутренних и внешних факторов в качестве среднего отклонения и среднего изменения соответственно при оценке резервов графиков производства работ по методу Монте-Карло и занесении исходных данных в одноименную программу (рис. 2).

Этап 2

На следующем этапе при загрузке исходных сведений в ПК задается количество циклов «пробе-

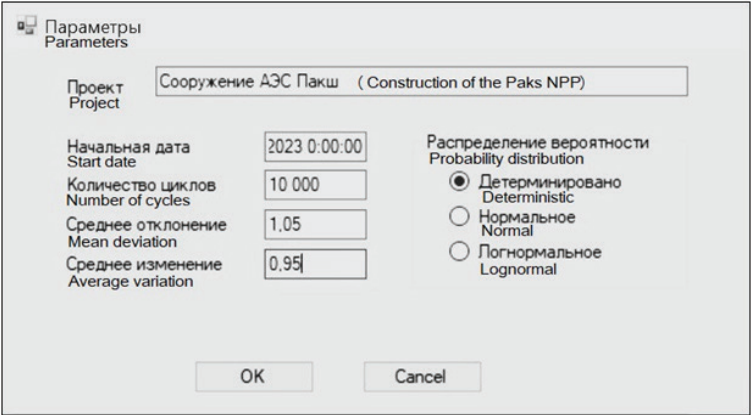


Рис. 2. Внесение исходных данных для расчета резерва времени

Fig. 2. Entering initial data for calculating the time reserve

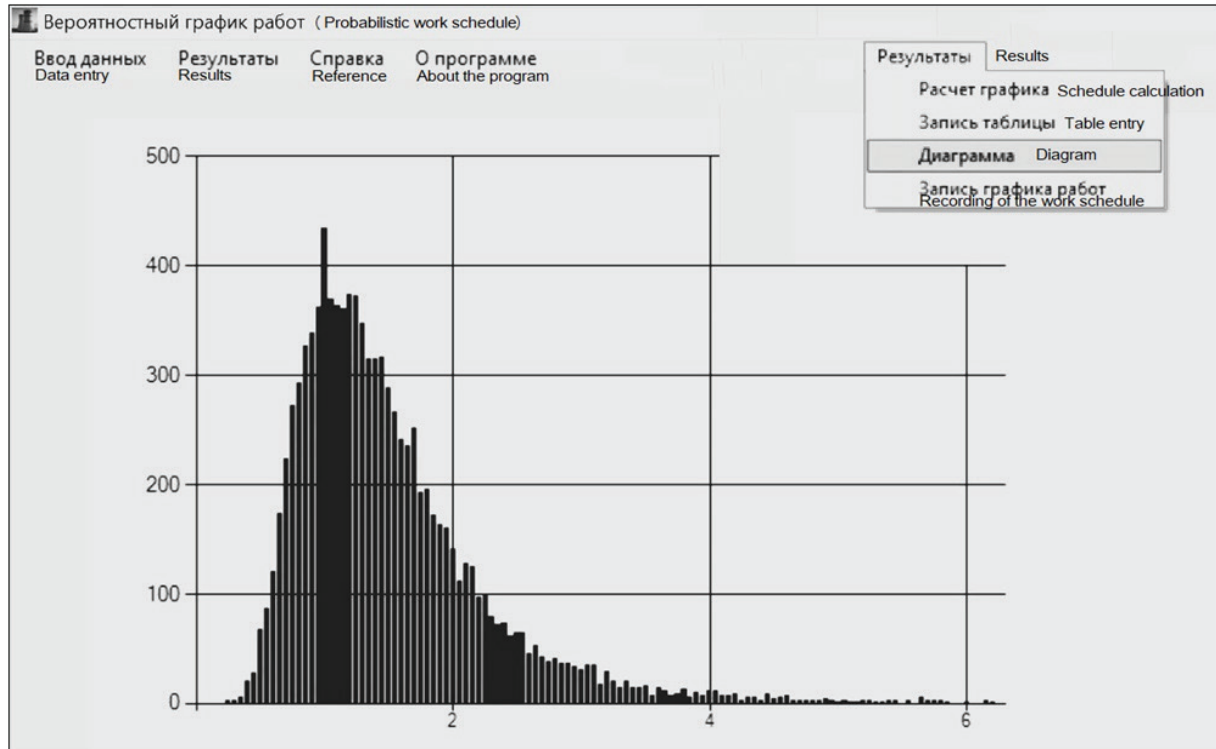


Рис. 3. Диаграмма распределения длительностей проекта сооружения АЭС в графическом виде

Fig. 3. Diagram of distribution of NPP construction project durations in graphical form

гания» сценария строительства (графика) и производится построение распределения относительной длительности проекта в графическом (рис. 3) и табличном представлениях.

В первом случае распределение вероятности можно привести в детерминированном, нормальном и логнормальном вариантах. При этом ось абсцисс на сформированной диаграмме отражает во сколько раз изменяется общая длительность загруженного в программу графика производства работ, ось орди-

нат — количество сценариев, соответствующих отдельно взятому изменению.

Построение распределения в табличном виде используется на следующем этапе (табл. 2).

Этап 3

Устанавливается коэффициент надежности расчета резерва времени P , удовлетворяющий генподрядчика в текущих условиях, и плановая длительность N всего графика строительства АЭС, директивно утвержденного между заказчиком и генподрядчиком.

Определяется величина превышения срока проекта X из табличного распределения для количества циклов с неблагоприятным исходом $(1 - P)$.

Рассчитывается необходимый общий резерв времени по формуле:

$$(X - 1) N.$$

Далее рассчитанный общий резерв времени распределяется между субподрядными организациями (далее — субподрядчики) (рис. 4). Пропорцию распределения между ними можно установить, осуществив аналогичный поэтапный расчет резервов времени для локальных графиков субподрядчиков.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, при помощи разработанного ПК, основанного на математическом принципе Монте-Карло с использованием референтных статистических данных, можно установить оперативный

Табл. 2. Таблица распределения длительностей проекта сооружения АЭС в графическом виде

Table 2. Table of distribution of NPP construction project durations in graphical form

Распределение относительной длительности проекта Distribution of relative project duration		
От From	До To	Количество случаев Number of cases
0,05	0,1	0
0,1	0,15	0
0,15	0,2	0
0,2	0,25	1
0,25	0,3	2
0,3	0,35	2
0,35	0,4	3
0,4	0,45	10
0,45	0,5	14
0,5	0,55	32

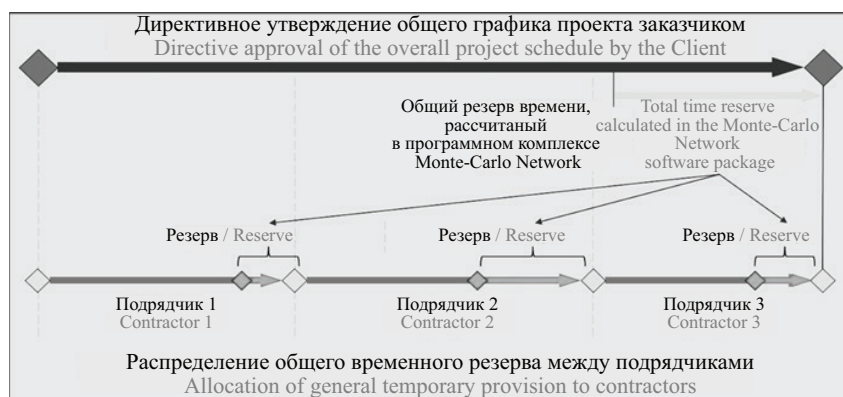


Рис. 4. Схема формирования резервов времени в графиках производства работ

Fig. 4. Scheme of formation of time reserves in work schedules

временной резерв генподрядчика для управления проектом сооружения АЭС.

Аналогичным образом возможен расчет резервов времени при разработке календарно-сетевых моделей на различных уровнях управления проектом, как в связке заказчик – генподрядчик, так и во взаимоотношениях генподрядчика с субподрядчиками. В зависимости от способа формирования графиков и определения продолжительности строительства (директивное назначение сроков или расчет процессов в соответствии с нормативными технологическими требованиями) расчетный резерв времени может либо прибавляться, либо вычитаться из директивно установленных сроков.

Подобная методика была успешно испытана специалистами по календарно-сетевому планированию управления мониторинга и контроля сроков АО «Атомстройэкспорт» на нескольких графиках СМР, выполняемых на АЭС «Эль-Дабба». В частности, на графиках достижения ключевых событий «Монтаж устройства локализации расплава активной зоны Блока 1» и «Завершение бетонирования внутренней защитной оболочки здания реактора Блока 2 от отм. –7,250 до отм. +7,150». Вычисленный резерв времени будет использован при разра-

ботке и согласовании графиков производства СМР субподрядными организациями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной научной работе структурно рассмотрен вопрос определения продолжительности строительства атомных электростанций с учетом формирования резервов времени для графиков производства работ, с использованием статистических данных о степени волатильности разных типов работ и оценочных характеристик факторов, влияющих на ход сооружения АЭС.

Представлен поэтапный план расчета резервов времени при помощи ПК Monte-Carlo Network, разработанного и запатентованного в рамках проводимого исследования. В качестве результатов расчета данной программы приведены примеры распределения длительностей проекта сооружения АЭС в графическом и табличном видах.

Опытная эксплуатация описанной методики показала положительный результат при использовании ее для расчета временных резервов графиков сооружения АЭС в Египте. Значительный интерес представляет ее повсеместное внедрение в процедуры календарно-сетевого планирования на проектах сооружения объектов атомной энергетики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Филимонова Т.П. Продвижение российской атомной энергетики на глобальный рынок: тенденции и новые возможности // Актуальные вопросы современной экономики. 2023. № 5. С. 559–568. DOI: 10.34755/IROK.2023.66.16.033. EDN ASGYUN.
2. Томашевская Е.С., Семенов Е.В. Зарубежный портфель проектов Госкорпорации «Росатом» // Синергия Наук. 2020. № 54. С. 488–506. EDN DGJRTE.
3. Островский Р.В. Сравнение длительностей сооружения АЭС по российским и зарубежным проектам // Научно-техническое развитие России

и мира : сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 60–69.

4. Соловьева А.П., Харитонов В.В., Шмаков О.Г. Влияние задержек в строительстве АЭС на эффективность инвестиций // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2018. № 3. С. 52–62. DOI: 10.26583/npe.2018.3.05. EDN YYCGKT.

5. Сааков Э.С. Инжиниринг при вводе в эксплуатацию новых энергоблоков АЭС // АТОМЕКС-Северо-Запад : форум поставщиков атомной отрасли. АТОМЭКСПО 2012. 2012.

6. Назарова В.В., Морозова Е.В. Сценарный анализ рисков проекта строительства жилой недвижимости // Вестник НГУЭУ. 2014. № 2. С. 71–83. EDN SMFQGR.

7. Алексеева Н.С. Метод имитационного моделирования Монте-Карло при инвестировании в проекты «зеленого» строительства // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2020. Т. 10. № 1. С. 241–252. EDN KNOOBS.

8. Адамюк И.А. Оценка риска (экономической привлекательности) инвестиционного проекта, на примере строительства жилых домов, методом Монте-Карло // Экономика и управление в XXI веке: тенденции развития. 2011. № 3. С. 150–156. EDN RKZHAP.

9. Никоноров С.В., Мельник А.А. Повышение организационно-технологической надежности строительства в современных условиях // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. Т. 19. № 3. С. 19–23. DOI: 10.14529/build190303. EDN JQRUNE.

10. Кучумова Ю.В., Букалова А.Ю. Постановка задачи исследования оценки организационно-технологических рисков в строительстве // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2019. Т. 1. С. 160–165. EDN WJTPBE.

