

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 19. Выпуск 9
2024**

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

Сквозной номер 190

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 19. Issue 9
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 ПИИ № 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	27.09.2024.
Подписан в свет	30.09.2024.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 17,90. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 265	

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*

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Дизайн и верстка: *Алина Юрьевна Байкова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Журнал включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Индексируется в РИНЦ, Научной электронной библиотеке «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:	30.09.2024

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Anna A. Dyadicheva*

Corrector: *Oksana V. Ermikhina*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova*

Layout: *Alina Y. Baykova*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

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

И.Т. Мирсаяпов, Г.Т. Апхадзе
Сопротивление сжатых с малым эксцентриситетом элементов с учетом фактической высоты сжатой
зоны бетона 1435

В.В. Надольский
Метод коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных
конструкций 1444

А.В. Алексейцев, М.Д. Антонов
Сопротивляемость прогрессирующему разрушению монолитных каркасов зданий при локальных
повреждениях узлов от продавливания 1454

Д.Н. Лазовский, А.И. Гиль, Д.О. Глухов
Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов 1469

В.Н. Должиков, Е.Н. Должикова
Экспериментальные исследования влияния деформаций в узловых соединениях на напряженно-
деформированное состояние в натурной опоре из МИК-С 1484

А.Б. Барыкин, Б.Ю. Барыкин, Е.В. Зеленин
Разработка методики расчета перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании,
осложненного карстово-провальными процессами 1494

О.В. Кабанцев, А.Е. Лапишинов
Обзор мирового опыта по проведению натурных испытаний существующих железобетонных
конструкций 1505

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.А. Ермаков, А.И. Сафин, А.И. Родин
Звукопоглощающие свойства пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород 1521

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А.З. Тер-Мартиросян, Г.О. Анжело, Л.Ю. Ермошина, И.А. Боков
Влияние коэффициента неравномерности расширения образца глинистого грунта на механические
характеристики 1530

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Л. Торопов
Подготовка горячей воды в автономных системах теплоснабжения с несколькими точками
водоразбора 1541

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Д.Н. Шишкина
Оценка экономической эффективности применения искусственного интеллекта в строительстве:
выбор оптимального метода 1550

Т.Х. Бидов, А.О. Хубаев, Е.А. Помытко, А.Д. Котельникова
Методика оценки факторов, влияющих на эффективность реализации строительного проекта
генподрядной организацией в направлении Fit-out 1562

Требования к оформлению научной статьи 1570

CONTENTS

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

Ilshat T. Mirsayapov, Georgiy T. Apkhadze
Resistance of compressed elements with small eccentricity taking into account actual height of the compressed concrete zone 1435

Vitali V. Nadolski
Method of reliability coefficients with adjustable values for steel structures design 1444

Anatoly V. Alekseytsev, Mikhail D. Antonov
Resistance to progressive collapse of monolithic frames of buildings at localized damage of nodes from push-through 1454

Dzmitry N. Lazouski, Artur I. Hil, Dzmitry O. Hlukhau
Deformation approach to the calculation of compressive strength of steel-reinforced concrete elements 1469

Vladimir N. Dolzhikov, Elena N. Dolzhikova
Experimental studies of the influence of deformations in nodal joints on the stress-strain state in a full-scale support made of MIC-C 1484

Alexander B. Barykin, Boris Yu. Barykin, Evgeniy V. Zelenin
Development of the calculation methodology of cross-beam foundation on the sloping base complicated by karst and sinkhole processes 1494

Oleg V. Kabantsev, Andrey E. Lapshinov
A review of the world experience in full-scale testing of existing reinforced concrete structures 1505

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Anatoly A. Ermakov, Artur I. Safin, Alexander I. Rodin
Sound-absorbing properties of porous glass ceramics from zeolite-containing rocks 1521

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Armen Z. Ter-Martirosyan, Georgiy O. Anzhelo, Lyubov Yu. Ermoshina, Ilia A. Bokov
Influence of the coefficient of non-uniformity of expansion of clay soil specimen on mechanical characteristics 1530

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Alexey L. Toropov
Hot water treatment in autonomous heat supply systems with several water intake points 1541

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION.
ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Darya N. Shishkina
Assessment of economic efficiency of artificial intelligence application in construction: the choice of the optimal method 1550

Tembot Kh. Bidov, Alan O. Khubaev, Egor A. Pomytko, Alina D. Kotelnikova
Methodology of evaluating of factors affecting the efficiency of construction project implementation by general contracting organization in Fit-out direction 1562

Requirements for research paper design 1570

1433

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 624.071.34
DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1435-1443

Сопротивление сжатых с малым эксцентриситетом элементов
с учетом фактической высоты сжатой зоны бетона

Илшат Талгатович Мирсаяпов, Георгий Татеозович Апхадзе
Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Несущая способность при расчете по методу предельных усилий нормальных сечений внецентренно сжатых железобетонных конструкций при малых эксцентриситетах, согласно действующим нормативным документам, определяется с учетом линейной аппроксимации нелинейной зависимости напряжений в растянутой арматуре от высоты сжатой зоны. Данный подход является в значительной степени упрощенным и приводит в некоторых случаях к необоснованному завышению несущей способности элементов. Цель исследования — аналитическим путем получить наиболее универсальную и точную зависимость для определения высоты сжатой зоны бетона, напряжений в растянутой арматуре и, как следствие, уточнить величину предельной несущей способности нормального сечения внецентренно сжатых элементов при разрушении по бетону сжатой зоны. Задачи исследования: аналитическое получение зависимости для высоты сжатой зоны бетона в сечении в предельном состоянии; сравнение получаемой несущей способности с учетом полученной зависимости с наиболее простой зависимостью, принятой в нормативных документах, а также с результатами расчетов по нелинейной деформационной модели; установление степени необоснованного завышения несущей способности внецентренно сжатых железобетонных конструкций с малыми эксцентриситетами в действующих нормативных документах.

Материалы и методы. Приняты основные методики, применяемые в современной теории прочности бетона и железобетона.

Результаты. Аналитическое выражение для высоты сжатой зоны получено на основании упрощенной трехлинейной диаграммы деформирования бетона при сжатии. Обоснованное уточнение высоты сжатой зоны позволяет достичь максимальной сходимости с результатами расчетов по нелинейной деформационной модели без применения итерационных подходов в решении задачи.

Выводы. Предлагаемые аналитические зависимости дают возможность определить фактическое напряженно-деформированное состояние в нормальных сечениях внецентренно сжатых железобетонных элементов при действии малых эксцентриситетов приложения продольного сжимающего усилия в предельном состоянии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетон, железобетонные конструкции, внецентренно сжатые конструкции, нелинейная деформационная модель, диаграмма деформирования бетона

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мирсаяпов И.Т., Апхадзе Г.Т. Сопротивление сжатых с малым эксцентриситетом элементов с учетом фактической высоты сжатой зоны бетона // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1435–1443. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1435-1443

Автор, ответственный за переписку: Георгий Татеозович Апхадзе, georgevt@yandex.ru.

Resistance of compressed elements with small eccentricity taking
into account actual height of the compressed concrete zone

Ilshat T. Mirsayapov, Georgiy T. Apkhadze
Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The load-bearing capacity of normal sections of eccentrically compressed reinforced concrete structures at small eccentricities, according to current regulatory documents, is determined taking into account the linear approximation of the nonlinear dependence of stresses in tensile reinforcement on the height of the compressed zone. This approach is largely simplified and in some cases leads to an unreasonable overestimation of the bearing capacity of elements. The aim of the study is to obtain analytically the most universal and accurate dependence for determining the height of the compressed zone of concrete, the stresses in tensile reinforcement and, as a result, to clarify the value of the maximum bearing

capacity of the normal section of eccentrically compressed elements during destruction of the compressed zone in concrete. Objectives of the research: analytical obtaining the dependence for the height of the compressed zone of concrete in the section in the limit state; comparison of the obtained load-bearing capacity, taking into account the obtained dependence, with the simplest dependence adopted in regulatory documents, as well as with the results of calculations using a nonlinear deformation model; determination of the degree of unreasonable overestimation of the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete structures with small eccentricities in current regulatory documents.

Materials and methods. The main methods used in the modern theory of concrete and reinforced concrete strength were adopted.

Results. The analytical expression for the height of the compressed zone is obtained based on the simplified three-linear diagram of the deformation of concrete under compression. Reasonable refinement of the height of the compressed zone makes it possible to achieve maximum convergence with the results of calculations using a nonlinear deformation model without the use of iterative approaches to solving the problem.

Conclusions. The proposed dependencies make it possible to determine the actual stress-strain state in normal sections of eccentrically compressed reinforced concrete elements under the action of small eccentricities of application of the longitudinal compressive force in the limit state.

KEYWORDS: reinforced concrete, reinforced concrete structures, eccentrically compressed structures, nonlinear deformation model, deformation diagram of concrete

FOR CITATION: Mirsayapov I.T., Apkhadze G.T. Resistance of compressed elements with small eccentricity taking into account actual height of the compressed concrete zone. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1435-1443. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1435-1443 (rus.).

Corresponding author: Georgiy T. Apkhadze, georgevt@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, расчет нормальных сечений внецентренно сжатых конструкций согласно действующим нормативным документам¹ по методу предельных усилий сводится к определению высоты сжатой зоны бетона из рассмотрения равенства проекций, действующих сжимающих и растягивающих внутренних усилий на продольную ось элемента при замене криволинейной фактической эпюры сжатой зоны бетона, эквивалентной прямоугольной. При этом, в отличие от изгибаемых конструкций, разрушение внецентренно сжатых элементов во многих случаях происходит по сжатой зоне сечения от раздробления сжатого бетона (случай малых эксцентриситетов приложения продольного усилия).

Применение подхода деформационной расчетной модели нормального сечения к внецентренно сжатым элементам впервые был предложен А.С. Залесовым и Е.А. Чистяковым [1]. Впоследствии были проведены множественные исследования по корректному использованию итерационных подходов нелинейной деформационной модели к решению задачи по определению несущей способности таких элементов [2–8]. Среди зарубежных трудов, рассматривающих деформационную модель нормального сечения, в том числе применительно к внецентренно сжатым железобетонным элементам, стоит отметить исследования [9–11].

Многие экспериментальные исследования особенностей напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых элементов и сопротивления их нормальных сечений были выполнены и в нашей стране, среди них опытные работы [12–14]. Изучено

влияние различных параметров на несущую способность сжатых с эксцентриситетами элементов [15, 16].

Попытка применить упрощенную деформационную модель для внецентренно сжатых с малыми эксцентриситетами элементов предпринята Т.А. Мухамедиевым [17, 18]. Метод использования упрощенного подхода к решению деформационной постановки задач для случаев разрушения по сжатой зоне бетона с модифицированной кусочно-линейной диаграммой представлен авторами в публикациях [19, 20].

В случае малых эксцентриситетов приложения продольного усилия к железобетонному элементу напряжения в растянутой арматуре не достигают предела текучести стали, что необходимо учитывать в расчетной методике. Для этого в методе предельных усилий в действующих нормативных документах¹ принята предложенная Е.А. Чистяковым [21] линейная аппроксимация нелинейной зависимости между напряжениями в растянутой арматуре и относительной высотой сжатой зоны в интервале от ξ_R до 1,0. Данная аппроксимация представлена графически для арматуры класса А500 на рис. 1.

Линейная аппроксимация этой зависимости описывается выражением:

$$\sigma_s = R_s - \frac{\xi - \xi_R}{1 - \xi_R} (R_s + R_{sc}). \quad (1)$$

При этом выражение для определения высоты сжатой зоны бетона для случая малого эксцентриситета приложения нагрузки (при $\xi > \xi_R$) преобразуется к следующему виду:

$$x = \frac{N + A_s \frac{R_s + R_{sc} \xi_R}{1 - \xi_R} - R_{sc} A_s'}{R_b b + \frac{(R_s + R_{sc}) A_s}{h_0 (1 - \xi_R)}}. \quad (2)$$

¹ СП 63.13330.2018. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М. : Минстрой России, 2018.