11. Гридус А.Ю., Боков И.И., Иванчук Е.В. Анализ программ для календарного планирования в строительстве // Академическая публицистика. 2017. № 10. С. 15–22. EDN ZSGMXP.

12. Шипулина А.С., Мозгова Я.Г. Обзор и анализ возможностей использования программ по управлению проектами для автоматизации календарного планирования в строительстве // Ползуновский альманах. 2020. № 2–1. С. 186–189. EDN RWTUWQ.

13. Малых Е.Б. Мировой опыт управления рисками инвестиционных проектов в области строительства многоквартирных домов по методу Монте-Карло с использованием приложения для Microsoft Excel Oracle Crystal Ball // Экономика и управление. 2018. № 11 (157). С. 92–97. EDN VVPDMF.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681527 РФ. Се-

тевая модель строительства с применением метода Монте-Карло «Monte Carlo Network» / Павлов А.С., Островский Р.В.; патентообл. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; заявл. № 2022680826 от 03.11.2022, опублик. 15.11.2022. EDN CJHJBQ.

15. Павлов А.С., Островский Р.В. Анализ сроков выполнения работ при сооружении атомных электростанций // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 1. С. 75–80. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.01.75-80. EDN TZYWUH.

16. Бондаренко Ю.В., Васильчикова Е.В. Математические методы поддержки сетевого анализа проекта и оценки риска планирования при нечеткой информации о продолжительностях работ // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2023. № 2. С. 100–111. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2023/2/100-111. EDN ULOXXK.

17. Kalugin Yu.B. Universal method for calculation of reliable completion times // Magazine of Civil Engineering. 2016. No. 7 (67). Pp. 70–80. DOI: 10.5862/MCE.67.7. EDN YFWGLB.

18. Ostrovskii R. Development of a Model for Managing the Terms of NPP Construction Projects Based on Production Control // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 231. Pp. 405–413. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_42. EDN BKBVPB.

19. Voronkov I., Ostrovskii R. Structure of realised risks of projects for construction nuclear power plant by Rosatom State Corporation in 2010-2020 // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 258. P. 09081. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809081

20. Демидов Л.П. Исследования по применению метода экспертных оценок при анализе потенциала строительной площадки // Технология и организация строительного производства. 2014. № 1. С. 51–53. EDN SASIRN.

21. Кузьмин К.А., Грыжов Е.В. Приложение метода экспертных оценок при обработке анкет эффективности ведения строительно-монтажных работ // Естественные и математические науки в современном мире. 2014. № 16. С. 73–79. EDN RWVQXP.

Поступила в редакцию 20 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 мая 2024 г.

Одобрена для публикации 30 июня 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Александр Сергеевич Павлов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5456-5717, РИНЦ ID: 79850, Scopus: 57212719485, ResearcherID: AAN-4585-2021, ORCID: 0000-0001-6638-5554; building2020@inbox.ru;

Роман Вадимович Островский — главный специалист управления мониторинга и контроля сроков; **Атомстройэкспорт (АСЭ)**; 127434, г. Москва, Дмитровское ш., д. 2; SPIN-код: 3023-6358, РИНЦ ID: 920855, Scopus: 57221052924, ORCID: 0000-0001-7886-4659; rchkp@rambler.ru.

Вклад авторов:

Павлов А.С. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Островский Р.В. — написание исходного текста, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Filimonova T.P. Promotion of Russian nuclear energy to the global market: trends and new opportunities. *Actual Issues of the Modern Economy*. 2023; 5:559-568. DOI: 10.34755/IROK.2023.66.16.033. EDN ASGYUN. (rus.).
2. Tomashevskaya E.S., Semenov E.V. Foreign portfolio of projects of Rosatom state corporation. *Synergy of Sciences*. 2020; 54:488-506. EDN DGJRTE. (rus.).
3. Ostrovskiy R.V. Comparison of NPP construction durations by Russian and foreign projects. *Scientific and Technical Development of Russia and the World : collection of articles of XV International Scientific and Practical Conference*. 2023; 60-69. (rus.).
4. Soloveva A.P., Kharitonov V.V., Shmakov O.G. Effect of delays in NPP construction on investment efficiency. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018; 3:52-62. DOI: 10.26583/npe.208.3.05. EDN YYCGKT. (rus.).
5. Saakov E.S. Engineering at commissioning of new NPP power units. *ATOMEX-North-West: Forum of Nuclear Industry Suppliers*. ATOMEXPO 2012. 2012. (rus.).
6. Nazarova V.V., Morozova E.V. Scenario analysis of risks of residential property construction project. *Vestnik NSUEM*. 2014; 2:71-83. EDN SMFQGR. (rus.).
7. Alekseeva N.S. The Monte Carlo method for investing in green building projects. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Economics, Sociology and Management*. 2020; 10(1):241-252. EDN KNOOBS. (rus.).
8. Adamyuk I.A. Risk assessment (economic attractiveness) of the investment project, by the example of residential building construction, by Monte Carlo method. *Economics and Management in the XXI century: development trends*. 2011; 3:150-156. EDN RKZHAP. (rus.).
9. Nikonorov S.V., Melnik A.A. Improvement of organizational and technological reliability of construction in modern conditions. *Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2019; 19(3):19-23. DOI: 10.14529/build190303. EDN JQRUNE. (rus.).
10. Kuchumova Y.V., Bukalova A.Y. Formulation of the research task of assessing organizational and technological risks in construction. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2019; 1:160-165. EDN WJTPBE.
11. Gridus A.Yu., Bokov I.I., Ivanchuk E.V. Analysis of the programs for calendar planning in construction. *Academic Publishing*. 2017; 10:15-22. EDN ZSGMXP. (rus.).
12. Shipulina A.S., Mozgova Ya.G. Review and analysis of the possibilities of using the project management programs for the automation of calendar planning in construction. *Polzunov Almanac*. 2020; 2-1:186-189. EDN RWTUWQ. (rus.).
13. Malykh E.B. International experience in the risk management of investment projects in the field of multi-family housing using the Monte Carlo method and the Oracle Crystal Ball application for Microsoft Excel. *Economics and Management*. 2018; 11(157):92-97. EDN VVPDMF.
14. Certificate of state registration of computer program No. 2022681527 RF. *Network model of construction using the Monte Carlo method "Monte Carlo Network"* / Pavlov A.S., Ostrovsky R.V.; patent pending National Research Moscow State University of Civil Engineering; appl. No. 2022680826 dated 03.11.2022, publ. 15.11.2022. EDN CJHJBQ.
15. Pavlov A.S., Ostrovskii R.V. Analysis of terms of work performance during nuclear power plant construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 1:75-80. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.01.75-80. EDN TZYWUH. (rus.).
16. Bondarenko Yu.V., Vasilchikova E.V. Mathematical methods of supporting network analysis of the project and assessment of planning risk in case of fuzzy information on work duration. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2023; 2:100-111. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2023/2/100-111. EDN ULOXXK. (rus.).
17. Kalugin Yu.B. Universal method for calculation of reliable completion times. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 7(67):70-80. DOI: 10.5862/MCE.67.7. EDN YFWGLB.
18. Ostrovskii R. Development of a Model for Managing the Terms of NPP Construction Projects Based on Production Control. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 231:405-413. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_42. EDN BKBVPB.
19. Voronkov I., Ostrovskii R. Structure of realised risks of projects for construction nuclear power plant by Rosatom State Corporation in 2010-2020. *E3S Web of Conferences*. 2021; 258:09081. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809081

20. Demidov L.P. Research on the application of expert assessments when analyzing potential of construction site. *Technology and Organization of Construction Production*. 2014; 1:51-53. EDN SASIRN. (rus.).

21. Kuzmin K.A., Gryzhov E.V. Applying the method of expert estimations in processing questionnaires of building and construction works effectiveness. *Natural and Mathematical Sciences in the Modern World*. 2014; 16:73-79. EDN RWVQXP. (rus.).

Received May 20, 2024.

Adopted in revised form on May 27, 2024.

Approved for publication on June 30, 2024.

B I O N O T E S: **Alexander S. Pavlov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Power Facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5456-5717, ID RSCI: 79850, Scopus: 57212719485, ResearcherID: AAH-4585-2021, ORCID: 0000-0001-6638-5554; building2020@inbox.ru;

Roman V. Ostrovskii — Chief Specialist of the Department of Monitoring and Control of Deadlines; **Atomstroyexport (ASE)**; 2 Dmitrovskoe shosse, Moscow, 127434, Russian Federation; SPIN-code: 3023-6358, ID RSCI: 920855, Scopus: 57221052924, ORCID: 0000-0001-7886-4659; rchkp@rambler.ru.

Contribution of the authors:

Alexander S. Pavlov — scientific guidance, research concept, methodological development, scientific editing of the text, final conclusions.

Roman V. Ostrovskii — writing the source text, revising the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Обзор опыта возведения АЭС с применением модульных конструкций с внешним листовым армированием

Дмитрий Николаевич Коротких^{1,2}, Олег Александрович Корнев²,
Вячеслав Васильевич Белов², Александр Сергеевич Силантьев²,
Дмитрий Егорович Капустин²

¹ Институт «Оргэнергострой» (ОЭС); г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Для повышения конкурентоспособности отечественных проектов АЭС требуется сократить сроки строительства до 36 месяцев. Одним из способов решения данной задачи является индустриализация процесса строительства, при котором используются сборные элементы в виде объемных блоков с облицовкой из листовой стали. Выполнен обзор открытых источников информации об опыте возведения атомных станций с применением модульных железобетонных конструкций (ЖБК) с внешним листовым армированием. Рассмотрены проекты: AP-1000 компании Westinghouse (США) и CAP-1000 (SNERDI).

Материалы и методы. На основе анализа, обобщения и систематизации информации, полученной из открытых источников, рассмотрен практический опыт применения конструкций с внешним листовым армированием при возведении АЭС (по проектам AP-1000 и CAP-1000) на следующих объектах: Sanmen, Haiyang, Xudabao и Lianjiang (Китай), V.C. Summer и Vogle (США).

Результаты. Ключевым методом возведения при реализации проектов АЭС с использованием модульных ЖБК с внешним листовым армированием стал монтаж сверхкрупными блоками по технологии open-top. Использование такой технологии предъявляет повышенные требования к проектной документации, изготовление блок-модулей требует жесткого контроля логистических рисков. Отсутствие методов контроля качества уплотнения монолитного бетона, укладываемого в конструкцию, повышает требования к качеству бетонных смесей и технологии их укладки.

Выводы. В целом технология модульного строительства с помощью ЖБК с внешним листовым армированием позволяет значительно снизить трудозатраты по возведению сооружений непосредственно на строительной площадке. По результатам анализа опыта реализации проектных решений AP-1000 и CAP-1000 установлено, что при осуществлении данной технологии возникают дополнительные логистические риски и риски обеспечения качества укладки монолитного бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: крупноблочный монтаж, конструкции с внешним листовым армированием, атомные станции, проект AP-1000, проект CAP-1000, модульные конструкции атомных станций, изготовление и укрупнение блоков конструкций, проект APR-1400, опыт возведения специальных конструкций АЭС

Благодарности. Данная работа реализована в рамках программы развития передовой инженерно-строительной школы НИУ МГСУ.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коротких Д.Н., Корнев О.А., Белов В.В., Силантьев А.С., Капустин Д.Е. Обзор опыта возведения АЭС с применением модульных конструкций с внешним листовым армированием // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 10. С. 1696–1712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1696-1712

Автор, ответственный за переписку: Олег Александрович Корнев, morozovaanna499@gmail.com, i@okornev.ru.

Review of experience in the construction of NPP using modular structures with external sheet reinforcement

Dmitrii N. Korotkikh^{1,2}, Oleg A. Kornev², Vyacheslav V. Belov²,
Alexander S. Silantiev², Dmitrii E. Kapustin²

¹ Orgenergostroy Institute (OES); Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. To increase the competitiveness of domestic NPP projects, it is necessary to reduce the construction time to 36 months. One of the ways to solve this problem is industrialization of the construction process, which uses prefabricated

elements in the form of volumetric units with sheet steel cladding. The paper reviews open sources of information on the experience of erecting nuclear power plants using modular reinforced concrete structures with external sheet reinforcement. The following projects were considered: AR-1000 by Westinghouse (USA) and ATS-1000 (SNERDI).

Materials and methods. On the basis of analysis, generalization and systematization of information obtained from open sources, the authors reviewed the practical experience of application of structures with external sheet reinforcement in the construction of NPP (under the AP-1000 and CAP-1000 projects) at the following facilities: Sanmen, Haiyang, Xudabao and Lianjiang (China), V.C. Summer and Vogle (USA).

Results. The main method of erection in the implementation of NPP projects using modular reinforced concrete structures with external sheet reinforcement was the erection of extra-large units using the open-top technology. The use of such technology imposes higher requirements to the design documentation, manufacturing of unit modules requires strict control of logistic risks. Lack of quality control methods for compaction of monolithic concrete placed in the structure increases the requirements to the quality of concrete mixtures and technology of their placement.

Conclusions. In general, the technology of modular construction using reinforced concrete structures with external sheet reinforcement allows to significantly reduce labor costs of erecting structures directly on the construction site. However, based on the results of analyzing the experience of implementation of AR-1000 and SAR-1000 design solutions, it was found that additional logistical risks and risks of ensuring the quality of monolithic concrete placement arise when implementing this technology.

KEYWORDS: large unit assembly, structures with external sheet reinforcement, nuclear power plants, AP-1000 project, CAP-1000 project, modular structures of nuclear power plants, fabrication and consolidation of structural units, APR-1400 project, experience in erection of special NPP structures

Acknowledgments. This work was implemented within the framework of the development programme of the advanced engineering and construction school of the National Research University Moscow State University of Civil Engineering.

FOR CITATION: Korotkikh D.N., Kornev O.A., Belov V.V., Silantiev A.S., Kapustin D.E. Review of experience in the construction of NPP using modular structures with external sheet reinforcement. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1696-1712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1696-1712 (rus.).

Corresponding author: Oleg A. Kornev, morozovaanna499@gmail.com, i@okornev.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В среднем на строительство одного головного блока АЭС по текущим проектам уходит около 7, а в некоторых случаях до 11–12 лет [1]. «Увеличение сроков строительства приводит к снижению внутренней нормы доходности проекта до низких значений 4–7 %/год. При довольно низкой ставке дисконтирования (4–5 %/год) проект становится убыточным при сроках сооружения (T_c) более 10 лет» [2], а «период окупаемости удваивается за каждые два года просрочки ввода в промышленную эксплуатацию энергоблока АЭС, превышая 30 лет уже при $T_c \geq 9$ лет» [2]. «По данным ВНИИАЭС, дисконтированный период окупаемости проекта АЭС при сроке строительства 80 мес составляет 43,2 года в случае бюджетного финансирования» [3], что несомненно отражается на будущей себестоимости получаемой на АЭС электроэнергии.

Поэтому поиск и внедрение эффективных строительных технологий, проверенных практическим опытом, позволяющих сократить сроки сооружения станций и, как следствие, повысить доходность и конкурентоспособность отечественных АЭС, является приоритетной задачей. В свою очередь, это может быть достигнуто за счет общей индустриализации проектов [3–5], среди которых следует выделить [3]: «замену традиционного стержневого армирования железобетонных конструкций на внешнее, листовое с использованием стального листа и в качестве несъемной опалубки; широкое использование блочно-го монтажа строительных конструкций; комплексно-блочное изготовление и монтаж оборудования;

использование совмещенного монтажа», причем, как показывает практика, первое создает предпосылки к обеспечению в той или иной степени остального из перечисленного¹.

Для включения индустриальных технологий в отечественные проекты АЭС в настоящее время Акционерное общество «Атомстройэкспорт» с привлечением консорциума, состоящего из ведущих научных организаций России в области строительства (АО «Институт «Оргэнергострой», НИУ МГСУ, АО «ВНИИАЭС» и др.), проводит научно-исследовательскую работу, целью которой является разработка национального стандарта на проектирование и расчет железобетонных конструкций (ЖБК) с внешним листовым армированием. Развитие данной технологии с учетом зарубежного опыта позволит сократить сроки возведения строительных конструкций, а также повысит эффективность использования строительных материалов.

Оценка применения модульных конструкций с внешним листовым армированием SC в строительных решениях атомных станций рассматривалась различными инжиниринговыми компаниями в своих проектах. Так, например, для APR-1400 (TEPCO, Южная Корея) определено, что конструкции с внешним листовым армированием служат одной из наиболее жизнеспособных альтернатив среди существующих методов строительства с целью сокращения сроков сооружения АЭС [6]. Европейцы на примере здания дизель-генераторной предложили для кон-

¹ IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.5. Construction Technologies for Nuclear Power Plants. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011. 189 p.

струкций АЭС малой мощности [7] использовать более унифицированный вариант SC, состоящий из однотипных L или U-образных модулей.

В целом конструктивные решения с внешним листовым армированием впервые активно стали изучаться при разработке строительных решений на станциях японского проекта, еще в 80-х годах прошлого века, и получили свою практическую реализацию на проекте ABWR (реактор кипящего типа, мощностью 1360 МВт) в 1992 г. для энергоблоков № 6 и 7 АЭС Kashiwazaki-Kariwa (Япония), строительство которой осуществлялось компанией Toshiba в сотрудничестве с GE и Hitachi¹. В современной практике такие конструкции стали основой для проектов компании Westinghouse (AP-300² и AP-1000³), GE Hitachi Nuclear Energy (BWRx-300^{4,5} и SNERDI (CAP-1000⁶ и CAP-1400⁷)).

Модульные принципы с применением конструкций SC позволяют реализовать крупноблочный монтаж из практически «обезличенных» блок-модулей, в том числе в связке с оборудованием и сетями. Кроме того, отсутствуют опалубочно-распалубочные работы, формируется гарантированное качество лицевой поверхности, сокращается общий расход стали при сравнимой прочности с традиционными ЖБК, а также улучшается работа в условиях циклических и ударных воздействий. Появляется возможность закрепить оборудование и рабочие площадки в любом месте^{1,8} [6–9]. Все это свиде-

тельствует о привлекательности и актуальности рассмотрения SC для отечественных проектов АЭС.

Поэтому цель данной работы — обзор практического опыта возведения атомных станций с применением сборных конструкций с внешним листовым армированием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основе анализа, обобщения и систематизации информации, полученной из открытых источников, авторами рассмотрен практический опыт применения конструкций с внешним листовым армированием при возведении АЭС на таких объектах, как Sanmen, Haiyang, Xudabao и Lianjiang (Китай), V.C. Summer и Vogtle (США). Определены основные конструктивные элементы блоков, их массогабаритные характеристики, используемые схемы механизации для монтажа, рассмотрены объекты строительной инфраструктуры, проблемы, с которыми столкнулись при строительстве станций по модульной технологии с помощью конструкций SC.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Широкое применение конструкции SC получили в проекте AP-1000 компании Westinghouse (США), где используется модульно-блочное построение строительных объемов и технологических систем. Так, используются следующие типы блоков⁹: СА — крупные блоки и блок-модули SC, заполняемые бетоном; СВ — модули стальной облицовки с элементами жесткости; СГ и СН — модули частей конструкции здания, в первом случае не оснащенные, во втором — оснащенные механическими изделиями; CS — модули, состоящие из стальных лестничных элементов. Кроме того, выделяют модули механического оборудования типа К для: вспомогательного здания (КВ), подболовочного пространства реакторного острова (КQ), турбинного здания (КТ); трубопроводные модули W, Q и R (соответственно — за пределами реакторного острова, подболовочного пространства и вспомогательного здания)⁹.

Всего в проекте AP-1000 применяется примерно 138 конструктивных модулей [10], из них: 65 — в гермообъеме (16 блоков типа СА, 36 — СВ, 9 — СН и 4 — CS); 32 блока в обстройке реакторного здания (8 — СА, 1 — СВ, 12 — СН, 11 — CS), 10 — в пристройке к реакторному зданию (все блоки CS) и 31 блок — в здании турбины (16 — CS, 14 — СГ и СН, 1 — СА), технологических модулей механического оборудования и трубопроводных систем примерно 123⁹, но возможны адаптации при привязке к конкретной площадке и контракту (проекту).

⁹ ITAACs in Modules Presentaion // Westinghouse, Nuclear Regulatory Commission (NRC). 2009. 77 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML0930/ML093010365.pdf>

² AP300 SMR. Small Modular Reactor (SMR) // Westinghouse. URL: <https://westinghousenuclear.com/uknuclear/products-services/ap300-smr/>

³ AP1000 Design Control Document (rev. 18). Tier 2 Chapter 3. Design of Structures, Components, Equip. & Systems – Section 3.8 Design of Category I Structures // Nuclear Regulatory Commission (NRC). 190 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1034/ML103480517.pdf>

⁴ NEDO-33988 (revision 0). BWRX-300 Steel-Plate Composite (SC) Containment Vessel (SCCV) and Reactor Building Structural Design // GE Hitachi Nuclear Energy, Nuclear Regulatory Commission (NRC). 2022. 26 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2228/ML22287A177.pdf>

⁵ NEDO-33926 (revision 1). BWRX-300 Steel-Plate Composite Containment Vessel (SCCV) and Reactor Building (RB) Structural Design // GE Hitachi Nuclear Energy, Nuclear Regulatory Commission (NRC). 2023. 133 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2323/ML23230B215.pdf>

⁶ Major module put in place at Sanmen 4 // World Nuclear Association. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Major-module-put-in-place-at-Sanmen-4>

⁷ CAP1400 Reactor vessel passes pressure tests // Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute. URL: <https://www.snerdi.com.cn/en/newsdetail?id=5834>

⁸ NEA No. 7530. Unlocking reductions in the construction costs of nuclear: a practical guide for stakeholders // France, Boulogne-Billancourt: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. 2020. 129 p. URL: <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-07/7530-reducing-cost-nuclear-construction.pdf>