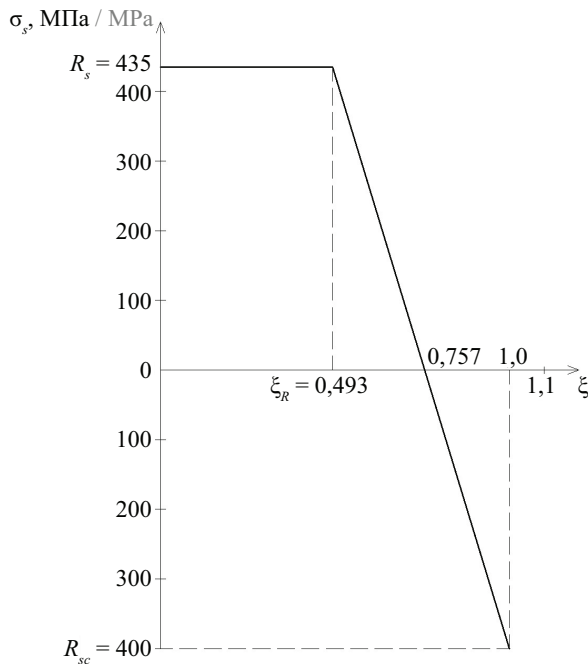


Рис. 1. Линейная аппроксимация нелинейной зависимости σ_s от ξ для арматуры класса А500

Fig. 1. Linear approximation of the nonlinear dependence of σ_s on ξ for reinforcement class of А500

Однако в нормативном документе¹ выражение (2) преобразовано к виду, при котором $R_s = R_{sc}$, что, очевидно, не всегда так с учетом того, что напряжения в сжатой арматуре ограничиваются напряжениями, соответствующими деформациям в вершине диаграммы сжатого бетона $\varepsilon_{b0} = 0,002$ (для стержневой арматуры класса А500 и выше $R_{sc} = 400$ МПа):

$$x = \frac{N + R_s A_s \frac{1 + \xi_R}{1 - \xi_R} - R_{sc} A'_s}{R_b b + \frac{2 R_s A_s}{h_0 (1 - \xi_R)}}. \quad (3)$$

Сравнение значений коэффициента полноты эпюры в сжатой зоне бетона ω

Comparison of plot completeness coefficient values in the compressed concrete zone ω

Метод Method	Коэффициент полноты эпюры сжатой зоны при классе бетона Coefficient values in the compressed concrete zone								
	B10	B15	B20	B25	B30	B35	B40	B50	B60
1	0,845	0,843	0,841	0,838	0,836	0,834	0,832	0,828	0,824
2	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
3	0,786	0,786	0,786	0,786	0,786	0,786	0,786	0,786	0,786
4	0,859	0,855	0,850	0,844	0,841	0,837	0,833	0,824	0,814
5	0,873	0,866	0,857	0,849	0,844	0,839	0,834	0,824	0,814

Примечание: 1 — экспериментальная зависимость² [22]; 2 — значения, приведенные в действующем нормативном документе¹; 3 — двухлинейная диаграмма деформирования бетона¹; 4 — трехлинейная диаграмма деформирования бетона¹; 5 — криволинейная диаграмма деформирования бетона (СП 63.13330.2018, прил. Г¹) [23].

Note: 1 — experimental dependence² [22]; 2 — values given in the current normative document¹; 3 — two-line diagram of concrete deformation¹; 4 — three-line diagram of concrete deformation¹; 5 — curvilinear diagram of concrete deformation (CP 63.13330.2018, appendix G¹) [23].

² СНиП 2.03.01–84*. Бетонные и железобетонные конструкции. М. : Госстрой СССР, 1989.

При этом замена R_{sc} на R_s в выражении (2) не приводит к какому-либо значительному влиянию на изменение величины сжатой зоны бетона для прямоугольной эпюры. Поэтому в нормативных документах принята окончательная форма выражения для определения x по уравнению (3). Следует отметить, что зависимость (1) была получена на основании экспериментальных исследований на элементах из бетонов классов по прочности до В30 и арматуре классов А240–А400.

Таким образом, в действующих нормативных документах¹ приняты две основные расчетные предпосылки, позволяющие получить достаточно простую зависимость (3): замена фактической криволинейной эпюры в сжатой зоне бетона прямоугольной и линейная зависимость между напряжениями в растянутой арматуре и высотой сжатой зоны бетона за пределами граничной высоты. Каждая из указанных расчетных предпосылок приводит к погрешности вычисления фактической предельной несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента в сравнении с предельной несущей способностью, получаемой по результатам расчетов на основе нелинейно-деформационной модели нормального сечения.

Для устранения данного расхождения результатов расчета основной целью ставится получение аналитического выражения для определения фактической высоты сжатой зоны бетона на основе наиболее близкой к криволинейной, трехлинейной диаграммы деформирования, представленной в СП 63.13330¹.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным преимуществом принятой в данной работе для дальнейшего исследования трехлинейной диаграммы является хорошее совпадение описываемой формой диаграммы величины внутренней энергии деформирования бетона в сравнении с опытными кривыми деформирования, что может быть хорошо

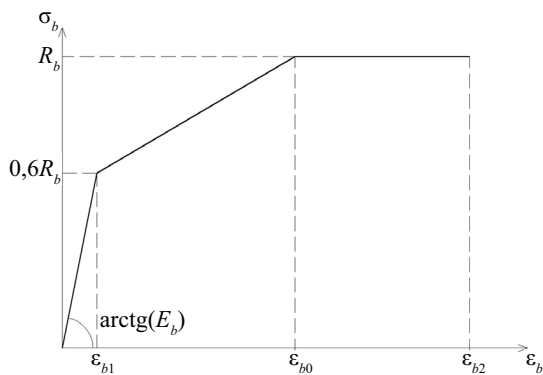


Рис. 2. Нормированная трехлинейная диаграмма деформирования сжатого бетона

Fig. 2. Three-line diagram of compressed concrete deformation

оценено сравнением площадей, ограничиваемых рассматриваемой диаграммой, или коэффициентом полноты эпюры в сжатой зоне (таблица).

Как видно из таблицы и рис. 2, среднее расхождение коэффициента полноты эпюры, а значит и значений внутренней энергии деформирования бетона, принятой далее в расчетной методике трехлинейной диаграммы деформирования (рис. 3), относительно экспериментальных данных [22] составляет менее 0,5 %. Расхождение между значениями, вычисленными по более сложной и совершенной криволинейной диаграмме деформирования, и опытными значениями [22] — 1,0 %.

Рассмотрим нормальное сечение внецентренно сжатого элемента с малым эксцентриситетом приложения продольного усилия при трехлинейной эпюре в сжатой зоне бетона (рис. 3). Очевидно, что эпюра в сжатой зоне бетона будет полностью повторять

принятую в методике диаграмму деформирования, представленную на рис. 2. В сечении при достижении максимума несущей способности неизвестными являются две величины: полная высота сжатой зоны бетона и напряжения в арматуре у растянутой грани сечения, которые связаны между собой следующим соотношением, получаемым исходя из гипотезы сохранения плоского поворота нормального сечения:

$$\sigma_s = \frac{h_0 - x}{x} E_s \epsilon_{b2}; \tag{4}$$

$$\sigma_s^I = \frac{x - a_s^I}{x} E_s \epsilon_{b2}. \tag{5}$$

Запишем уравнение равенства внешних и внутренних усилий на продольную ось элемента:

$$N - (0,3x_1 + 0,8x_2 + x_3) R_b b - \sigma_s^I A_s^I + \sigma_s A_s = 0, \tag{6}$$

где

$$x_1 = \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_{b2}} x; \tag{7}$$

$$x_2 = \frac{\epsilon_{b0} - \epsilon_{b1}}{\epsilon_{b2}} x; \tag{8}$$

$$x_3 = \frac{\epsilon_{b2} - \epsilon_{b0}}{\epsilon_{b2}} x. \tag{9}$$

Уравнение (6) с учетом зависимостей (4), (5) представляет собой квадратное уравнение относительно одной неизвестной — полной высоты сжатой зоны бетона x . В совместном решении уравнения (6), уравнений (4), (5) и (7)–(9) зависимость для определения полной высоты сжатой зоны бетона запишется следующим образом:

$$x = \frac{N - E_s \epsilon_{b2} (A_s + A_s^I) + \sqrt{(N - E_s \epsilon_{b2} (A_s + A_s^I))^2 + 4 E_s R_b b (A_s h_0 + A_s^I a_s^I) (\epsilon_{b2} - 0,2 \epsilon_{b0} - 0,5 \epsilon_{b1})}}{2 R_b b \left(1 - 0,2 \frac{\epsilon_{b0}}{\epsilon_{b2}} - 0,5 \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_{b2}} \right)}. \tag{10}$$

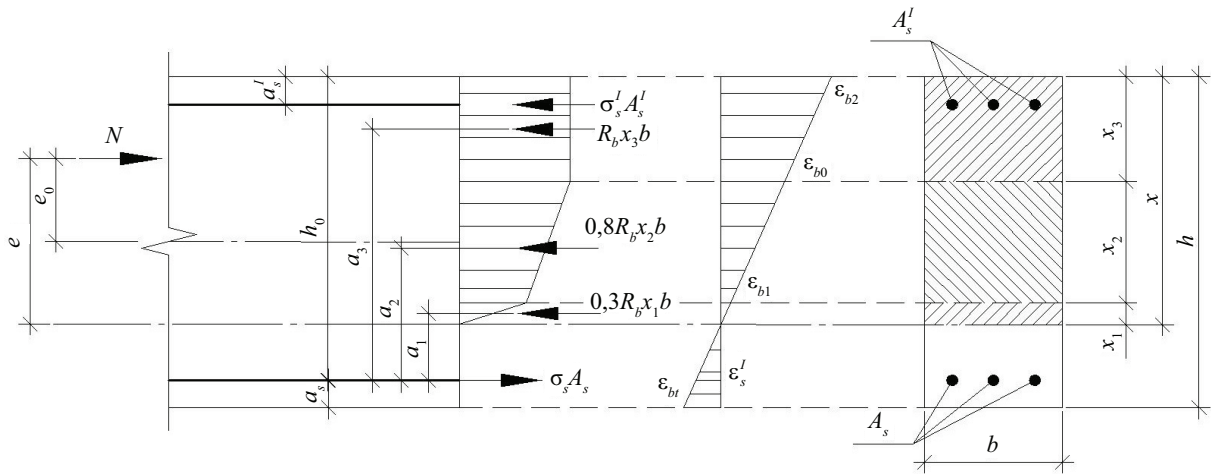


Рис. 3. Схема к определению усилий, напряжений и относительных деформаций в нормальном сечении

Fig. 3. Scheme for determining forces, stresses and relative deformations in a normal section

Упрощая выражение (10) и принимая $E_s = 2 \cdot 10^6$ МПа, $\varepsilon_{b0} = 2,0 \cdot \text{мм/м}$, $\varepsilon_{b2} = 3,5 \cdot \text{мм/м}$, $\varepsilon_{b1} = 0,6 \cdot R_b/E_b$, запишем упрощенную форму выражения для установления полной высоты сжатой зоны бетона x для предлагаемой методики:

$$x = \frac{N - 700(A_s + A'_s) + \sqrt{(N - 700(A_s + A'_s))^2 + 2800 \cdot R_b b (A_s h_0 + A'_s a'_s)(0,885 - 85 R_b/E_b)}}{2 R_b b (0,885 - 85 R_b/E_b)}. \quad (11)$$

В случае симметричного армирования выражение (11) приводится к следующему упрощенному виду:

$$x = \frac{N - 1400 \cdot A_s + \sqrt{(N - 1400 \cdot A_s)^2 + 2800 \cdot R_b b A_s h (0,885 - 85 R_b/E_b)}}{2 R_b b (0,885 - 85 R_b/E_b)}. \quad (12)$$

Для определения предельной несущей способности необходимо вычислить расстояния от центра тяжести растянутой арматуры до центра тяжести каждого участка эпюры в сжатой зоне a_1, a_2, a_3 (рис. 3). Однако в этом случае получаемое выражение для определения предельного момента относительно центра тяжести растянутой арматуры значительно усложняется.