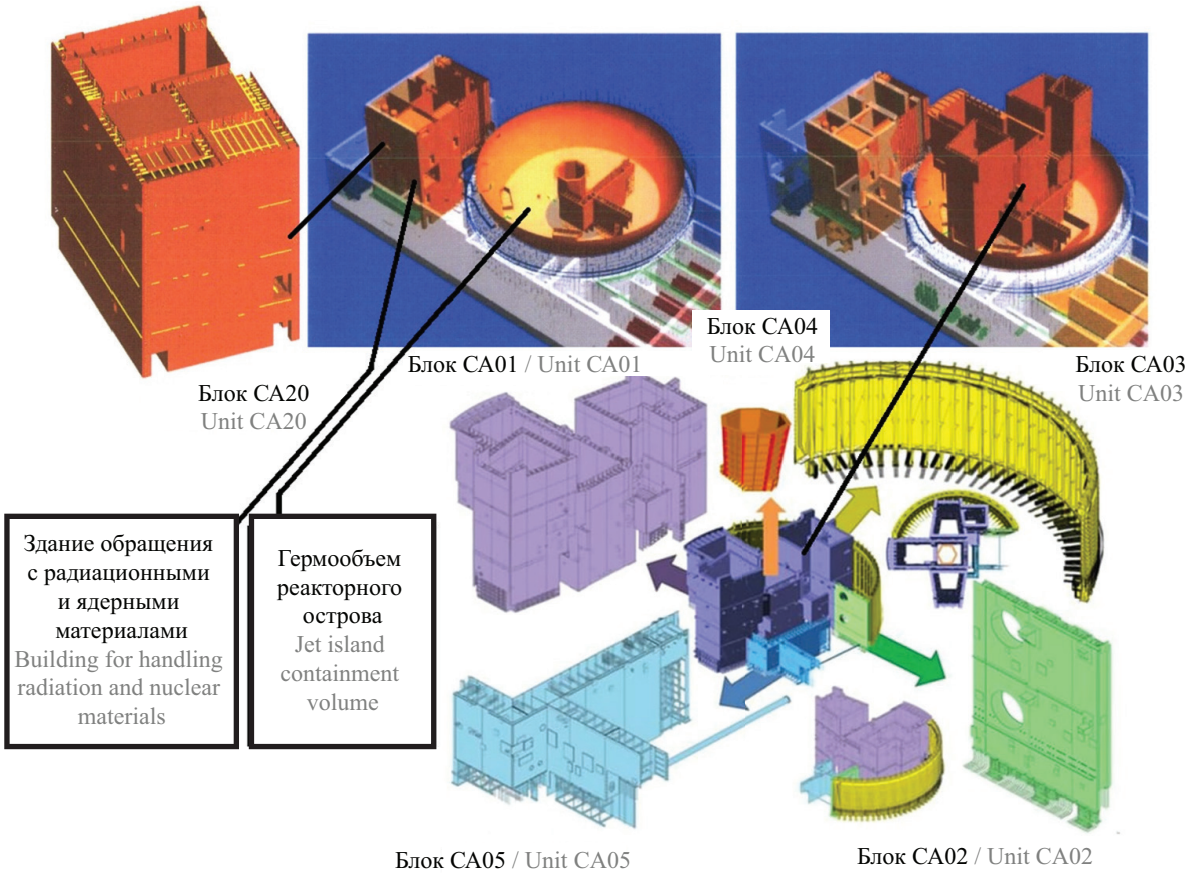


Рис. 1. Схема разрезки на крупные блоки СА, выполненные из конструкций SC, для проекта AP-1000 дизайна Westinghouse (США)⁹ [11]

Fig. 1. Schematic of cutting into large CA units made of SC structures for the Westinghouse (USA) AR-1000 design project⁹ [11]

Общая разрезка на крупные блоки СА внутренне-го гермообъема реакторного острова, а также здания обращения с радиоактивными и ядерными материала-ми проекта AP-1000 показаны на рис. 1, их массогаба-ритные характеристики приведены в табл. 1.

Блоки СА собираются из отдельных, более мел-ких модулей (монтажных единиц), их геометриче-ские размеры выбираются исходя из транспортных габа-ритов доставки (автомобильный, железнодоро-жный или морской транспорт) с заводов изготови-телей^{1,3}. Например, для крупного блока СА01 такие

подмодули имеют геометрические размеры около $3,7 \times 3,7 \times 25$ м (длина, ширина, высота), их вес в среднем составляет 10 т, но может доходить до³ 73 т. Вариант разрезки блока СА20 на блок-модули СА показан на рис. 2, а, а пример отдельного блок-модуля СА в составе СА20 — на рис. 2, б.

На площадке укрупнительной сборки (или в спе-циальном цехе) близ стройплощадки блок-модули собираются в стык при помощи автоматической (или иного вида) сварки с полным проплавлением шва, создавая равнопрочное соединение^{1,3} (рис. 3) [10].

Табл. 1. Массогабаритные характеристики крупных конструкционных блоков СА проекта AP-1000⁹ [12]
Table 1. Mass and dimensional characteristics of large structural units CA of the AR-1000 project⁹ [12]

Тип крупного конструкционного блока Type of large structural unit	Габариты, м Dimensions, m			Масса конструкций, т Mass of structures, t	Количество подмодулей в блоке, шт. Number of submodules in the unit, pcs.
	длина length	ширина width	высота height		
CA01	28,0	29,0	23,0	725,0	47
CA02	7,0	2,0	13,0	28,3	5
CA03	35,0	14,0	13,0	191,0	17
CA04	—	—	—	45,0	5
CA05	—	—	—	50,0	8
CA20	13,0	21,0	20,7	777,0	72

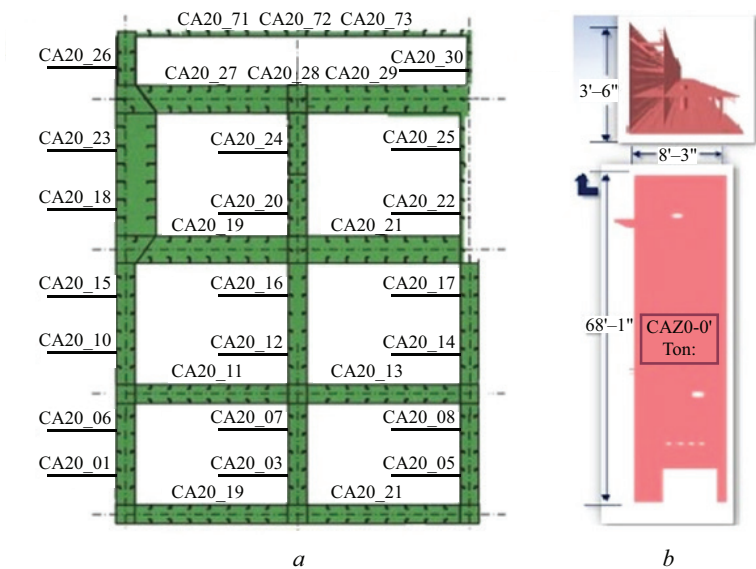


Рис. 2. Разрезка крупного блока CA20 на сборочные единицы (блок-модули CA): *a* — вариант разрезки блока CA20, при этом CA20_01 весит 29,3 т, CA20_02 — 18,65 т, CA20_03 — 31,5 т, средний вес монтажных единиц около — 20,84 т; *b* — блок-модуль CA20_011 в составе крупного блока CA20 имеет вес 30 т, высоту — 20,73 м, длину и ширину — 2,59 м [10]

Fig. 2. Cutting of a large unit CA20 into assembly units (unit modules CA): *a* — shows a variant of cutting of the unit CA20, with CA20_01 weighing — 29.3 tons, CA20_02 — 18.65 tons, CA20_03 — 31.5 tons, the average weight of assembly units is about — 20.84 tons; *b* — unit-module CA20_011 as part of the large unit CA20, has a weight — 30 tons, height — 20.73 m, length and width — 2.59 m [10]

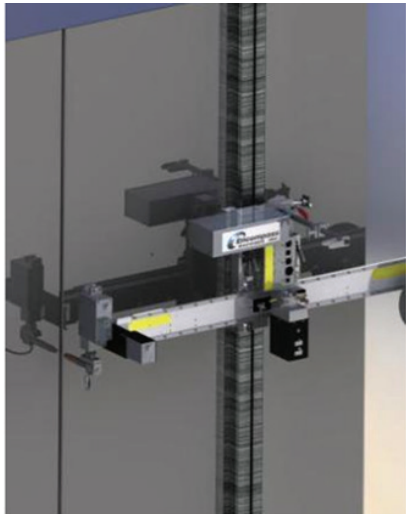


Рис. 3. Пример автоматической сварки блок-модулей при сборке их в единый укрупненный монтажный блок CA в вертикальном положении. Контроль сварного соединения — визуальный (100 % длины) и с применением ультразвука (или радиографического метода) на 10 % их длины [10]

Fig. 3. An example of automatic welding of unit modules when assembling them into a single enlarged assembly unit CA in the vertical position. Control of the welded joint — visual (100 % of the length) and with the use of ultrasound (or radiographic method) at 10 % of their length [10]

Отдельные блок-модули выполнены в виде конструкций с внешним листовым армированием и в своем стандартном исполнении представляют стальные листы³, толщиной 12,7 мм, к которым

с внутренней стороны привариваются анкеры Нельсона (длиной 157,2 мм, диаметром 19,05 мм, с шагом по горизонтали 254 мм, по вертикали — 243,8 мм), с целью создания связи между телом будущего бетонного заполнения конструкции и металлических листов (см. рис. 4, *a*). Стальные листы, в свою очередь, объединяются в жесткий пространственный блок за счет применения соединительных ферм, выполненных из прокатных профилей (уголков 102 × 76 мм и швеллеров высотой 152,4 мм)⁵ (рис. 4, *a*). Номинальное типовое расстояние между фермами для конструктивных блоков³ составляет 762 мм. После набора уложенным в конструкцию бетоном прочности плоские связевые фермы обеспечивают дополнительное сопротивление к сдвигу между стальными листами внешнего армирования, работая как поперечные хомуты в традиционных каркасах монолитных железобетонных конструкций. Проходки, а также желоба для укладки бетона в конструкцию, предусматриваются непосредственно на этапе сборки блок-модулей CA³.

Для перекрытий используются блоки с односторонним расположением стального листа, их жесткость обеспечена за счет внутренних ребер, выполненных из прокатных элементов таврового профиля высотой 457,2 мм. Верхнее армирование — традиционное, с применением арматурной сетки из стержней периодического профиля диаметром 20 мм, установленных с шагом 304,8 мм. Нижнюю часть тавров пересекают на продольные секции равнополочные уголки³ 76,2 × 76,2 × 9,53 мм, с шагом 457,2 мм (рис. 4, *b*).

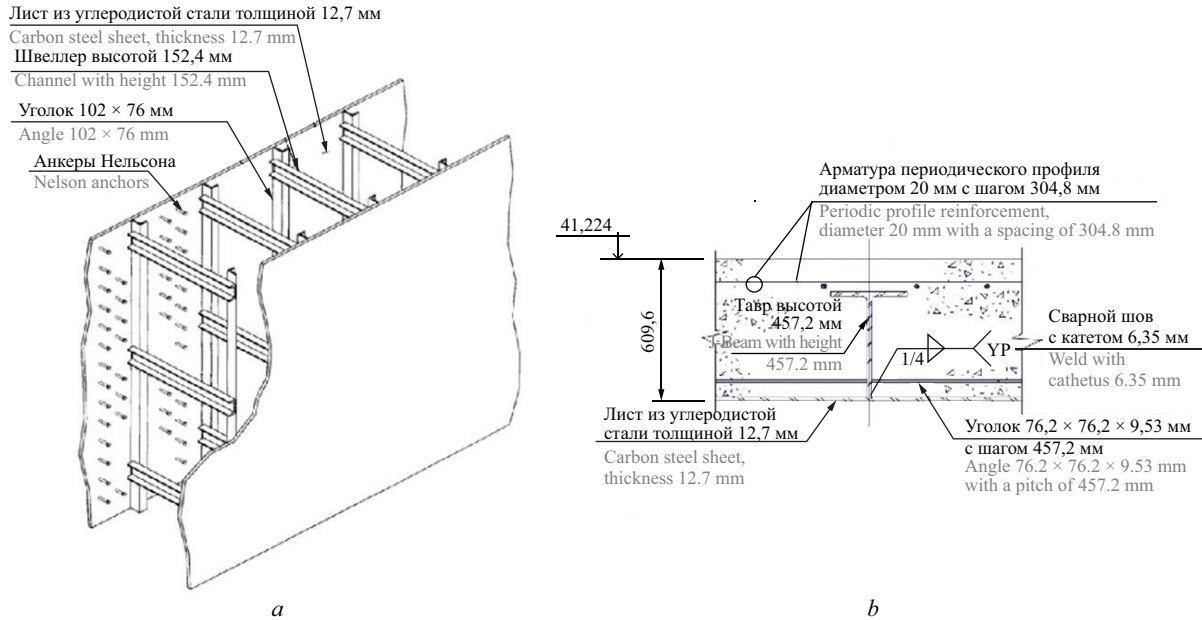


Рис. 4. Принципиальная конструкция типовых SC блок-модулей СА, проект AP-1000, Westinghouse (США) с внешним листовым армированием³: а — стеновой блок; б — блок перекрытия

Fig. 4. Principle design of typical SC unit-modules CA, project AR-1000, Westinghouse (USA) with external sheet reinforcement³: а — wall unit; б — floor unit

Изготовление блок-модулей СА при строительстве АЭС V.C. Summer и Vogle осуществлялось на производственной площадке компании Shaw Group, которая в Луизиане (США)¹⁰ возвела с этой целью самостоятельный производственный комплекс, включающий [10]: сборочный цех (габаритами (длина × ширина × высота) — 152,4 × (21,34–33,5) × (12,2–21,34) м, с возможностью сборки конструкций высотой до 15,24 м внутри цеха); административное здание (площадью 761,8 м²); учебный центр (929,03 м²). Кроме того, производственный комплекс имел доступ к отгрузке полуфабрикатов (блок-модулей СА) на баржу [10].