С целью упрощения расчетного выражения по установлению предельного изгибающего момента, воспринимаемого сечением относительно центра тяжести растянутой арматуры, перейдем от полной высоты сжатой зоны бетона к условной высоте сжатой зоны с прямоугольной эпюрой через коэффициент полноты эпюры в сжатой зоне (таблица), который определяется из равенства площадей прямоугольной и кусочно-линейной эпюры в сжатой зоне (рис. 3). Для принятой трехлинейной диаграммы коэффициент полноты эпюры определяется выражением:

$$\omega = 1 - 0,2 \frac{\varepsilon_{b0}}{\varepsilon_{b2}} - 0,5 \frac{\varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{b2}}, \quad (13)$$

где $\varepsilon_{b1} = \frac{0,6 R_b}{E_b}$; $\varepsilon_{b0} = 0,002$; $\varepsilon_{b2} = 0,0035$ — фиксированные для данного класса бетона параметрические точки диаграммы деформирования сжатого бетона.

После введения значений параметрических точек трехлинейной диаграммы в формулу (13) коэффициент полноты эпюры в сжатой зоне ω с достаточной точностью окончательно будет равен:

$$\omega = 0,885 - 85 R_b/E_b. \quad (14)$$

Рассматривая расчетное сечение (рис. 3), составим упрощенное выражение для определения предельного изгибающего момента, воспринимаемого нормальным сечением с учетом замены фактической кусочно-линейной эпюры на прямоугольную для предлагаемой методики метода предельных усилий:

$$M_{ult} = R_b b \omega x (h_0 - 0,5 \omega x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a'_s). \quad (15)$$

Или с учетом выражения (14) для коэффициента полноты эпюры в сжатой зоне ω :

$$M_{ult} = R_b b x (0,885 - 85 R_b/E_b) \times (h_0 - 0,5 x (0,885 - 85 R_b/E_b)) + R_{sc} A'_s (h_0 - a'_s). \quad (16)$$

Таким образом, условие прочности нормального сечения железобетонного элемента, сжатого с малым эксцентриситетом при $\xi > \xi_R$, представляется в следующем виде:

$$N \cdot \left(e_0 \eta + \frac{h_0 - a'_s}{2} \right) \leq \left(0,885 - 85 \frac{R_b}{E_b} \right) R_b b x \times \left(h_0 - 0,5 \left(0,885 - 85 \frac{R_b}{E_b} \right) x \right) + R_{sc} A'_s (h_0 - a'_s), \quad (17)$$

где полная высота сжатой зоны x определяется для симметричного армирования элемента по выражению (12), а для несимметричного армирования элемента по выражению (11).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты по определению несущей способности внецентренно сжатых с малым эксцентриситетом приложения продольного усилия железобетонных элементов при разном проценте армирования, прочности бетона и эксцентриситете приложения нагрузки, получаемые по зависимостям (12), (17), в сравнении с результатами, получаемыми по формуле (3), представлены на рис. 4.

В качестве эталонных значений предельной несущей способности на рис. 4 приняты значения, получаемые по нелинейной деформационной модели с криволинейной диаграммой деформирования бетона в сжатой и растянутой зонах, которая представлена в приложении Γ^1 (черная штрихпунктирная линия). Всего было рассмотрено 50 различных вариаций безразмерного условного параметра $R_s A_s / R_b b h_0$ при трех величинах эксцентриситета приложения вертикального усилия $e = 0,2h, 0,4h$ и $0,6h$.

Горизонтальными штриховыми линиями на рис. 4 показаны средние значения отклонений получаемых результатов в сравнении с нелинейной деформационной моделью нормального сечения среди всей выборки результатов для обеих методик. Для общей рассмотренной выборки среднее значение отношения предельной продольной силы N_{ult} и предельной продольной силы, вычисленной согласно нелинейной деформационной модели, составило:

- 1,022 при среднеквадратичном отклонении 0,186 — при расчете по условной высоте сжатой зоны (3);

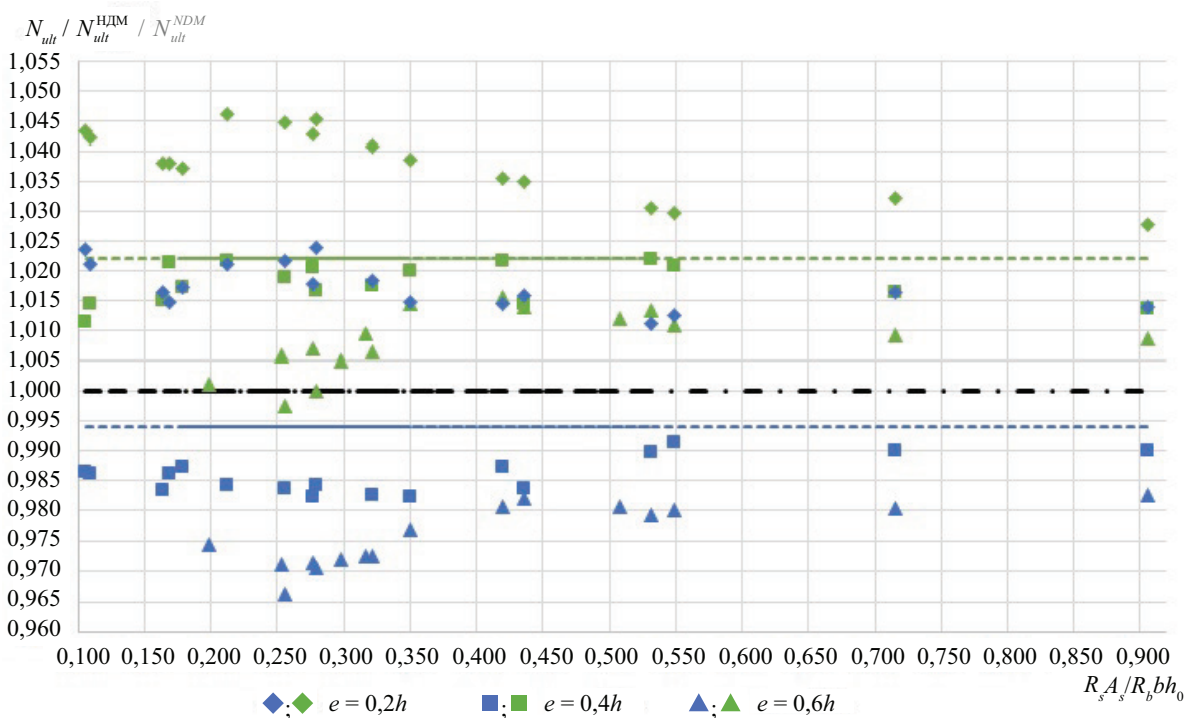


Рис. 4. Сравнение значений предельной продольной силы, вычисленной по зависимостям метода предельных усилий СП 63.13330¹ (зеленым цветом) и зависимостям (12), (17) (синим цветом), с результатами, полученными по нелинейной деформационной модели при различных малых эксцентриситетах

Fig. 4. Comparison of the values of the limiting longitudinal force calculated from the dependencies of the limiting force method CP 63.13330¹ (in green) and dependencies (12), (17) (in blue) in comparison with the results obtained from the nonlinear deformation model at various small eccentricities

• 0,994 при среднеквадратичном отклонении 0,139 — при расчете по фактической высоте сжатой зоны (12).

В целом результаты, получаемые при вычислении предельной несущей способности внецентренно сжатых с малым эксцентриситетом элементов, близки для обеих рассмотренных зависимостей. Однако использование экспериментальной зависимости (3) в некоторых случаях приводит к переоценке несущей способности элементов до 5,0 %. Применение зависимости (12) для определения полной высоты сжатой зоны и зависимости (17) для вычисления предельной несущей способности не приводит к переоценке или недооценке несущей способности внецентренно сжатого элемента более 2,5 % или более 3,5 % соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение аналитического выражения для определения фактической высоты сжатой зоны бетона, полученного на основе нормируемой трехлинейной диаграммы деформирования сжатого бетона, при расчете прочности нормальных сечений внецентренно сжатых элементов для случаев малых эксцентриситетов позволяет достичь максимальной сходимости с результатами расчетов по нелинейной деформационной модели без необходимости использования итерационных подходов в решении задачи.

Предлагаемая расчетная методика может быть применима в качестве замены существующего нормативного подхода метода предельных усилий применительно к внецентренно сжатым железобетонным элементам для случаев малых эксцентриситетов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Залесов А.С., Чистяков Е.А., Ларичева И.Ю. Деформационная расчетная модель железобетонных элементов при действии изгибающих моментов и продольных сил // Бетон и железобетон. 1996. № 5. С. 16–18. EDN XMVQDB.
2. Горбатов С.В., Смирнов С.Г. Расчет прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов

прямоугольного сечения на основе нелинейной деформационной модели // Вестник МГСУ. 2011. № 2–1. С. 72–76. EDN OUVYNH.
3. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К расчету прочности, жесткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформацион-

ной модели // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4 (26). С. 113–120. EDN RSTDVV.

4. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. Проектирование бетонных, железобетонных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчета. М. : Изд-во АСВ, 2023. 194 с.

5. Радайкин О.В. Развитие теории диаграммного метода расчета стержневых элементов из армированного бетона : дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2023. 471 с. EDN HGRDMK.

6. Старишко И.Н. Расчет несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов при различных значениях эксцентриситетов приложения продольных сил // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 5. С. 21–33. EDN UGJXFB.

7. Старишко И.Н. Теории и примеры расчета прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов прямоугольного сечения // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 4. С. 94–103. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-4-94-103. EDN JEOZYT.

8. Шевченко А.В., Давидюк А.А., Баглаев Н.Н. Метод итераций для расчета железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 3. С. 13–18. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.13-18. EDN PJZDHL.

9. Al-Noury S.I., Chen W.F. Behavior and design of reinforced and composite concrete sections // Journal of the Structural Division. 1982. Vol. 108. Issue 6. Pp. 1266–1284. DOI: 10.1061/jsdeag.0005965

10. Bentz E.C. Sectional analysis of reinforced concrete members : PhD thesis. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, ON, Canada, 2000.

11. Sargin M. Stress-strain relationship for concrete and the analysis of structural concrete sections // Stud; No. 4, Solid Mechanics Division. University of Waterloo. Ontario, Canada, 1971.

12. Кузьмичев А.Е. Исследование влияния пластических деформаций сжатого бетона на перераспределение усилий в железобетонных рамах // Труды НИИЖБ. Вып. 17. Исследования по теории железобетона. М. : Госстройиздат, 1960.

13. Кротовский С.С. Экспериментальное исследование жесткости внецентренно сжатых железобетонных элементов // Труды НИИЖБ. Вып. 4. М. : Госстройиздат, 1959.

14. Мордовский С.С., Мурашкин В.Г. Напряженное состояние экспериментальных образцов при внецентренном нагружении // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 137. EDN PBQYZ.

15. Веретенников В.И., Бармотин А.А. О влиянии размеров и формы сечения элементов на диаграмму деформирования бетона при внецентренном сжатии // Бетон и железобетон. 2000. № 5. С. 27–30.

16. Маляев Д.Р. Влияние армирования и эксцентриситета сжимающего усилия на деформативность бетона и характер диаграммы сжатия // Вопросы прочности, деформативности и трещиностойкости железобетона. Ростов н/Д : РИСИ, 1979. С. 70–82.

17. Мухамедиев Т.А., Майоров С.А. Расчет прочности внецентренно сжатых бетонных элементов с композитной полимерной арматурой // Вестник НИЦ Строительство. 2022. № 2 (33). С. 150–160. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-2(33)-150-160. EDN FEVEFI.

18. Мухамедиев Т.А., Кузеванов Д.В. К вопросу расчета внецентренно сжатых железобетонных элементов по СНиП 52-01 // Бетон и железобетон. 2012. № 2. С. 21–24. EDN PNDZMQ.

19. Mirsayapov I.T., Apkhadze G.T. Modified trilinear stress-strain diagram of concrete designed for calculation of beams with fiberglass rebar // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 890. Issue 1. P. 012079. DOI: 10.1088/1757-899x/890/1/012079

20. Мирсаяпов Ил.Т., Анхадзе Г.Т. Прочность нормального сечения перестроенных изгибаемых элементов с полимерной композитной арматурой с учетом нисходящей ветви диаграммы деформирования бетона // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : мат. Всерос. науч.-техн. конф. 2019. С. 170–172. EDN OUDFTM.

21. Чистяков Е.А. Основы теории, методы расчета и экспериментальные исследования несущей способности сжатых железобетонных элементов при статическом нагружении : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1968.

22. Гвоздев А.А. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. М. : Стройиздат, 1978. 207 с.

23. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 416 с.

Поступила в редакцию 1 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 14 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 14 июня 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Илшат Талгатович Мирсаяпов** — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций; **Казанский государственный архитектурно-строительный уни-**

верситет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 621651, Scopus: 57218826227, ResearcherID: G-7228-2019, ORCID: 0000-0003-4902-6167; mirsayapovit@mail.ru;

Георгий Татоезович Апхадзе — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 1216362, ORCID: 0009-0004-9868-3790; georgevt@yandex.ru.

Вклад авторов: авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zalesov A.S., Chistyakov E.A., Laricheva I.Yu. Deformation calculation model of reinforced concrete elements under the action of bending moments and longitudinal forces. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1996; 5:16-18. EDN XMVQDB. (rus.).
2. Gorbatov S.V., Smirnov S.G. Design of strength eccentric compression reinforced concrete elements of rectangular section on the basis of nonlinear deformation model. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 2-1:72-76. EDN OUVYNH. (rus.).
3. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaikin O.V. Calculation of strength, stiffness and crack resistance of eccentrically compressed reinforced concrete elements using non-linear deformation model. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2013; 4(26):113-120. EDN RSTDVV. (rus.).
4. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaikin O.V. *Design of concrete, reinforced concrete and reinforced masonry elements and structures using diagrammatic calculation methods*. Moscow, ASV Publishing House, 2023; 194. (rus.).
5. Radaikin O.V. *Development of the theory of the diagrammatic method for calculating rod elements made of reinforced concrete : dissertation ... Doctor of Technical Sciences*. Kazan, 2023; 471. EDN HGRDMK. (rus.).
6. Starishko I.N. Analysis of carrying capacity of eccentric compressed reinforced concrete blocks under different values of eccentricities of longitudinal forces. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2015; 5:21-33. EDN UGJXFB. (rus.).
7. Starishko I.N. Methods for determining the strength of eccentrically compressed reinforced concrete rectangular sections. *Academia. Architecture and Construction*. 2019; 4:94-103. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-4-94-103. EDN JEOZYT. (rus.).
8. Shevchenko A.V., Davidiyuk A.A., Baglaev N.N. Iteration method for the calculation of reinforced concrete elements based on a nonlinear deformation model. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 3:13-18. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.13-18. EDN PJZDHL. (rus.).
9. Al-Noury S.I., Chen W.F. Behavior and design of reinforced and composite concrete sections. *Journal of the Structural Division*. 1982; 108(6):1266-1284. DOI: 10.1061/jsdeag.0005965
10. Bentz E.C. *Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members : PhD Thesis*. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, ON, Canada, 2000.
11. Sargin M. Stress-Strain relationships for concrete and the analysis of structural concrete section. *Stud. No. 4, Solid Mechanics Division*. University of Waterloo, Ontario, Canada, 1971.
12. Kuzmichev A.E. Study of the influence of plastic deformations of compressed concrete on the redistribution of forces in reinforced concrete frames. *Proceedings of NIIZhB. Vol. 17. Research on the theory of reinforced concrete*. Moscow, Gosstroyizdat, 1960. (rus.).
13. Krotovsky S.S. Experimental study of the rigidity of eccentrically compressed reinforced concrete elements. *Proceedings of NIIZhB. Vol. 4*. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1959. (rus.).
14. Mordovskiy S.S., Murashkin V.G. Stress state of experimental designs for loading eccentric. *Modern Problems of Science and Education*. 2012; 4:137. EDN PBIQYZ. (rus.).
15. Veretennikov V.I., Barmotin A.A. On the influence of the dimensions and cross-sectional shape of elements on the stress-strain diagram of concrete under eccentric compression. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2000; 5:27-30. (rus.).
16. Mailyan D.R. The influence of reinforcement and eccentricity of compressive force on the deformability of concrete and the nature of the compression diagram. *Questions of strength, deformability and crack resistance of reinforced concrete*. Rostov-on-Don, RISI, 1979; 70-82. (rus.).
17. Mukhamediev T.A., Maiorov S.A. Strength calculation of eccentrically compressed concrete elements with a composite polymer reinforcement. *Bulletin of the Scientific Research Center "Construction"*. 2022; 2(33):150-160. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-2(33)-150-160. EDN FEVEFI. (rus.).
18. Mukhamediev T.A., Kuzevanov D.V. On the issue of calculating eccentrically compressed reinforced concrete elements according to SNiP 52-01. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2012; 2:21-24. EDN PNDZMQ. (rus.).
19. Mirsayapov I.T., Apkhadze G.T. Modified trilinear stress-strain diagram of concrete designed for

calculation of beams with fiberglass rebar. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 890(1):012079. DOI: 10.1088/1757-899x/890/1/012079

20. Mirsayapov I.T., Apkhadze G.T. Strength of the normal section of re-reinforced bending elements with polymer composite reinforcement taking into account the descending branch of the concrete deformation diagram. *Durability of building materials, products and structures : materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2019; 170-172. EDN OUDFTM. (rus.).

21. Chistyakov E.A. *Fundamentals of theory, calculation methods and experimental studies of the load-bearing capacity of compressed reinforced concrete elements under static loading : dissertation ... Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 1968. (rus.).

22. Gvozdev A.A. *New in the design of concrete and reinforced concrete structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978; 207. (rus.).

23. Karpenko N.I. *General models of reinforced concrete mechanics*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996; 416. (rus.).

Received November 1, 2023.

Adopted in revised form on June 14, 2024.

Approved for publication on June 14, 2024.

B I O N O T E S : **Ilshat T. Mirsayapov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RSCI: 621651, Scopus: 57218826227, ResearcherID: G-7228-2019, ORCID: 0000-0003-4902-6167; mirsayapovit@mail.ru;

Georgiy T. Apkhadze — postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RSCI: 1216362, ORCID: 0009-0004-9868-3790; georgevt@yandex.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Метод коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций

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. В качестве базового метода проверки предельных состояний применяется метод коэффициентов надежности с фиксированными значениями коэффициентов (закрепленными/декларируемыми в нормативных документах). Однако есть более общая постановка полувероятностного метода, в рамках которого можно более точно учесть специфику конструкции (например, информацию об изменчивости фактических размеров, свойств материалов и т.д.) и специфику местонахождения (например, сведения о климатических нагрузках). Данный метод получил название метод модифицированных (регулируемых) частных коэффициентов.

Материалы и методы. Исследование направлено на развитие метода коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций и научное обоснование параметров этого метода. Методологическая формулировка метода базируется на определении расчетных значений базисных переменных на основе функции распределения исходя из заданного квантиля. При этом квантиль распределения вычисляется посредством коэффициентов чувствительности базисных переменных метода надежности первого порядка и целевого значения индекса надежности.

Результаты. В общей формулировке описан метод коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций, который позволяет в явном виде учесть целевой уровень надежности и изменчивость базисных переменных. Выполнено научное обоснование коэффициентов чувствительности базисных переменных на основе метода надежности первого порядка и представлены указания по назначению вероятностных моделей случайных величин.

Выводы. Анализ обобщенной функции предельного состояния стального элемента вероятностным методом показал, что коэффициент чувствительности существенно меняется с изменением параметра нагружения (характеризующего долю переменных нагрузок в общей нагрузке), при этом незначительно меняется в зависимости от вида переменной нагрузки. Коэффициенты чувствительности могут быть приняты на основании графиков или упрощенных зависимостей, представленных в исследовании. Консервативно значения коэффициента чувствительности для несущей способности стального элемента можно принять равными 0,6, для постоянного воздействия –0,4 и для переменного воздействия –0,9.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод модифицированных частных коэффициентов, метод регулируемых частных коэффициентов, коэффициент чувствительности, квантиль расчетного значения, коэффициенты надежности, неопределенности, базисные переменные

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. Метод коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1444–1453. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1444-1453

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

Method of reliability coefficients with adjustable values for steel structures design

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. The method of reliability coefficients with fixed values (declared in regulatory documents) is used as a basic method of limit state verification. However, there is a more general formulation of the semi-probabilistic method, within which the specificity of the design (e.g. information on the variability of actual dimensions, material properties, etc.) and the specificity of the location (e.g. information about climatic loads) can be taken into account more accurately. This method is referred to as the modified (adjustable) partial factor method.

Materials and methods. The paper is aimed at the development of the method of reliability coefficients with adjustable values for the design of steel structures and the scientific justification of the parameters of this method. The methodological formulation of this method is based on determining the design values of the basic variables based on the distribution function for a given quantile. In this case, the quantile of the distribution is calculated using the sensitivity coefficients of the basic variables of the first-order reliability method and the target value of the reliability index.

Results. The study describes in a general formulation a method of reliability coefficients with adjustable values for the design of steel structures, which allows explicitly taking into account the target reliability level and variability of the basic variables. In the course of the study, the scientific substantiation of the sensitivity coefficients of the basic variables based on the first-order reliability method was performed and instructions on the purpose of probabilistic models of random variables were presented.

Conclusions. The analysis of the generalized function of the limiting state of the steel element by the probabilistic method showed that the sensitivity coefficients change significantly with the change in the loading parameter (characterizing the ratio of variable loads to the total), while it changes slightly depending on the type of variable load itself. Sensitivity coefficients can be assumed based on graphs or simplified dependencies presented in this study. Conservatively, the sensitivity coefficient values for the bearing capacity of the steel element can be assumed to be 0.6, for constant loading –0.4 and for variable loading –0.9.

KEYWORDS: modified partial factor method, adjustable partial factor method, sensitivity coefficient, quantile of design value, reliability coefficients, uncertainties, basis variable

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

FOR CITATION: Nadolski V.V. Method of reliability coefficients with adjustable values for steel structures design. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1444-1453. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1444-1453 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Общепризнанным методом проектирования строительных конструкций является метод предельных состояний, который дает основу для разделения состояний конструкций на удовлетворяющие и не удовлетворяющие предъявляемым проектным требованиям и позволяет сформировать так называемую функцию состояния $g(\mathbf{X})$, где $\mathbf{X}$ — вектор базисных (стохастических) переменных [1–3]. Учитывая случайную природу базисных переменных, входящих в функцию состояния со стороны воздействий (природная изменчивость воздействия, упрощения в описании приложения нагрузок и т.д.) и несущей способности (природная изменчивость предела текучести и т.д.), для проверки предельных состояний применяют один из трех методов.

1. Вероятностный метод, в рамках которого проверка предельного состояния сводится к прямому сравнению вычисленной вероятности отказа p_f и целевого значения вероятности отказа p_r , регламентированного в нормативных документах, т.е. к выполнению условия:

$$p_f = P(g(\mathbf{X}) < 0) \leq p_r. \quad (1)$$

При этом природная изменчивость базисных переменных и упрощения, погрешности моделей эффектов воздействий и несущей способности учитываются в полной вероятностной постановке. Вероятностный метод проверки предельных состояний — наиболее точный, однако его применение в проектировании сдерживается из-за сложности реализации в повседневном проектировании [4].

2. Метод, основанный на результатах испытаний (физических экспериментов). На основе результатов испытаний часть неопределенностей базисных переменных учитывают или исключают

с помощью статистических методов при определении характеристических или расчетных значений базисных переменных, или прямым подтверждением проверки предельного состояния при испытании на контрольные нагрузки.

3. Полувероятностный метод. В этом случае делается ряд упрощений касательно вероятностных формулировок базисных переменных и собственно способа учета неопределенностей базисных переменных. Проверку предельных состояний производят посредством неравенства вида:

$$E_d \leq R_d, \quad (2)$$

где E_d — расчетное значение воздействия (эффекта воздействия); R_d — расчетное значение несущей способности.