Вид на производственную площадку и технологическую линию сборки блок-модулей СА для АЭС V.C. Summer и Vogle показан на рис. 5, 6, процесс их изготовления — на рис. 7.

Дальнейшая доставка на строительную площадку блок-модулей СА, как правило, осуществляется стандартным тягачом с открытым полуприцепом или при помощи железнодорожного транспорта [14].

Изначально сборка крупных блоков СА из блок-модулей предполагалась на отдельной открытой сборочной площадке близ строительства АЭС (рис. 8) с последующей доставкой укрупненных блоков в зону действия основного монтажного крана, именно такая схема организована при возведении AP-1000 на АЭС Sanmen (Китай) (рис. 9).

Как правило, сборочная площадка обслуживается как козловым, так и краном высокой грузоподъемности. Первый используется для укрупнения блоков СА на стенде (рис. 10), второй — для кантовки предварительно укрупненных частей и окончательной сборки сверхкрупных блоков СА (рис. 11).

Примечательно, что укрупненные элементы блока СА20 раскрепляются на стенде при помощи оттяжек, вследствие чего следует предусмотреть соответствующее пространство вокруг для возможности организации такого раскрепления (рис. 11).

Укрупнительная сборка блоков СА из соответствующих блок-модулей на площадках строящихся АЭС в США была организована в специальном временном здании (рис. 12), располагаемом в габаритах строительной площадки станции (рис. 13).

Временное здание для укрупнительной сборки блоков СА01 и СА20 проектируется с учетом ведения работ параллельно друг другу, оно оборудуется четырьмя мостовыми кранами грузоподъемностью по 50 т каждый [9]. Конструкции временного раскрепления при сборке в таком случае уже опираются непосредственно на силовую плиту пола [17].

При производстве работ по укрупнению блоков СА на площадках строящихся АЭС, таких как Sanmen (Китай), V.C. Summer и Vogtle (США), был получен производственный опыт, из которого следует, что сборку лучше производить во временном цехе на площадке строительства АЭС, а не на открытых сборочных участках, поскольку так можно нивелировать влияние погодных условий. При сварке отдельных блок-модулей СА могут деформироваться длинные и тонкие стальные

¹⁰ Shaw возобновила выпуск модулей для блоков с AP-1000 // Атомная энергия 2.0. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2015/05/06/24285>

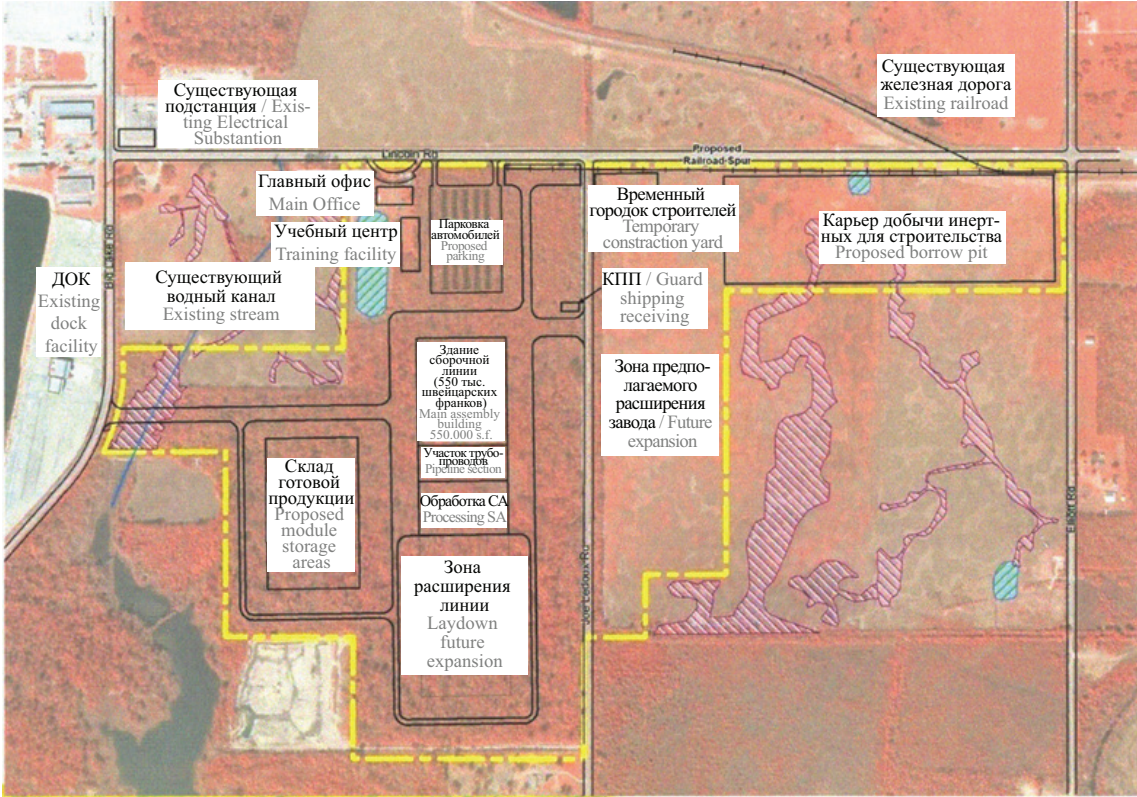


Рис. 5. Схема генерального плана производственной площадки Shaw Group для сборки блок-модулей СА в Луизиане (США) [13]
Fig. 5. Schematic of the master plan of the Shaw Group production site for assembly of CA unit modules in Louisiana (USA) [13]

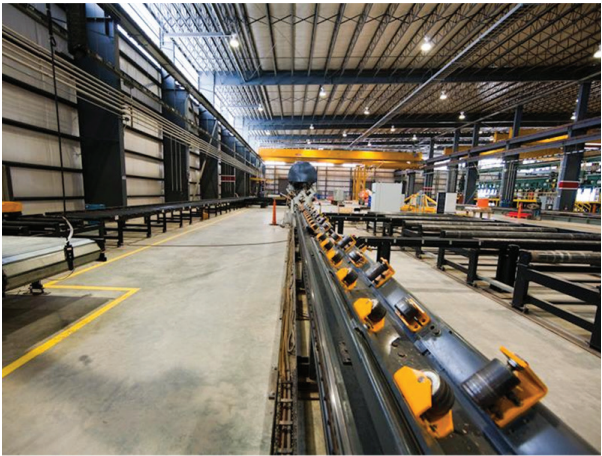
листы конструкций, поэтому предпочтительно сваривать их в вертикальном положении, что позволяет снизить нагрузку от собственного веса и, как следствие, уменьшить деформации элементов блоков и термическое влияние сварки. Необходимо обеспечить сборочные площадки достаточным количеством квалифицированных сварщиков; использовать методы предварительной термообработки конструкций перед их сваркой; усилить входной

контроль, т.е. осматривать комплектующие тщательно и до сборки блок-модулей, а также тщательнее контролировать геометрию, в том числе и общую геометрию укрупняемого блока, так как при изготовлении блок-модулей и их сборке накапливаются общие отклонения [10, 15].

Крупные блоки СА доставляются в зону действия основного монтажного крана на транспортной самоходной тележке (шасси на пневмоколесном



a



b

Рис. 6. Вид на технологическую линию сборки блок-модулей СА на заводе-изготовителе Shaw Group в Луизиане, США [10]
Fig. 6. View of the process line for assembly of CA unit modules at the manufacturing plant of Shaw Group in Louisiana, USA [10]

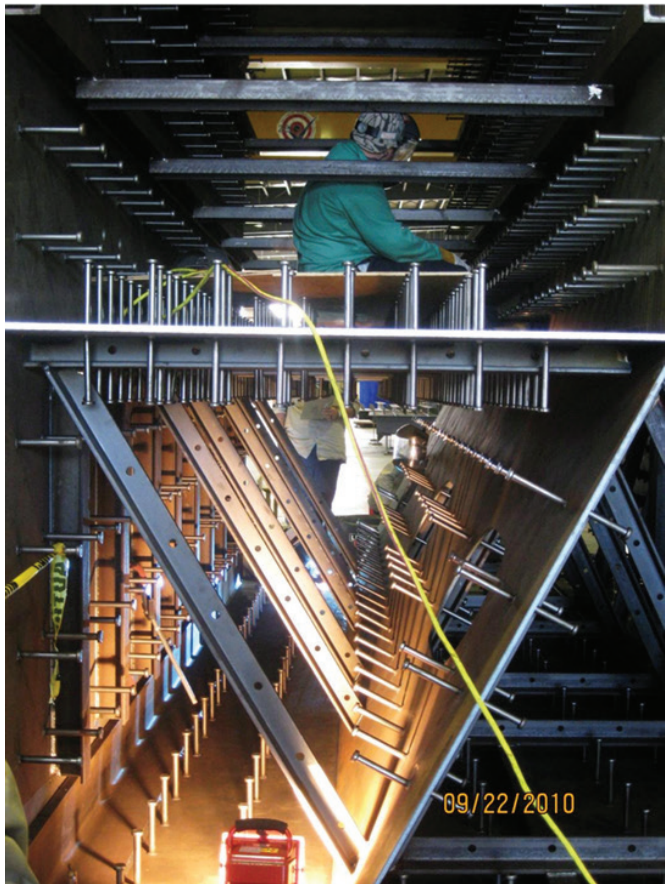


Рис. 7. Процесс изготовления блок-модулей CA на заводе Shaw Group в Луизиане, США [10]
Fig. 7. Manufacturing process of CA unit modules at Shaw Group plant in Louisiana, USA [10]

ходу) марки Kamag (рис. 14), после чего монтируются в проектное положение краном высокой грузоподъемности (рис. 15).
Опыт, полученный при транспортировке крупных блоков CA на АЭС Sanmen в Китае, показывает, что при соответствующем перемещении со сборочной площадки в основную зону монтажа на двух самоходных тележках блок получил значительные деформации, что было учтено при строительстве АЭС

Vogtle (США)¹¹, где перемещение осуществлялось на трех тележках [10].
На монтаже крупных блоков CA из опыта возведения АЭС Sanmen, V.C. Summer и Vogtle следует, что необходимо [10, 15] выполнять выравнивание блоков во время подъема основным монтажным краном с использованием корзины противовеса;
¹¹ TimeLapse CA01 Placement at Vogtle. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=wVUB0eU91BI>