В группу полувероятностных методов проверки предельных состояний входит метод коэффициентов надежности с фиксированными значениями коэффициентов (закрепленными/декларируемыми в нормативных документах) [4, 5]. В рамках метода коэффициентов надежности проверку предельного состояния выполняют в детерминированной постановке, когда неопределенности базисных переменных учитывают коэффициентами надежности; а собственно метод получил название полувероятностный, так как значения частных коэффициентов определены на основании вероятностного метода для репрезентативного набора конструктивных элементов [6]. Но есть более общая постановка полувероятностного метода, в рамках которого можно более точно учесть специфику конструкции (например, информацию об изменчивости фактических размеров, свойств материалов и т.д.) и специфику местонахождения (например, сведения о климатических нагрузках) [4, 5]. В европейской практике

данный метод получил название метод модифицированных (регулируемых) частных коэффициентов [7–10], однако в методологическом плане он представляет собой метод определения расчетных значений базисных переменных на основе функции распределения исходя из заданного квантиля.

Установление расчетных значений базисных переменных на основе функции распределения исходя из заданного квантиля обладает рядом преимуществ. По отношению к полностью вероятностному методу этот способ намного проще в реализации. Относительно метода коэффициентов надежности с фиксированными значениями в рамках данного способа можно в явном виде учесть необходимый уровень надежности и изменчивость базисных переменных [11, 12].

Цель исследования — развитие метода коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций и научное обоснование параметров этого метода. Для реализации поставленной цели решены следующие задачи: формулировка метода; разработка указаний по назначению вероятностных моделей случайных величин; научное обоснование коэффициентов чувствительности базисных переменных на основе метода надежности первого порядка (FORM); и, как следствие, обоснование квантиля расчетных значений базисных переменных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Представлено описание метода регулируемых коэффициентов надежности. Автор не претендует на научную новизну описанного метода, так как считает, что его основы были заложены советскими учеными [1, 2], а делает усилия по его развитию и формированию научно обоснованных исходных данных для использования метода. В рамках этого метода расчетное значение эффекта воздействия от постоянной нагрузки может быть получено следующим образом:

$$G_d \approx \mu_{\theta E} \cdot \mu_g [1 - \alpha_E \beta \sqrt{(V_{\theta E}^2 + V_g^2)}], \quad (3)$$

где $\mu_{\theta E}$, $V_{\theta E}$ — среднее значение и коэффициент вариации неопределенности (погрешности) модели эффекта воздействия; μ_g , V_g — среднее значение и коэффициент вариации постоянной нагрузки; α_E — коэффициент чувствительности метода теории надежности первого порядка (FORM) для эффекта воздействий (для более подробной информации см. СН 2.01.01–2019¹, [2, 4]); β — целевое значение индекса надежности.

Расчетное значение эффекта воздействия от переменной нагрузки в общем случае можно определить по формуле:

$$Q_d = F_{Q, tref}^{-1}[\Phi(-\alpha_E \beta), t_{ref}], \quad (4)$$

¹ СН 2.01.01–2019. Основы проектирования строительных конструкций : введ. 08.09.20. Минск : Минстройархитектуры, 2020. 83 с.

где $F_{Q, tref}^{-1}$ — обратная кумулятивная функция распределения максимумов переменной нагрузки $Q_{t, ref}$ в течение периода отнесения t_{ref} , для которого назначен целевой индекс надежности β .

Общая модель переменного воздействия (нагрузки) может быть записана в виде:

$$Q = \theta_E \theta_q q_{tref}, \quad (5)$$

где θ_E — погрешность модели эффекта воздействия; θ_q — погрешность модели воздействия (не зависящий от времени компонент переменной нагрузки); q_{tref} — переменное воздействие (зависящий от времени компонент переменной нагрузки).

В тех случаях, когда доминирующим источником изменчивости является базисная переменная, подчиняющаяся закону Гумбеля (обычно справедливо для климатических и функциональных нагрузок), расчетное значение можно оценить следующим образом:

$$Q_d \approx \mu_{Q, tref} \cdot \{1 - V_{Q, tref} [0,449 + 0,778 \ln(-\ln \Phi(-\alpha_E \beta))]\}, \quad (6)$$

где $\mu_{Q, tref}$ — среднее значение максимумов переменной нагрузки; $V_{Q, tref}$ — коэффициент вариации максимумов переменной нагрузки.

При этом $\mu_{Q, tref}$ и $V_{Q, tref}$ могут быть представлены общими выражениями:

$$\mu_{Q, tref} \approx \mu_{\theta E} \cdot \mu_{\theta q} \cdot \mu_{q, tref}; \quad (7)$$

$$V_{Q, tref} \approx \sqrt{(V_{\theta E}^2 + V_{\theta q}^2 + V_{q, tref}^2)}. \quad (8)$$

В отдельных случаях может быть более корректным применение логнормального закона для описания эффектов воздействий, например, для воздействий от железнодорожного транспорта, для которых величины, независимые от времени, θ_E и θ_q , являются доминирующим источником изменчивости. Поскольку θ_E и θ_q обычно описываются логнормальным распределением, результирующее распределение эффекта воздействия должно быть близко к логнормальному распределению. Для воздействий, распределяющихся по логнормальному закону, расчетное значение возможно вычислить по формуле:

$$Q_d = \mu_{Q, tref} \cdot \exp(-\alpha_E \beta V_{Q, tref}). \quad (9)$$

Предположения о распределениях базисных переменных можно проверить на основании взаимосвязи между коэффициентом асимметрии и коэффициентом вариации для различных вероятностных распределений.

Для большинства случаев вероятностных расчетов и калибровки частных коэффициентов для стальных конструкций модель несущей способности принимается в виде произведения геометрической характеристики поперечного сечения (площадь, момент сопротивления) на прочностную характеристику стали (предел текучести) [13–15]. Расчетное значение для несущей способности

стальных элементов может быть выражено следующим образом:

$$R_d \approx \mu_{\theta R} \mu_a \mu_{f_y} \exp(-\alpha_R \beta \sqrt{(V_{\theta R}^2 + V_a^2 + V_{f_y}^2)}), \quad (10)$$

где μ — среднее значение случайных величин (базисных переменных); θR — погрешность модели несущей способности; a — геометрическая характеристика сечения; f_y — предел текучести; α_R — коэффициент чувствительности метода FORM для несущей способности.

Для применения описанного метода регулируемых коэффициентов надежности необходимо:

- назначить *статистические параметры базисных переменных* (среднее значение μ и коэффициент вариации V) [15, 16]. Важной задачей является закрепление вероятностных моделей в нормативных документах или пособиях, как, например, это сделано в СН 2.01.01–2019¹. Общие подходы к вероятностному моделированию и обоснование вероятностных моделей нагрузок и воздействий представлены в работах [15, 17–19]. Как правило, статистические параметры зависят от территориальных особенностей рассматриваемого региона и в общем случае должны быть уточнены или определены для рассматриваемого места строительства. Для территории Российской Федерации общие указания можно найти в трудах [20, 21], конкретные указания для территории Республики Беларусь — в публикациях [22, 23]. В настоящем исследовании выполнены уточнения (актуализация) вероятностных моделей воздействий с учетом последних исследований в этой области^{2,3} [24–26];

- задаться значениями коэффициентов чувствительности для базисных переменных, входящих в модели несущей способности и эффектов воздействий. Основное приближение (погрешность) метода регулируемых коэффициентов надежности возникает в назначении коэффициентов чувствительности, так как в общем случае эти коэффициенты зависят от функции предельных состояний и от входящих в нее случайных переменных. Коэффициенты чувствительности указывают на вклад случайной переменной в результирующую изменчивость функции предельного состояния. Значения коэффициентов чувствительности оцениваются на основании метода надежности первого порядка (FORM). Далее выполнен анализ коэффициентов чувствительности для стальных элементов, подверженных воздействию переменных нагрузок, таких как снеговая, ветровая и функциональная.

² CEN TC250/ Ad Hoc Group Reliability of Eurocodes (convenor — Ton Vrouwenvelder) Technical Report for the reliability background of Eurocodes. Draft June 2021. 2021. 165 p.

³ Fikke S., Markova J., Höffer R., Wichura B. Final Report of CEN/ TC250/ SC1 from Apr 2018, Project Team SC1.T5 “Climate Change” (under M 515 between EC and CEN). 2018.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обоснование статистических параметров базисных переменных. Для ветрового воздействия учтены результаты исследования [24]. В отношении статистических характеристик для скоростного напора учтены последние данные [24], где отмечается, что «значение коэффициента вариации годовых максимумов скоростного напора лежит в пределах 0,24–0,85, при среднем значении и стандартном отклонении коэффициента вариации 0,47 и 0,14 соответственно», поэтому в вероятностных моделях были повышены значения коэффициентов вариации скоростного напора по отношению к значениям, принятым в работе [22].

В целом об увеличении неопределенности ветрового воздействия и учащении появления таких редких событий, как торнадо и смерч, отмечено в отчете о климатических изменениях³. Сведения для неопределенности модели ветрового воздействия приняты с учетом отчета², где для обобщенной модели ветрового воздействия (для элементов с грузовой площадью более 10 м²) рекомендуется использовать среднее значение 0,8 и коэффициент вариации 0,25, и с учетом исследования [24], где отмечается, что «значения статистических параметров обобщенного коэффициента “трансформации” находятся в диапазоне 0,64–0,70 и 0,25–0,30 для среднего значения и коэффициента вариации соответственно».

Для снеговой нагрузки, принимая во внимание исследование², уточнены значения статистических характеристик для неопределенности модели снегового воздействия, дополнительно для расширения области анализа влияния неопределенности статистических характеристик их значения приняты в диапазоне интервала. В отчете² представлены статистические параметры модели снеговой нагрузки для разных типов кровель, при этом разделены модели для локальных и общих (с учетом осреднения) снеговых нагрузок. В качестве наиболее репрезентативных значений следует считать данные для плоских и малоуклонных кровель, при этом рекомендуется использовать среднее значение 0,83 и коэффициент вариации 0,16. Для кровель с уклонами кровли 25–30 отмечено увеличение коэффициента вариации до значений 25–30 %, однако при этом уменьшается среднее значение до 0,7–0,75. В работах [25, 26] представлены более высокие значения коэффициентов вариации, но указано, что эти значения получены с учетом коэффициента вариации снеговой нагрузки на грунт.

Результаты исследований статистических параметров базисных переменных, входящих в модели эффектов воздействий, сведены в табл. 1.

Общие подходы к вероятностному моделированию несущей способности стального элемента

Табл. 1. Статистические параметры базисных переменных для модели эффектов воздействий
Table 1. Statistical parameters of the basic variables for the load effects model

Базисные переменные Basic variables	Распределение Distribution	μ/X_k	V , %	Источник Source
Собственный вес Deadload	N	1,0	3–6	[15, 22, 23]
Постоянная нагрузка Permanent load	N	1,0–1,05	7–10	[15, 22, 23]
Полезная нагрузка — 5 лет Imposed load — 5 years	Gum	0,17–0,25	80–115	[15, 23]
Полезная нагрузка — 50 лет Imposed load — 50 years	Gum	0,45–0,6	35–40	[15, 23]
Неопределенность модели полезной нагрузки Uncertainty of the imposed load model	LN	1,0	10	[15, 22, 23]
Снеговая нагрузка — 1 год Snow load — 1 year	Gum	0,34–0,44	48–62	[15]
Снеговая нагрузка — 50 лет Snow load — 50 years	Gum	0,9–1,1	19–23	[15]
Неопределенность модели снеговой нагрузки Uncertainty of the snow load model	LN	0,8–0,9	15–20	[15, 22]
Ветровая нагрузка — 1 год Wind load — 1 year	Gum	0,35–0,52	33–61	[15, 22, 24]
Ветровая нагрузка — 50 лет Wind load — 50 years	Gum	1,0–1,1	16–21	[22, 24]
Неопределенность модели ветрового воздействия Uncertainty of the wind load model	LN	0,7–0,8	25–30	[22, 24]
Неопределенность модели эффектов воздействий Model uncertainty of the load effects	LN	1,0	5–10	[15, 22, 23]

представлены в исследованиях⁴ [15, 22, 23, 27, 28]. В работе [29] для вероятностного описания предела текучести при условиях поставки проката с разных заводов рекомендовано использовать среднее значение отношения фактического значения предела текучести к характеристическому (μ_{fy}/f_y), равное 1,10–1,20, а коэффициент вариации $V_{fy} = 5–8\%$, при этом в качестве средних значений рекомендовано принимать $\mu_{fy}/f_y = 1,15$ и $V_{fy} = 7\%$. Для вероятностного описания предела текучести наиболее часто используют нормальный и логнормальный закон распределения [27].

⁴ JCSS Probabilistic Model Code. Joint Committee of Structural Safety, 2001.

Для геометрических характеристик предлагается применять $\mu_x/X_n = 1,0$, $V = 2\%$ ⁴. Исследования неопределенности моделей несущей способности, регламентированных в нормативных документах, представлены в публикациях [28, 29]. Статистические параметры погрешности конечно-элементных моделей несущей способности можно найти в труде [30].

Результаты исследований статистических параметров базисных переменных, входящих в модель несущей способности, представлены в табл. 2.

Обоснование коэффициентов чувствительности базисных переменных на основе метода надежности первого порядка. Описание и указания по реализации метода надежности первого порядка

Табл. 2. Статистические параметры базисных переменных для модели несущей способности
Table 2. Statistical parameters of the basic variables for the load-bearing capacity model

Базисные переменные Basic variables	Распределение Distribution	μ/X_k или / от μ/X_{nom}	V , %	Источник Source
Предел текучести (для диапазонного анализа) Yield strength (for range analysis)	LN	1,1–1,2	5–8	[15, 23, 27]
Предел текучести (для осредненного анализа) Yield strength (for average/general analysis)	LN	1,15	7	[15, 23, 27]
Неопределенность модели несущей способности обобщенного стального элемента Uncertainty of the resistance model of a generalized steel element	N	1,0–1,15	5–10	[15, 23, 28]
Неопределенность конечно-элементной модели несущей способности Uncertainty of the finite element model of load-bearing capacity	N	0,9–1,0	6,5–8,5	[30]

и методики определения коэффициентов чувствительности приведены в работах [13, 31, 32], а также в нормативных документах СН 2.01.01¹, ТКП EN 1990⁵, СТБ ISO 2394⁶. В настоящем исследовании коэффициенты чувствительности вычислены для базисных переменных, входящих в функцию предельного состояния стального элемента. При этом рассмотрены три расчетных ситуации: первая — при действии снеговой нагрузки, вторая — ветровой нагрузки и третья — функциональной (полезной) нагрузки.

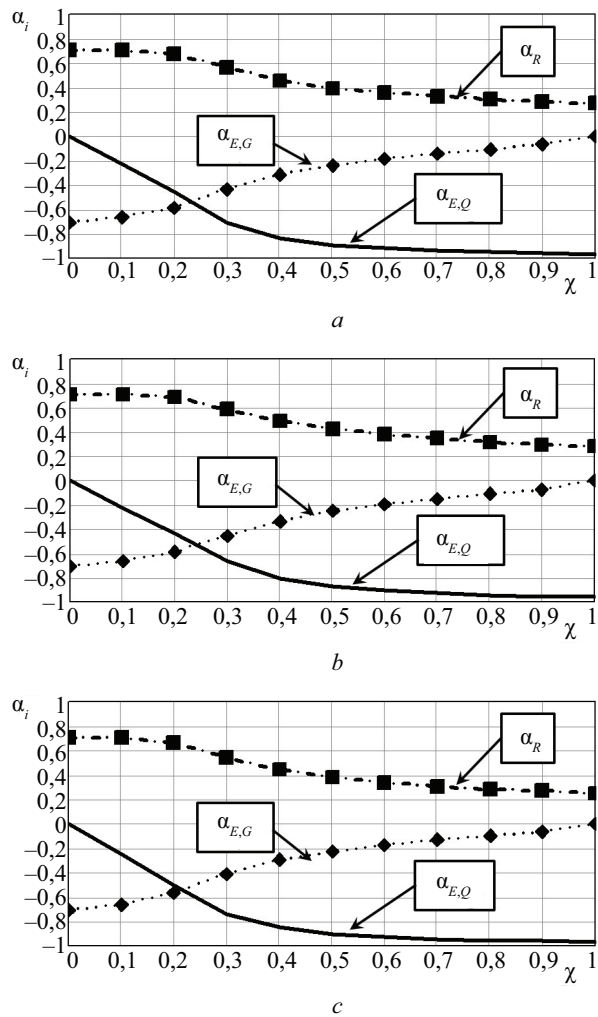
Результаты анализа приведены на рисунке. На вертикальной оси отложены значения коэффициентов чувствительности. Отрицательные значения коэффициентов чувствительности — для нагрузок α_E ($\alpha_{E,G}$ — для постоянных нагрузок; $\alpha_{E,Q}$ — для соответствующих переменных нагрузок), положительные — для несущей способности α_R . На горизонтальной оси указаны значения параметра нагружения χ , который представляет собой долю переменных воздействий в полной величине воздействий [13, 15, 32]. Анализ реальных объектов показывает, что наиболее вероятный интервал значения параметра нагружения χ от 0,5 до 0,7 для снеговой нагрузки, от 0,4 до 0,9 для полезной нагрузки. В отдельных случаях при значительной постоянной нагрузке (например, при тяжелых конструкциях пола, кровли) значение коэффициента может опускаться до 0,3, а при действии преимущественно переменных нагрузок (например, подкрановые балки) коэффициент может достигать 1,0. В работах [13–15] для стальных конструкций наиболее распространенные значения параметра нагружения χ приняты 0,5–0,8.

Из анализа видно, что коэффициенты чувствительности зависят от значения параметра нагружения (характеризующего долю переменных нагрузок в общей нагрузке), при этом незначительно меняются в зависимости от вида переменной нагрузки. С увеличением параметра нагружения (доли переменной нагрузки) коэффициенты чувствительности для несущей способности и постоянной нагрузки уменьшаются, а для переменной нагрузки увеличиваются. В качестве приближения для практического применения можно рекомендовать определять коэффициенты чувствительности по представленным графикам или по следующим приближенным зависимостям:

$$\begin{aligned}\alpha_R &= 0,78 - 0,43\chi \text{ при } \chi \geq 0,3; \\ \alpha_{E,G} &= -0,65 + 0,65\chi \text{ при } \chi \geq 0,3; \\ \alpha_{E,Q} &= -0,43 - 0,58\chi \text{ при } \chi = (0,3-0,8); \\ \alpha_{E,Q} &= -0,9 \text{ при } \chi \geq 0,8.\end{aligned}$$

⁵ ТКП EN 1990–2011* (02250). Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций : введ. 15.12.11. Минск : Минстройархитектуры, 2011. 94 с.

⁶ СТБ ISO 2394–2007. Надежность строительных конструкций. Общие принципы. Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2007. 69 с.



Изменение коэффициентов чувствительности при действии: *a* — функциональной нагрузки; *b* — снеговой нагрузки; *c* — ветровой нагрузки

Changing the values of the sensitivity coefficients for the action: *a* — of functional load; *b* — of snow load; *c* — of wind load

Консервативно значения коэффициентов чувствительности можно принять равными: 0,6 для несущей способности, –0,4 для постоянного воздействия и –0,9 для переменного воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании в общей формулировке описан метод коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций, который позволяет в явном виде учесть целевой уровень надежности и изменчивость базисных переменных. Уровень надежности учитывается с помощью индекса надежности и коэффициентов чувствительности, а изменчивость базисных переменных — среднего значения и коэффициента вариации. Приближение данного метода по отношению к полностью вероятностному методу связа-

но с необходимостью задаваться коэффициентами чувствительности.

Выполнено научное обоснование коэффициентов чувствительности базисных переменных на основе метода надежности первого порядка (FORM). Анализ предельного состояния вероятностным методом показал, что коэффициент чувствительности существенно меняется с изменением параметра нагружения (характеризующего долю переменных нагрузок в общей нагрузке), при этом незначительно меняется в зависимости от вида переменной нагрузки. Коэффициенты чувствительности могут быть приняты на основании графиков или упрощенных зависимостей, представленных в данном исследовании. Консервативно значения коэффициента чувствительности для несущей способности α_R можно принять равными 0,6, для постоянного воздействия $\alpha_{E,G} = -0,4$ и для переменного воздействия $\alpha_{E,Q} = -0,9$.

В работе также представлены статистические параметры базисных переменных для моделей эффектов воздействий и моделей несущей способности, которые могут быть внесены в нормативные документы или применены в качестве справочной информации в дальнейших исследованиях.

Наибольший выигрыш применения данного метода достигается при оценке технического состояния существующих конструкций, в этом случае на основании результатов наблюдений можно учесть фактическую изменчивость базисных переменных. Поэтому дальнейшие исследования необходимо направить на разработку методики актуализации статистических параметров с учетом количества измерений и доступной информации в момент обследования строительных конструкций, а также на обоснование целевого уровня надежности для существующих конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стрелецкий Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. М. : Стройиздат, 1947. 95 с.

2. Балдин В.А., Гольденблат И.И., Коченов В.И., Пильдич М.Я., Таль К.Э. Расчет строительных конструкций по предельным состояниям. М. : Госстройиздат, 1951. 271 с.

3. Novak L., Cervenka J., Cervenka V., Novák D., Sýkora M. Comparison of advanced semi-probabilistic methods for design and assessment of concrete structures // Structural Concrete. 2022. Vol. 24. Issue 1. Pp. 771–787. DOI: 10.1002/suco.202200179

4. Nadolski V., Holicky M., Sykora M., Tur V. Comparison of approaches to reliability verification of existing steel structures // Budownictwo i Architektura. 2022. Vol. 21. Issue 4. Pp. 13–24. DOI: 10.35784/bud-arch.3022

5. Novák L., Novák D. Semi-probabilistic assessment of existing bridge using simplified methods for estimation of variance // Acta Polytechnica CTU Proceedings. 2022. Vol. 36. Pp. 142–148. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0142

6. Lenner R., Sýkora M. Partial factors for imposed loads in areas for storage and industrial use // Structure and Infrastructure Engineering. 2017. Vol. 13. Issue 11. Pp. 1425–1436. DOI: 10.1080/15732479.2017.1285328

7. Caspeele R., Sykora M., Allaix D.L., Steenbergen R. The design value method and adjusted partial factor approach for existing structures // Structural Engineering International. 2013. Vol. 23. Issue 4. Pp. 386–393. DOI: 10.2749/101686613x13627347100194

8. Zhang Y., Toutlemonde F. Calibrating partial safety factors in line with required reliability levels for concrete structures // European Journal of Environ-

mental and Civil Engineering. 2022. Vol. 26. Issue 9. Pp. 3863–3879. DOI: 10.1080/19648189.2020.1824820

9. Lara C., Tanner P., Zanuy C., Hingorani R. Reliability verification of existing rc structures using partial factors approaches and site-specific data // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 4. P. 1653. DOI: 10.3390/app11041653

10. Ebrahim Z.A., Abdel-jawad Y.A. A modified semi-probabilistic approach for the assessment of the residual service life of reinforced concrete structures subjected to carbonation // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 44. Pp. 148–155. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.216

11. Orcesi A., Diamantidis D., O'Connor A., Palmisano F., Sykora M., Boros V. et al. Investigating partial factors for the assessment of existing reinforced concrete bridges // Structural Engineering International. 2023. Vol. 34. Issue 1. Pp. 55–70. DOI: 10.1080/10168664.2023.2204115

12. Marková J., Holický M., Jung K., Sýkora M. Reliability of existing reinforced concrete slabs exposed to punching shear // Acta Polytechnica CTU Proceedings. 2022. Vol. 36. Pp. 119–126. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0119

13. Holicky M. Safety design of lightweight roofs exposed to snow load // WIT Transactions on Engineering Sciences. Vol. 58. 2007. Vol. I. Pp. 51–57. DOI: 10.2495/en070061

14. Sýkora M., Holicky M. Reliability-based design of roofs exposed to a snow load // Reliability Engineering — Proceedings of the International Workshop on Reliability Engineering and Risk Management IWRERM 2008. Shanghai : Tongji University Press, 2009. Pp. 183–188.

15. Nadolski V., Rózsás Á., Sykora M. Calibrating partial factors — methodology, input data and case study of steel structures // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019. DOI: 10.3311/PPci.12822

16. Шинель Г. Надежность несущих строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1994. 287 с.