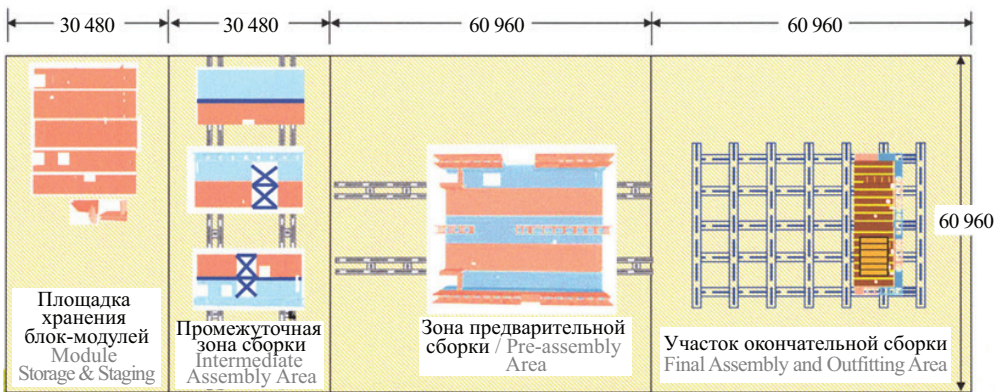


Рис. 8. План-схема открытой сборочной площадки, размеры указаны в мм [13]
Fig. 8. Plan diagram of the open assembly area, dimensions in mm [13]



Рис. 9. Сборочная площадка АЭС Sanmen (Китай) [15]

Fig. 9. View of the assembly site of Sanmen NPP (China) [15]

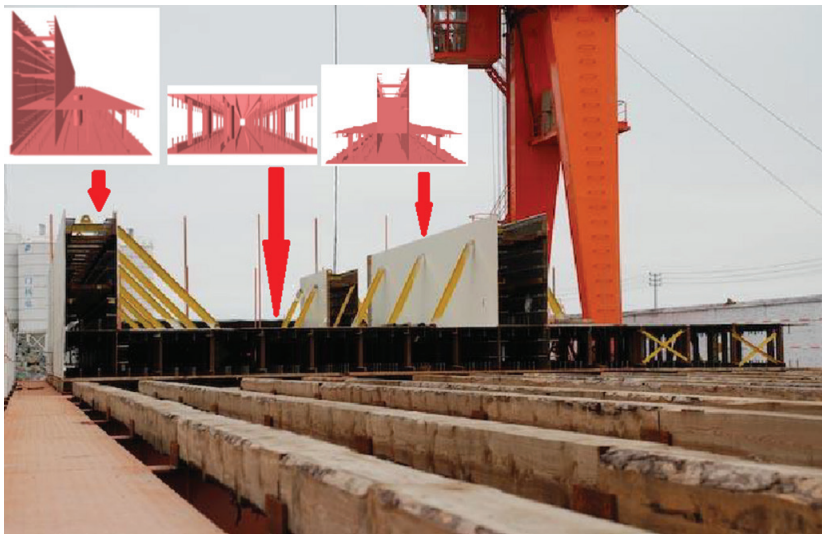


Рис. 10. Укрупнение отдельных блок-модулей СА для блока СА20 на стенде, обслуживаемым козловым краном, АЭС Sanmen (Китай) [10]

Fig. 10. Aggregation of individual CA unit modules for unit CA20 on the stand with a gantry crane, Sanmen NPP (China) [10]



Рис. 11. Вывешивание и сборка предварительно укрупненных на стенде элементов блока СА20 краном высокой грузоподъемности на АЭС Sanmen (Китай)⁹ [10]

Fig. 11. Aggregation of individual CA unit modules for unit CA20 on the stand with a gantry crane, Sanmen NPP (China)⁹ [10]

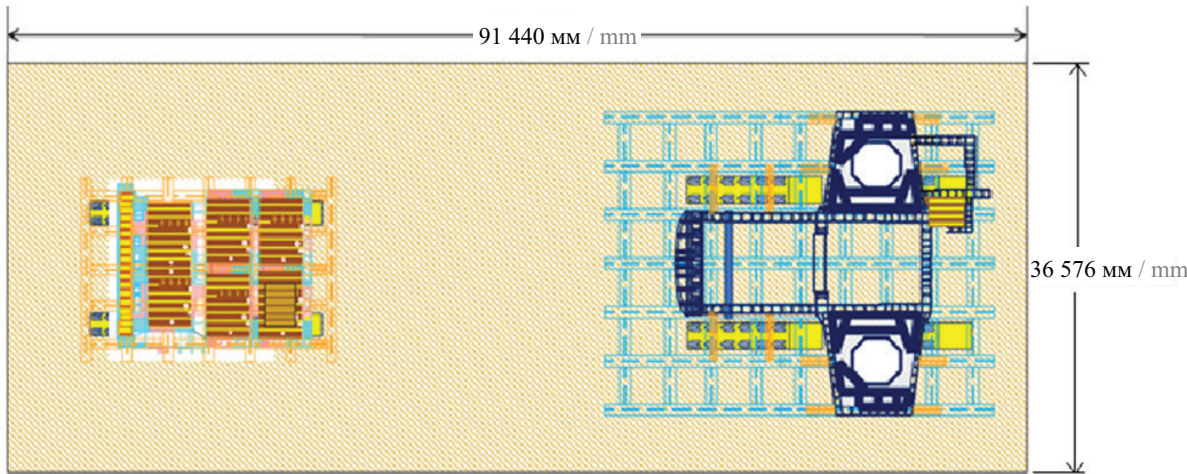


Рис. 12. Функциональная схема временного здания (Module Assembly Building) для сборки крупных блоков CA01 и CA20, АЭС Vogtle и V.C. Summer (США) [10]

Fig. 12. Functional diagram of the temporary building (Module Assembly Building) for assembly of large units CA01 and CA20, Vogtle and V.C. Summer NPP (USA) [10]

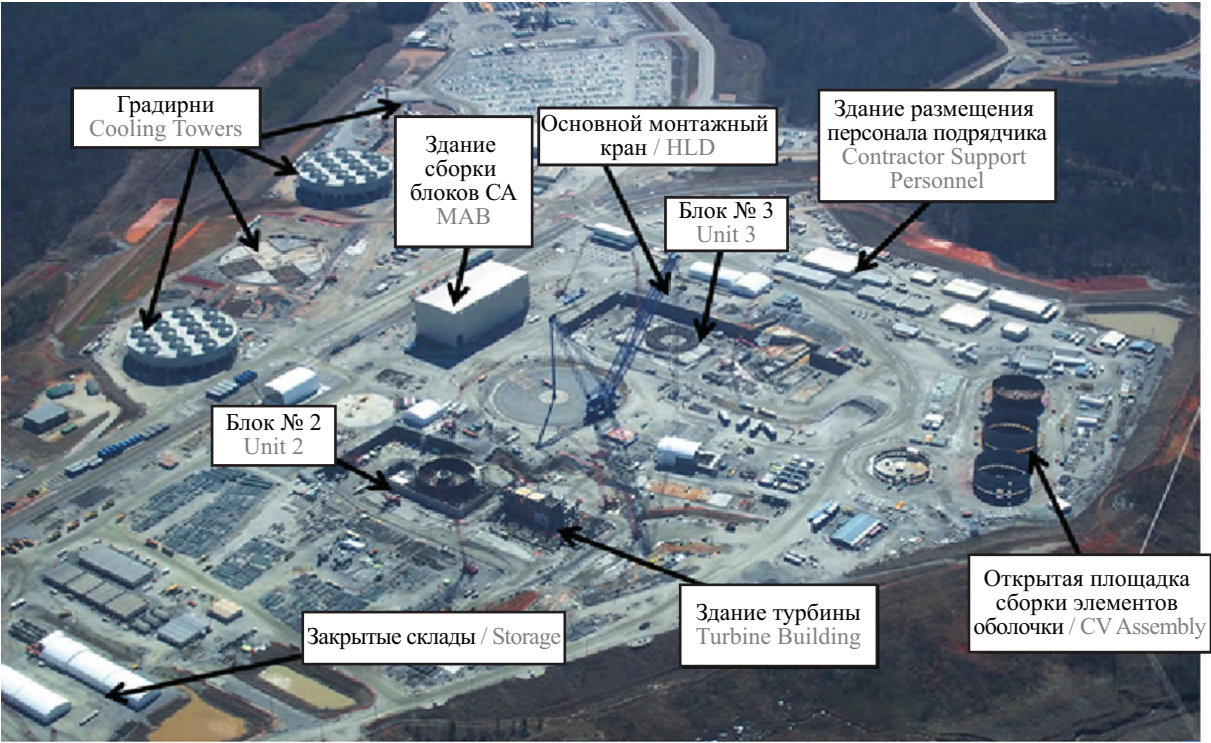


Рис. 13. Вид на общую организацию строительной площадки АЭС V.C. Summer (США) в основной период производства работ [16]

Fig. 13. View of the general organization of the construction site of V.C. Summer NPP (USA) during the main period of works [16]

обеспечить монтажные горизонты достаточным количеством квалифицированных сварщиков; усовершенствовать конструкцию и процессы изготовления крестовины подъемной траверсы; обеспечить необходимую точность монтажа крупного блока с контролем в нескольких точках (так как от погрешности зависит будущее совмещение технологических трубопроводов, где требования к допускам выше),

а также обеспечить завершение малярных работ и работ по нанесению антикоррозионного покрытия до начала монтажа блока в проектное положение.

На площадках строительства АЭС в Китае по проекту AP-1000 применялись самоходные краны на гусеничном ходу грузоподъемностью 2600 и 3200 т, также были задействованы два 400-тонных крана [15].

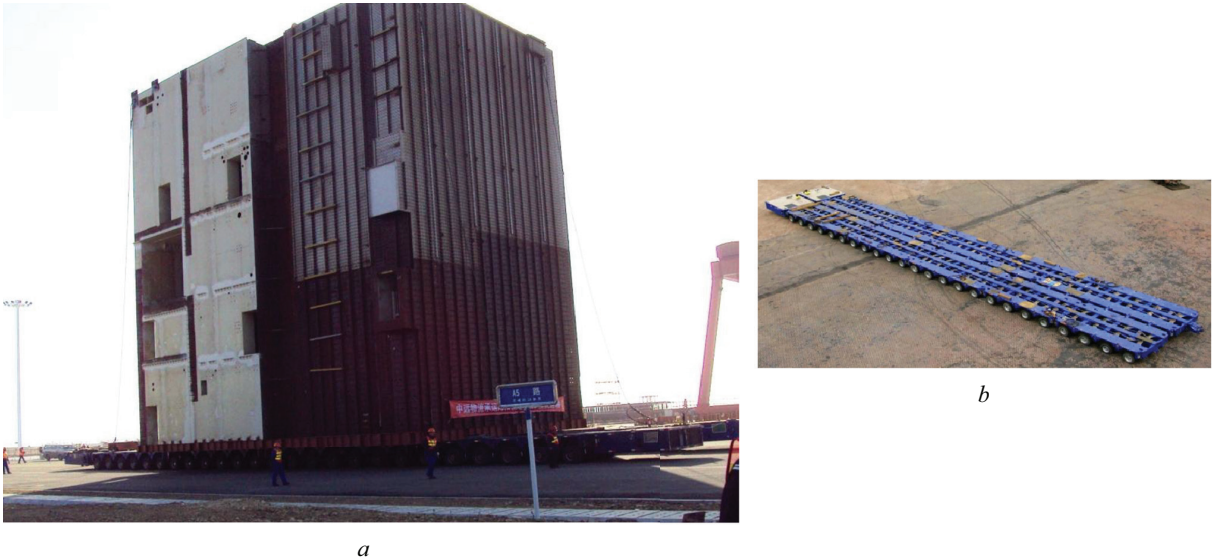


Рис. 14. Доставка блока CA20 на транспортных самоходных тележках, АЭС Sanmen (Китай): *a* — этап перемещения блока CA20 с площадки укрупнительной сборки; *b* — вид на транспортную самоходную тележку (грузоподъемность 1000 или 400 т (в зависимости от типа блока)) [10, 15]

Fig. 14. Delivery of the unit CA20 on self-propelled transport trucks, Sanmen NPP (China): *a* — the stage of moving the unit CA20 from the site of consolidation assembly; *b* — view of the self-propelled transport truck (load capacity 1,000 or 400 tons (depending on the type of the unit)) [10, 15]

Общая схема механизации при монтаже крупных блоков в США отличается от проектов, реализованных в Китае: строительная площадка обслуживается полярным краном Bigge 125D A-Frame Ring



Рис. 15. Монтаж крупного блока CA20 в проектное положение, масса блока — 1000 т, грузоподъемность монтажного крана Lampson — 3200 т, АЭС Sanmen (Китай) [15]

Fig. 15. Installation of large unit CA20 in the design position, unit mass — 1,000 tons, lifting capacity of the Lampson erection crane — 3,200 tons, Sanmen NPP (China) [15]

Derrick на железнодорожном ходу, который располагается между двумя строящимися энергоблоками и обслуживает возведение обоих (см. рис. 14, 17).