17. Koteš P., Prokop J., Strieška M., Vičan J. Calibration of partial safety factors according to Eurocodes // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 117. P. 00088. DOI: 10.1051/mateconf/201711700088

18. Hyman P., Sriramula S., Osofero A.I. Calibration of safety factors for prestressed stayed steel columns // *Architecture, Structures and Construction*. 2022. Vol. 2. Issue 3. Pp. 365–380. DOI: 10.1007/s44150-022-00066-5

19. Holický M., Retief J.V., Sykora M. Assessment of model uncertainties for structural resistance // *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2016. Vol. 45. Pp. 188–197. DOI: 10.1016/j.probengmech.2015.09.008

20. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2008. 184 с. EDN QNNCVJ.

21. Ведяков И.И. Современные принципы нормирования качества материалов и стальных конструкций // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2007. № 2 (211). С. 62–64. EDN ZVYHQV.

22. Tur V., Nadolski V. Belarusian national annex to Eurocode 3: basic variables formulation for the partial factors calibration // *Modern Engineering*. 2016. Vol. 1. Pp. 63–72.

23. Тур В.В., Надольский В.В. Калибровка значенний частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций для условий Республики Беларусь. Часть 1 // *Строительство и реконструкция*. 2016. № 4 (66). С. 73–84. EDN WJFTB.

24. Тур В.В., Надольский В.В., Черноиван А.В. Вероятностные модели ветрового воздействия для климатических условий Республики Беларусь // *Вестник Брестского государственного технического университета*.

Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 1 (103). С. 65–71. EDN BDFIGH.

25. Sanpaolesi L., Del Corso R., Formichi P. et al. Phase 1 final report to the european commission, scientific support activity in the field of structural stability of civil engineering works: Snow loads. Department of structural engineering, University of Pisa, 1998.

26. Sanpaolesi L., Del Corso R., Formichi P. et al. Phase 2 Final report to the European commission, scientific support activity in the field of structural stability of civil engineering works: snow loads. Department of Structural Engineering, University of Pisa, 1999.

27. Мартынов Ю.С., Надольский В.В. Статистические параметры базисных переменных, входящих в модели сопротивления стального элемента // *Архитектура и строительные науки*. 2014. № 1–2 (18–19). С. 39–41. EDN NPNGOE.

28. Nadolski V., Sykora M. Uncertainty in resistance models for steel members // *Transactions of the VŠB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2014. Vol. 14. Issue 2. Pp. 26–37. DOI: 10.2478/tvsb-2014-0028

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

30. 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 TNLEVN.

31. Gulvanessian H., Holicki M. Reliability based calibration of Eurocodes considering a steel member // *JCSS Workshop on Reliability Based Code Calibration*. 2002.

32. Sykora M., Holický M. Verification of existing reinforced concrete structures using the design value method // *Proceedings of the 3th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*. 2012. Pp. 821–828.

Поступила в редакцию 4 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 6 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 11 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. Streletskiy N.S. *Fundamentals of statistical accounting of the safety factor of structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1947; 95. (rus.).

2. Baldin V.A., Gol'denblat I. I., Kochenov V.I., Pil'dish M.Ya., Tal' K.E. *Calculation of building structures by limit states*. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1951; 272. (rus.).

3. Novak L., Cervenka J., Cervenka V., Novák D., Sýkora M. Comparison of advanced semi-probabilistic methods for design and assessment of concrete structures. *Structural Concrete*. 2022; 24(1):771-787. DOI: 10.1002/suco.202200179

4. Nadolski V., Holicky M., Sykora M., Tur V. Comparison of approaches to reliability verification of existing steel structures. *Budownictwo i Architektura*. 2022; 21(4):13-24. DOI: 10.35784/bud-arch.3022

5. Novák L., Novák D. Semi-probabilistic assessment of existing bridge using simplified methods for estimation of variance. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2022; 36:142-148. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0142

6. Lenner R., Sýkora M. Partial factors for imposed loads in areas for storage and industrial use. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2017; 13(11):1425-1436. DOI: 10.1080/15732479.2017.1285328

7. Caspeele R., Sykora M., Allaix D.L., Steenbergen R. The design value method and adjusted partial factor approach for existing structures. *Structural Engineering International*. 2013; 23(4):386-393. DOI: 10.2749/101686613x13627347100194

8. Zhang Y., Toutlemonde F. Calibrating partial safety factors in line with required reliability levels for concrete structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2022; 26(9):3863-3879. DOI: 10.1080/19648189.2020.1824820

9. Lara C., Tanner P., Zanuy C., Hingorani R. Reliability verification of existing rc structures using partial factors approaches and site-specific data. *Applied Sciences*. 2021; 11(4):1653. DOI: 10.3390/app11041653

10. Ebrahim Z.A., Abdel-jawad Y.A. A modified semi-probabilistic approach for the assessment of the residual service life of reinforced concrete structures subjected to carbonation. *Procedia Manufacturing*. 2020; 44:148-155. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.216

11. Orcesi A., Diamantidis D., O'Connor A., Palmisano F., Sykora M., Boros V. et al. Investigating partial factors for the assessment of existing reinforced concrete bridges. *Structural Engineering International*. 2023; 34(1):55-70. DOI: 10.1080/10168664.2023.2204115

12. Marková J., Holický M., Jung K., Sýkora M. Reliability of existing reinforced concrete slabs exposed to punching shear. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2022; 36:119-126. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0119

13. Holicky M. Safety design of lightweight roofs exposed to snow load. *WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol 58*. 2007; (I):51-57. DOI: 10.2495/en070061

14. Sýkora M., Holicky M. Reliability-based design of roofs exposed to a snow load. *Reliability Engineering — Proceedings of the International Workshop on Reliability Engineering and Risk Management IWRERM 2008*. Shanghai, Tongji University Press, 2009; 183-188.

15. Nadolski V., Rózsás Á., Sykora M. Calibrating partial factors — methodology, input data and case study of steel structures. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019. DOI: 10.3311/PPci.12822

16. Shpete G. *Reliability of load-bearing building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1994; 287. (rus.).

17. Koteš P., Prokop J., Strieška M., Vičan J. Calibration of partial safety factors according to Eurocodes. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00088. DOI: 10.1051/mateconf/201711700088

18. Hyman P., Sriramula S., Osofero A.I. Calibration of safety factors for prestressed stayed steel columns. *Architecture, Structures and Construction*. 2022; 2(3):365-380. DOI: 10.1007/s44150-022-00066-5

19. Holický M., Retief J.V., Sýkora M. Assessment of model uncertainties for structural resistance. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2016; 45:188-197. DOI: 10.1016/j.probengmech.2015.09.008

20. Lychev A.S. *Reliability of building structures*. Moscow, ASV Publishing House, 2008; 184. EDN QNNCVJ. (rus.).

21. Vedyakov I.I. Modern principles of rationing the quality of materials and steel structures. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2007; 2(211):62-64. EDN ZVYHQV. (rus.).

22. Tur V., Nadolski V. Belarusian national annex to Eurocode 3: basic variables formulation for the partial factors calibration. *Modern Engineering*. 2016; 1:63-72.

23. Tur V., Nadolski V. The partial factor values calibration for the ultimate limit state checking of steel structures for the conditions republic of Belarus. Part 1. *Building and Reconstruction*. 2016; 4(66):73-84. EDN WJFTB. (rus.).

24. Tur V.V., Nadolsky V.V., Chernov A.V. Probabilistic models of wind influence for climatic conditions of republic of Belarus. *Bulletin of BrSTU. Construction and Architecture*. 2017; 1(103):65-71. EDN BDFIGH. (rus.).

25. Sanpaulesi L., Del Corso R., Formichi P. et al. *Phase 1 Final Report to the European Commission, Scientific Support Activity in the Field of Structural Stability of Civil Engineering Works: Snow Loads*. Department of Structural Engineering, University of Pisa, 1998.

26. Sanpaulesi L., Del Corso R., Formichi P. et al. *Phase 2 Final Report to the European Commission, Scientific Support Activity in the Field of Structural Stability of Civil Engineering Works: Snow Loads*. Department of Structural Engineering, University of Pisa, 1999.

27. Martynov I., Nadolski V. The statistical parameters of basic variables in the resistance model of steel element. *Architecture and Building Sciences*. 2014; 1-2(18-19):39-41. EDN NPNGOE. (rus.).

28. Nadolski V., Sykora M. Uncertainty in resistance models for steel members. *Transactions of the VŠB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2014; 14(2):26-37. DOI: 10.2478/tvsb-2014-0028

29. Nadolski V.V. Reliability of a steel member in case of loss of local stability of a web. *Vestnik MGSU*

[Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):569-579. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5. 569-579. EDN BJZUCE. (rus.).

30. 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.).

31. Gulvanessian H., Holicki M. Reliability based calibration of Eurocodes considering a steel member. *JCSS Workshop on Reliability Based Code Calibration*. 2002.

32. Sýkora M., Holický M. Verification of existing reinforced concrete structures using the design value method. *Proceedings of the 3th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*. 2012; 821-828.

Received February 4, 2024.

Adopted in revised form on June 6, 2024.

Approved for publication on June 11, 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 RSCI: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskiv@mail.by.

Сопrotивляемость прогрессирующему разрушению монолитных каркасов зданий при локальных повреждениях узлов от продавливания

Анатолий Викторович Алексейцев, Михаил Дмитриевич Антонов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании зданий и сооружений необходимо обеспечивать механическую безопасность на протяжении всего жизненного цикла объекта. Во время эксплуатации зданий возникают ситуации, при которых монолитные несущие конструкции приобретают дефекты в зоне узла сопряжения колонн и плит (УСКП) в безбалочных перекрытиях. Это прежде всего трещины, обусловленные изгибом плит и продавливанием плит колоннами. Проблема учета работы конструкций с учетом таких данных локальных повреждений при аварийных ситуациях недостаточно изучена. В ряде случаев потеря несущей способности узлов носит хрупкий характер, что не допускается нормативными документами, так как может привести к прогрессирующему, в том числе лавинообразному, разрушению соседних элементов.

Материалы и методы. Определяется несущая способность элементов и степень устойчивости к прогрессирующему разрушению 9-этажного монолитного безбалочного каркаса при различных сценариях начальных локальных повреждений. Вводится три уровня таких повреждений, при этом осуществляется моделирование узлов соединения плит и колонн объемными конечными элементами. Верификация расчетной модели выполняется экспериментально путем натурных испытаний УСКП на продавливание при центральном приложении нагрузки. С целью расчетов используется программный комплекс Simulia Abaqus. Для моделирования деформаций бетона применяется модель CDP, деформаций арматуры — билинейные диаграммы с упрочнением.

Результаты. Получены экспериментальные данные о деформациях узла соединения плиты и колонны при нагружении продольной силой и реализации режима продавливания. С учетом выделенных уровней повреждений и экспериментальных сведений проведены расчеты монолитного каркаса с различными сценариями повреждений в исследуемых узлах. Установлен характер перераспределения усилий для каркасов с разными уровнями таких повреждений и степень их опасности при реализации прогрессирующего разрушения.

Выводы. Определено, что повреждения в узлах соединения колонн и безбалочных перекрытий могут приводить к перераспределению усилий и изменению характера работы плиты перекрытия. Эти изменения в аварийных ситуациях при конструктивных решениях узлов, предусматривающих двухсторонние и трехсторонние расчетные контуры в терминах СП 63.13330 при расчетах на продавливание, могут инициировать прогрессирующее разрушение. Для таких узлов требуется дополнительное расчетное обоснование.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: механическая безопасность, продавливание, локальные повреждения, аварийная ситуация, прогрессирующее разрушение, деформации, конечно-элементное моделирование

Благодарности. Авторы благодарят НИУ МГСУ за поддержку в рамках конкурса грантов на проведение исследований аспирантами (проект № 1, приказ 296/130), а также рецензентов за работу, направленную на улучшение качества статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Сопrotивляемость прогрессирующему разрушению монолитных каркасов зданий при локальных повреждениях узлов от продавливания // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1454–1468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1454-1468

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Викторович Алексейцев, aalexw@mail.ru.