Некоторые технические характеристики крана Bigge 125D A-Frame Ring (рис. 16) Derrick приведены в табл. 2.

Примечательно, что для монтажа оборудования, в частности корпуса реактора, на блоке № 3 АЭС Vogtle (США) использовался кран на гусеничном ходу Lampson Transi-lift-2600, грузоподъемностью 2600 т¹².

¹² Plant Vogtle — Waynesboro, GA // Lampson International LLC. URL: <https://www.lampsoncrane.com/project/plant-vogtle-waynesboro-georgia2/>

Некоторые фактические массогабаритные характеристики для блоков CA01 и CA20 реализованных проектов CAP-1000 и AP-1000 приведены в табл. 3.

Для сравнения, в проекте APR-1400 (TEPCO) наиболее рациональными были приняты модули среднего размера (весом около 520 т) с их последующим монтажом гусеничными кранами — Lampson LTL-2600 и Liebherr LR11350 [6].

Так как на сегодняшний день не существует эффективного метода контроля укладки бетонной смеси в тело массивных конструкций с внешним листовым армированием, в работе³, где предусмотрена укладка самоуплотняющейся бетонной смеси, обращено внимание на необходимость проведения контроля технологических параметров ее укладки.



Рис. 16. Монтаж блока CA01 сверхмощным краном Bigge 125D A-Frame Ring Derrick на АЭС V.C. Summer (США)¹³

Fig. 16. Assembly of unit CA01 by heavy-duty crane Bigge 125D A-Frame Ring Derrick at V.C. Summer NPP (USA)¹³

¹³ World's largest crane places V.C. Summer module // Newberry Observer. URL: <https://www.newberryobserver.com/news/1170/worlds-largest-crane-places-v-c-summer-module>

Табл. 2. Основные технические характеристики крана Bigge 125D A-Frame Ring Derrick¹⁴

Table 2. Main technical characteristics of the crane Bigge 125D A-Frame Ring Derrick¹⁴

Характеристика Name of characteristic	Показатель Indicator
Максимальная грузоподъемность, т Maximum lifting capacity, t	6800
Максимальная высота подъема стрелы, м Maximum boom lift height, m	170,7
Минимальный рабочий радиус, м Minimum working radius, m	93,04
Ширина железнодорожного пути, м Railroad track width, m	9,75
Максимальное давление на грунт, тс/м ² Maximum ground pressure, t/m ²	До 29,29 / To 29.29
Мощность дизельного двигателя, л. с. Diesel engine power, h. p.	3450
Расход топлива на полной мощности, л/ч Fuel consumption at full power, l/h	632,16

Табл. 3. Массогабаритные характеристики для блоков CA01 и CA20 реализованных проектов CAP-1000 и AP-1000^{15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25} [18]

Table 3. Mass and dimensional characteristics for units CA01 and CA20 of the realized projects CAP-1000 and AP-1000^{15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25} [18]

Наименование АЭС Name of NPP	Проект Project	Массогабаритные характеристики крупных блоков CA01 и CA20 Mass and dimensional characteristics of large units CA01 and CA20			
		Блок CA01 Unit CA01		Блок CA20 Unit CA20	
		габариты (длина × шири- на × высота), м dimensions (length × × width × height), m	масса, т mass, t	габариты (длина × ши- рина × высота), м dimensions (length × × width × height), m	масса, т mass, t
V.C. Summer (США) (блок № 2) V.C. Summer (USA) (unit No. 2)	AP-1000	~27,0 × 29,0 × 24,0	1089,0	–	>1000,0
Vogle (США) (блок № 4) Vogle (USA) (unit No. 4)	AP-1000	21,34 × 27,43 × 2 4,38	907,18	20,42 × 14,33	1000,0**
Vogle (США) (блок № 3) Vogle (USA) (unit No. 3)	AP-1000	21,0 × 29,0 × 24,0	907,0	–	>1000,0
Sanmen (Китай) (блок № 1) Sanmen (China) (unit No. 1)	AP-1000	26,74 × 28,96 × 23,47*	–	–	–
Sanmen (Китай) (блок № 3) Sanmen (China) (unit No. 3)	CAP-1000	–	–	20,5 × 14,1 × 20,9	1100,0
Sanmen (Китай) (блок № 4) Sanmen (China) (unit No. 4)	CAP-1000	>27,0 × 29,0 × 24,0	1046,2	20,5 × 14,1 × 20,9	1024,0
Xudabao (Китай) (блок № 1) Xudabao (China) (unit No. 1)	CAP-1000	–	–	20,6 × 14,2 × 21,0	>1000,0
Lianjiang (Китай) (блок № 1) Lianjiang (China) (unit No. 1)	CAP-1000	28,0 × 29,0 × 24,0*	1066,0	–	1049,0

Примечание: * — продолжительность монтажа блока составила 3 ч 18 мин, состоящего из 47 подмодулей; ** — продолжительность монтажа блока — около 3 ч.

Note: * — duration of installation of the unit was 3 hours and 18 minutes, the unit consists of 47 submodules; ** — duration of unit installation is about 3 hours.

¹⁴ BIGGE 125D AFRD. Crawler Crane Information // Bigge Crane and Rigging Co. URL: <https://www.bigge.com/crane-information/bigge-125d-afrd/#:~:text=Equipped%20with%20a%20560%20ft,29.7%20acres%20of%20hook%20coverage>

¹⁵ Landmark module installation at VC Summer // World Nuclear News. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Landmark-module-installation-at-VC-Summer>

Опыт, полученный при бетонировании крупных монтажных блоков СА на площадках АЭС Sanmen (Китай), V.C. Summer и Vogtle (США), показывает, что [10]: необходимо более тщательно подходить к подбору компонентов бетонной смеси, а также обеспечить эффективный контроль ее состава и характеристик окружающей среды, включая температуру, влажность и ветер; корректно рассчитывать или сократить продолжительность доставки бетонной смеси от бетонного завода до места укладки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрев практический опыт применения конструкций с внешним листовым армированием на атомных станциях, выполненных по проектам AP-1000 и CAP-1000, с учетом проработок для проекта APR-1400, можно сделать следующие выводы.

Основным методом возведения при реализации проектов АЭС с конструкциями SC являлся монтаж сверхкрупными блоками по технологии open-top, при этом пространственная организация строительной площадки значительным образом изменяется:

- появляется необходимость в использовании кранов высокой (или сверхвысокой) грузоподъемности, наличии специального транспорта доставки;
- следует довольно близко размещать площадку укрупнительной сборки или сборочный цех (последний перспективнее по опыту реализации проекта AP-1000), оснащенные соответствующими самостоятельными грузоподъемными кранами, а также устраивать широкие дороги с капитальным покрытием, связывающие участок монтажа с участком укрупнительной сборки, что приводит к необходимости изменения подготовительного периода строительства АЭС и напрямую влияет на капиталовложения в подготовительный период строительства АЭС;

- отсутствует значительный объем работ, связанный с процессами армирования, монтажа и демонтажа опалубочных систем в пределах основного графика строительства АЭС, что позволяет несколько «разгрузить» пространство вокруг строящегося блока, приводит к меньшей зависимости от поставок арматурных блоков;

- появляется необходимость в жестком контроле допусков монтажа, качества сборки блоков, их антикоррозионной обработки, что меняет структуру стандартных операций на строительной площадке при возведении АЭС.

Предварительное изготовление блок-модулей SC на заводах гражданской инфраструктуры (а не на приобъектной строительной-монтажной базе) дает возможность, с одной стороны, сократить количество выполняемых операций и задач (как следствие и персонала) в пределах строящегося объекта, с другой — приводит к необходимости жесткого контроля логистических рисков, а также накладывает ряд ограничений и зависимостей от сопутствующих процессов, так:

- появляется необходимость в готовности полного объема рабочей документации объекта строительства до начала производства работ на площадке, т.е. фактически еще в подготовительный период, поскольку следует обеспечить закупку соответствующих материалов;
- усиливается зависимость от качества рабочей документации, а также от количества будущих в ней изменений.

Управление логистикой (транспортировка блок-модулей и укрупненных блоков, их обработка различными составами и первичная обработка (на приемке), сварочные испытания, а также соответствующие контрольные мероприятия)) при использовании конструкций SC вызывает сложности, по сравнению с традиционными решениями, появляется необходи-

¹⁶ Milestone for US Vogtle NPP // Nuclear Engineering International. URL: <https://www.neimagazine.com/news/milestone-for-us-vogtle-npp-4836949/?cf-view&cf-closed>

¹⁷ Installation of CA20 module at China's Lianjiang NPP 1 // Heat Exchanger World. URL: <https://heat-exchanger-world.com/installation-of-ca20-module-at-chinas-lianjiang-npp-1/>

¹⁸ CA20 Module Placed at New V.C. Summer Reactor // NuclearStreet. URL: https://nuclearstreet.com/nuclear_power_industry_news/b/nuclear_power_news/archive/2014/05/15/ca20-module-placed-at-new-v.c.-summer-reactor-041502

¹⁹ Super module installed at first Lianjiang unit // World Nuclear News. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Super-module-installed-at-first-Lianjiang-unit>

²⁰ Largest module installed at Sanmen 3 // World Nuclear News. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Largest-module-installed-at-Sanmen-3>

²¹ 2 million-pound CA20 module safely lifted into Vogtle Unit 4 nuclear island // PR Newswire. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/2-million-pound-ca20-module-safely-lifted-into-vogtle-unit-4-nuclear-island-300316564.html>

²² Westinghouse Achieves Major Milestones at Vogtle AP1000 Plant // Westinghouse. URL: <https://info.westinghousenuclear.com/news/westinghouse-achieves-major-milestones-at-vogtle-ap1000-plant>

²³ Landmark Module Installation at Sanmen 4 // Promoter of World Energy Cooperation. URL: <https://www.world-energy.org/article/36230.html>

²⁴ Key module installed at unit 4 of China's Sanmen NPP // Nuclear Engineering International. URL: <https://www.neimagazine.com/news/key-module-installed-at-unit-4-of-chinas-sanmen-npp-10836076/?cf-view>

²⁵ Major module installed at Xudabao 1 // World Nuclear News. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Major-module-installed-at-Xudabao-1>

мость осуществлять фактически непрерывную координацию между различными направлениями деятельности при строительстве АЭС с такими конструкциями, обеспечить дополнительное взаимодействие различных структур между собой и их графиков производства работ.

Из-за отсутствия эффективных методов контроля качества укладываемой бетонной смеси возникают как конструктивные ограничения, обусловленные необходимостью визуального мониторинга, так и сопутствующие, традиционные проблемы, связанные с использованием самоуплотняющихся бетонных смесей, такие как: тщательный контроль состава и характеристик окружающей среды, сокращение времени доставки смеси и т.д.

В целом можно отметить, что в отчете МАГАТЭ «Технологии строительства атомных станций» (№ NP-T-2.5) от 2011 г.¹ практика применения модульных конструкций с внешним листовым армированием на стройках АЭС отмечается как наилучшая. Отчет, подготовленный Агентством по ядерной энергии в рамках Организации экономического сотрудничества и развития от 2020 г. [8], дает представление о технико-экономическом эффекте применения указанных выше конструкций, в частности, следует ожидать сокращения по времени реализации станции на 40 %, а снижения затрат на 20 % [8]. Соответственно развитие данной технологии в отечественных проектах АЭС позволит значительно повысить их конкурентоспособность на мировом рынке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Shykinov N., Rulko R., Mroz D.* Importance of advanced planning of manufacturing for nuclear industry // *Management and Production Engineering Review*. 2016. Vol. 7. Issue 2. Pp. 42–49. DOI: 10.1515/MPER-2016-0016
2. *Соловьева А.П., Харитонов В.В., Шмаков О.Г.* Влияние задержек в строительстве АЭС на эффективность инвестиций // *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2018. № 3. С. 52–62. DOI: 10.26583/npe.2018.3.05. EDN YYCGKT.
3. *Пергаменичик Б.К.* Проблемы и перспективы строительства АЭС // *Вестник МГСУ*. 2014. № 2. С. 140–152.
4. *Пергаменичик Б.К., Темшиев Р.Р.* Изменение величины трудозатрат при укрупнении специальных конструкций АЭС // *Вестник МГСУ*. 2012. № 1. С. 138–143. EDN PCITJB.
5. *Морозенко А.А., Шашков А.А.* Организационно-технологические аспекты крупноблочного возведения атомных электростанций // *Наука и бизнес: пути развития*. 2019. № 5 (95). С. 28–33. EDN YEMCPG.
6. *Mun Tae Youp, Sun Won Sang, Kim Keun Kyeong, Lee Ung Kwon.* A study on the constructability of steel plate concrete structure for nuclear power plant // *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Gyeongju*. 2008. Pp. 755–756.
7. *Burgan B., Kyprianou C., Bingham S., Waterhouse S.* A novel steel–concrete composite system for modular nuclear reactors // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Energy*. 2017. Vol. 170. Issue 2. Pp. 80–90. DOI: 10.1680/jener.16.00022
8. *Akiyama H., Sekimoto H., Fukihara M., Nakanishi K., Hara K.* A compression and shear loading tests of concrete filled steel bearing wall // *11nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-11)*. 1991. Vol. H. Issue 12/2. Pp. 323–328.
9. *Bruhl J.C., Varma A.H., Johnson W.H.* Design of SC composite walls for projectile impact: local failure // *22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-22)*. 2013. Division X. Pp. 1–10.
10. *Merrifield J.* Nuclear Construction 101 // *Shaw's Power Group, Nuclear Regulatory Commission (NRC)*. 2011. 127 p.
11. *Larson A.* 85 % of Major Equipment Delivered to V.C. Summer Nuclear Power Plant Construction Site // *POWER Magazine*. 2016. URL: <https://www.powermag.com/85-of-major-equipment-delivered-to-v-c-summer-nuclear-power-plant-construction-site/>
12. *Walker B.* Modular design and benefits // *ASME Nuclear Technical Seminars: Blueprint for New Build*. 2011. 42 p. URL: <https://files.asme.org/Events/NTS2011/28766.pdf>
13. *Niemer K., Martin J.* AP-1000 Module Status NRC Region II // *SNC Meeting, Birmingham: “Shaw”, “Nuclear Regulatory Commission” (NRC)*. 2009. 52 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML0914/ML091480384.pdf>
14. *Larson A.* Last Major Module Received at Vogtle Nuclear Site // *POWER Magazine*. 2019. URL: <https://www.powermag.com/last-major-module-received-at-vogtle-nuclear-site/>
15. *Deng X.* Modularization Construction Experiences of World First AP1000 Unit // *IAEA workshop*. 2011. 57 p. URL: <https://studylib.net/doc/18793120/modularization-construction-of-world-first-ap1000-unit>
16. *Torres A.* VC Summer Unit 2/3 Update // *SCANA/South Carolina Electric & Gas*. 2014. 21 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1414/ML14141-A402.pdf>
17. *Varma A.H.* Composite concrete construction: modularity, innovation, resilience and sustainability through design // *Purdue University*. 2016. 29 p. URL: <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2017/02/1-4.-Composite-Concrete-Construction-MIT-2017-min.pdf>
18. *Chunlin Hou.* Nuclear Regulations in China, Status of Sanmen NPP Construction and Experience Gained at NRC // *Nuclear Regulatory Commission*. 2010. 29 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1029/ML102990200.pdf>

Поступила в редакцию 9 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 19 августа 2024 г.

Одобрена для публикации 9 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Дмитрий Николаевич Коротких** — доктор технических наук, заместитель руководителя ЦФО «Наука и технологии»; **Институт «Оргэнергострой» (ОЭС)**; 115114, г. Москва, Дербеневская набережная, д. 7, стр. 10; профессор кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6391-7829, Scopus: 57205435199, ResearcherID: R-9413-2018, ORCID: 0000-0002-5041-0847; Korotkih.dmitry@gmail.com;

Олег Александрович Корнев — заместитель директора Научно-исследовательского института экспериментальной механики (НИИ ЭМ); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; PИНЦ ID: 878952, Scopus: 57204881147, ORCID: 0009-0009-5545-5284; i@okornev.ru;

Вячеслав Васильевич Белов — кандидат технических наук, доцент кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6936-1160, Scopus: 57218418373, ResearcherID: ABY-2103-2022, ORCID: 0000-0002-6246-6100; BelovVV@mgsu.ru;

Александр Сергеевич Силантьев — кандидат технических наук, начальник Центра математического моделирования строительных конструкций зданий и сооружений (ЦММСКЗиС); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; silantievas@structure.center;

Дмитрий Егорович Капустин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры испытаний сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6645-1159, Scopus: 57204881560, ORCID: 0000-0002-6493-1301; kde90@bk.ru.

Вклад авторов:

Коротких Д.Н. — руководство исследованием.

Корнев О.А. — поиск и анализ информации по теме исследования.

Белов В.В. — поиск и анализ информации по теме исследования, систематизация полученных результатов.

Силантьев А.С. — поиск и анализ информации по теме исследования.

Капустин Д.Е. — поиск и анализ информации по теме исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Shykinov N., Rulko R., Mroz D. Importance of Advanced Planning of Manufacturing for Nuclear Industry. *Management and Production Engineering Review*. 2016; 7(2):42-49. DOI: 10.1515/MPER-2016-0016
2. Soloveva A.P., Kharitonov V.V., Shmakov O.G. Effect of delays in NPP construction on investment efficiency. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018; 3:52-62. DOI: 10.26583/npe.2018.3.05. EDN YYCGKT. (rus.).
3. Pergamenshchik B.K. Problems and prospects of nuclear power plants construction. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 2:140-153. (rus.).
4. Pergamenshchik B.K., Temishev R.R. Change in the labor costs at integration of special design NPP. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 1:138-143. EDN PCITJB. (rus.).
5. Morozenko A.A., Shashkov A.A. Organizational and technological aspects of large-scale construction of nuclear power plants. *Science and Business: Ways of Development*. 2019; 5(95):28-33. EDN YEMCPG. (rus.).
6. Mun Tae Youp, Sun Won Sang, Kim Keun Kyeong, Lee Ung Kwon. A study on the constructability of steel plate concrete structure for nuclear power plant. *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Gyeongju*. 2008; 755-756.
7. Burgan B., Kyprianou C., Bingham S., Waterhouse S. A novel steel-concrete composite system for modular nuclear reactors. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Energy*. 2017; 170(2):80-90. DOI: 10.1680/jener.16.00022
8. Akiyama H., Sekimoto H., Fukihara M., Nakanishi K., Hara K. A compression and shear loading tests of concrete filled steel bearing wall. *11th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-11)*. 1991; H(12/2):323-328.
9. Bruhl J.C., Varma A.H., Johnson W.H. Design of SC composite walls for projectile impact: local fail-

ure. *22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-22)*. 2013; X:1-10.

10. Merrifield J. Nuclear Construction 101. *Shaw's Power Group, Nuclear Regulatory Commission (NRC)*. 2011; 127. URL: https://www.jaif.or.jp/ja/wnu_si_intro/document/2011/merrifield_supplychain.pdf

11. Larson A. 85 % of major equipment delivered to V.C. Summer Nuclear Power Plant Construction Site. *POWER Magazine*. 2016. URL: <https://www.powermag.com/85-of-major-equipment-delivered-to-v-c-summer-nuclear-power-plant-construction-site/>

12. Walker B. Modular design and benefits. *ASME Nuclear Technical Seminars: Blueprint for New Build*. 2011; 42. URL: <https://files.asme.org/Events/NTS2011/28766.pdf>

13. Niemer K., Martin J. AP-1000 Module Status NRC Region II. *SNC Meeting. Birmingham: "Shaw", "Nuclear Regulatory Commission" (NRC)*. 2009; 52. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML0914/ML091480384.pdf>

14. Larson A. Last Major Module Received at Vogtle Nuclear Site. *POWER Magazine*. 2019. URL: <https://www.powermag.com/last-major-module-received-at-vogtle-nuclear-site/>

15. Deng X. Modularization Construction Experiences of World First AP1000 Unit. *IAEA workshop*. 2011; 57. URL: <https://studylib.net/doc/18793120/modularization-construction-of-world-first-ap1000-unit>

16. Torres A. VC Summer Unit 2/3 Update. *SCANA/South Carolina Electric & Gas*. 2014; 21. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1414/ML14141A402.pdf>

17. Varma A.H. Composite concrete construction: modularity, innovation, resilience and sustainability through design. *Purdue University*. 2016; 29. URL: <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2017/02/1-4.-Composite-Concrete-Construction-MIT-2017-min.pdf>

18. Chunlin Hou. Nuclear Regulations in China, Status of Sanmen NPP Construction and Experience Gained at NRC. *Nuclear Regulatory Commission*. 2010; 29. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1029/ML102990200.pdf>

Received August 9, 2024.

Adopted in revised form on August 19, 2024.

Approved for publication on September 9, 2024.

B I O N O T E S: **Dmitrii N. Korotkikh** — Doctor of Technical Sciences, Deputy Head of the Central Office “Science and Technology”; **Institute Orgenergostroy (OES)**; build. 10, 7 Derbenyevskaya embankment, Moscow, 115114, Russian Federation; Professor of the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6391-7829, Scopus: 57205435199, ResearcherID: R-9413-2018, ORCID: 0000-0002-5041-0847; Korotkih.dmitry@gmail.com;

Oleg A. Kornev — Deputy Director of the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 878952, Scopus: 57204881147, ORCID: 0009-0009-5545-5284; i@okornev.ru;

Vyacheslav V. Belov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction of thermal and nuclear power facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6936-1160, Scopus: 57218418373, ResearcherID: ABY-2103-2022, ORCID: 0000-0002-6246-6100; BelovVV@mgsu.ru;

Alexander S. Silantiev — Candidate of Technical Sciences, Head of the Center for Mathematical Modeling of Building Structures and Facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; silantievas@structure.center;

Dmitrii E. Kapustin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Testing of Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-код: 6645-1159, Scopus: 57204881560, ORCID: 0000-0002-6493-1301; kde90@bk.ru.

Contribution of the authors:

Dmitrii N. Korotkikh — research management.

Oleg A. Kornev — search and analysis of information on the research topic.

Vyacheslav V. Belov — search and analysis of information on the research topic, systematization of the obtained results.

Alexander S. Silantiev — search and analysis of information on the research topic.

Dmitrii E. Kapustin — search and analysis of information on the topic of the study.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество 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 библиотечных депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в

тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия^{2...}

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)**Introduction:** text, text, text.**Materials and methods:** text, text, text.**Results:** text, text, text.**Conclusions:** text, text, text.**Key words:** text, text, text.**Acknowledgements:** text, text, text.**Corresponding author:** Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями **ГОСТа Р 7.0.5–2008**.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

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.