Resistance to progressive collapse of monolithic frames of buildings at localized damage of nodes from push-through

Anatoly V. Alekseytsev, Mikhail D. Antonov

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

ABSTRACT

Introduction. When designing buildings and structures it is necessary to ensure mechanical safety throughout the life cycle of the object. During the operation of buildings, situations arise in which monolithic load-bearing structures acquire defects in

the area of the slab-column connection (SCC) in girderless slabs. These are, first of all, cracks caused by bending of slabs and slab pushing through by columns. The problem of taking into account the operation of structures with regard to such data of local damages in emergency situations is not sufficiently studied. In a number of cases the loss of bearing capacity of nodes is of brittle nature, which is not allowed by normative documents, as it can lead to progressive, including avalanche-like, destruction of neighboring elements.

Materials and methods. The bearing capacity of elements and the degree of resistance to progressive failure of a 9-storey monolithic girderless frame under different scenarios of initial local damages are determined. Three levels of such damage are introduced, and the slab and column connection nodes are modeled by volumetric finite elements. Verification of the computational model is performed experimentally by in-situ pushover tests of the SCC under central load application. Simulia Abaqus software package is used for the purpose of calculations. The CDP model is used for modelling of concrete deformations, and bilinear diagrams with hardening are used for modelling of reinforcement deformations.

Results. Experimental data on the deformations of the slab-column connection under longitudinal force loading and realization of the push-through mode are obtained. Taking into account the selected damage levels and experimental data, calculations of the monolithic frame with different damage scenarios in the investigated nodes are carried out. The nature of force redistribution for frames with different levels of such damage and the degree of their danger in the realization of progressive failure are established.

Conclusions. It is determined that damages in the nodes of column and girderless slabs interfaces can lead to redistribution of forces and changes in the character of slab operation. These changes can initiate progressive failure in emergency situations in case of structural solutions of nodes with two-sided and three-sided design contours in terms of CP 63.13330 for push-through calculations. Additional design justification is required for such nodes.

KEYWORDS: mechanical safety, push-through, local damage, emergency situation, progressive failure, deformations, finite element modelling

Acknowledgments. The authors thank NRU MGSU for support within the framework of the grant competition for postgraduate research (project No. 1, order 296/130), as well as the reviewers for their work aimed at improving the quality of the article.

FOR CITATION: Alekseytsev A.V., Antonov M.D. Resistance to progressive collapse of monolithic frames of buildings at localized damage of nodes from push-through. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1454-1468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1454-1468 (rus.).

Corresponding author: Anatoly V. Alekseytsev, aalexw@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения механической безопасности и живучести конструктивных систем была актуальной еще в начале 70-х годов прошлого века и активно исследуется в сегодняшних реалиях с поиском наиболее рациональных решений для разных типов зданий [1, 2]. Одним из наиболее уязвимых к деформациям мест монолитного каркаса является узел сопряжения колонны и плиты (УСКП) [3–6], разрушение которого, как правило, может привести к существенным последствиям вплоть до возникновения прогрессирующего или, как отмечается в трудах [7, 8], цепного разрушения соседних конструкций. Особое внимание работе данного узла как при нормальной эксплуатации, так и при аварийных ситуациях уделялось в исследованиях отечественных и зарубежных ученых [9–15]. При этом многие публикации посвящены предотвращению реализации механизма продавливания при аварийной ситуации [15, 16]. Рассмотрению узлов при возникновении аварийной ситуации в несимметричных пролетах [17], а также после наступления продавливания [18, 19] уделено меньше внимания. Однако было установлено, что узел сопряжения может сохранять несущую способность, воспринимая меньшую нагрузку и позволяя реализовать работу монолитных каркасов с переходом функционирования плиты как висячего перекрытия («вантовый механизм»). Для обеспечения пространственной работы каркасов были введены требования по устройству скрытых связей.

Данные исследования представлялись разрозненными, не всегда в явном виде включались в нормативные документы по обеспечению защиты конструкций от прогрессирующего разрушения. Кроме того, в современных социально-экономических условиях появляются уточнения к требованиям по обеспечению защиты зданий от прогрессирующего разрушения, уточнения и формирование новых критериев живучести [20, 21].

Значительная часть зданий нормального уровня ответственности обладает накопленными (приобретенными в процессе эксплуатации) локальными повреждениями. Эти объекты с учетом увеличения вероятности запроектных аварийных воздействий имеют повышенный риск материальных потерь. Поэтому необходимо изучить различные аспекты силового сопротивления строительных конструктивных систем, в частности, влияние повреждений в узлах соединения плиты и колонны на устойчивость к прогрессирующему разрушению.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель настоящего исследования — оценить влияние начальных повреждений в узле сопряжения колонны и плиты на устойчивость каркаса к прогрессирующему разрушению при запроектных аварийных воздействиях. Для этого требуется выполнить оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) УСКП с анализом развития локальных трещин и других дефектов по мере приближения бетона к разрушению от продавливания.

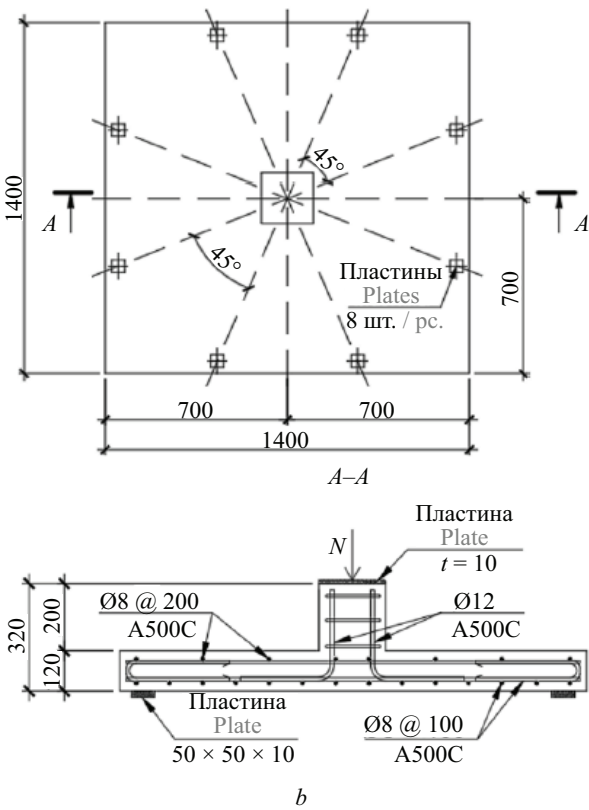


Рис. 1. Испытания узла сопряжения колонны и плиты с центральным приложением продавливающей силы: а — образец, установленный в испытательную машину; б — опалубочный чертеж и армирование испытываемого образца

Fig. 1. Tests of column-slab joint with central application of pushing force: а — specimen placed in the testing machine; б — formwork drawing and reinforcement of the test specimen

Испытания. Для достижения поставленной цели проведены испытания образца УСКП с центральным приложением продавливающей нагрузки (рис. 1). Плита толщиной 120 мм армировалась арматурой класса А500С. Фоновое армирование плиты, а также анкерующие П-образные детали на концах выполнены из арматуры диаметром 8 мм. При армировании фрагментов колонн использовалась арматура диаметром 12 мм с хомутами диаметром 8 мм. Защитный слой арматуры был принят равным 20 мм. Шаг продольного армирования с растянутой стороны составлял 100 мм, со сжатой — 200 мм. Образец опирался на равномерно распре-

деленные по контуру стальные пластины. Такое решение по условиям опирания позволило минимизировать влияние эффектов бокового обжатия и получить более близкое к реальным конструкциям НДС узла сопряжения.

Образец был изготовлен из тяжелого бетона на гранитном щебне фракции 5–20 мм. Прочность бетона на сжатие определялась по контрольным кубам 100 × 100 × 100 мм по методике ГОСТ 10180–2012. Для установления предельной прочности на растяжение проводились испытания на растяжение при изгибе призм 100 × 100 × 400 по ГОСТ 101180–2012. Призменная прочность на сжатие, модуль упругости

Табл. 1. Результаты испытаний по определению кубиковой прочности

Table 1. Test results for determining the cubic strength

Номер образца Specimen number	Ширина сечения, мм Section width, mm	Высота сечения, мм Section height, mm	Длина образца L, мм Specimen length L, mm	Масса m, г Mass m, g	Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	Площадь сечения, см² Section area, cm²	Разрушающее усилие P, кН Ultimate force P, kN	α	Прочность на сжатие R ₀ , МПа Compression strength R ₀ , MPa
1	93	98	98	2079	2328	91,14	177	0,92	18,4
2	95	96	98	1936	2166	91,20	193		20,1
3	96	98	99	2026	2175	94,08	210		21,2
4	100	98	95	2017	2166	98,00	201		19,5
Прочность бетона в серии по ГОСТ 10180–2012 Strength of concrete in the series according to GOST 10180–2012									20,3

и коэффициент Пуассона определялись по испытаниям призм 100 × 100 × 400 по методике ГОСТ 101180–2012. Данные по испытаниям указаны в табл. 1–3.

Перед проведением испытаний образца УСКП аналитически и с помощью конечно-элементного моделирования установлена ожидаемая разрушающая нагрузка. Во время испытаний на образец нагрузка прикладывалась ступенями по 1/10 от предельной разрушающей через стальную пластину. Для анализа НДС узла сопряжения конструкций контролировались показания тензодатчиков на арматуре и бетоне. По мере приложения нагрузки проводилась фиксация перемещений оголовка фрагмента колонны по данным встроенного тензометрического датчика перемещений. После приложения каждой ступени осуществлялась выдержка образцов и визуальный контроль на наличие и развитие имеющихся трещин.

Для моделирования развития и влияния локальных повреждений (трещин) в приопорной зоне были построены две конечно-элементные модели (КЭМ). Первая КЭМ представляла собой фрагмент испытываемого узла, вторая — фрагмент 9-этажного монолитного каркаса. Моделирование выполнено в ПК Simulia Abaqus 2020 в физически нелинейной постановке. С целью получения необходимых решений был применен решатель Explicit solver: Abaqus/Explicit.

Для моделирования деформаций искусственно-го каменного материала (бетона) использована мо-

дель с возможностью пластического разрушения Concrete Damage Plasticity model (CDP). Модель учитывает образование и развитие трещин при растяжении, сжатии и срезе.

Рассматриваются два основных механизма разрушения — образование трещин в растянутом бетоне и раздавливание сжатого бетона. Работа бетона моделировалась с учетом диаграмм функционирования бетона и согласно рекомендациям по моделированию НДС железобетонных конструкций при продавливании в ПК Abaqus [22–24] (рис. 2).

Для моделирования арматуры была использована модель пластичности с двумя линейными участками — зоной упругой работы и площадкой текучести (рис. 3). Арматура моделировалась двухузловыми стержневыми элементами типа truss (B31). Стоит отметить, что на данном этапе не рассматриваются вопросы потери сцепления арматуры и бетона. Они учитываются косвенно в модели бетона путем некоторого удлинения участка нисходящей ветви (рис. 2). В качестве критерия разрушения в модели CDP реализован модифицированный критерий Druker – Prager (1) с введением для описания поверхности текучести F гиперболической кривой в меридиональной плоскости (рис. 4):

$$F = \sqrt{(d'_{|0} - p_{|0} \tan \beta)^2 + q^2} - p \tan \beta - d' = 0, \quad (1)$$

где p_i — значение p при $q = 0$; d' ; β — параметры поверхности текучести, показанные на рис. 1; q — де-

Табл. 2. Результаты испытаний по определению прочности при изгибе

Table 2. Results of bending strength tests

Номер образца Specimen number	Ширина сечения, мм Section width, mm	Высота сечения, мм Section height, mm	Длина образца L , мм Specimen length L , mm	Расстояние между опорами l , мм Span distance l , мм	Разрушающая нагрузка F , кН Ultimate force F , kN	Прочность R_{ib} , МПа Bending strength R_{ib} , MPa
1	98	98	403	300	9,84	3,14
2	96	97	398	300	9,81	3,26
3	98	98	395	300	13,44	4,28
Прочность бетона в серии по ГОСТ 10180–2012 Strength of concrete in the series according to GOST 10180–2012						3,77

Табл. 3. Результаты испытаний по определению призмной прочности и упругих характеристик бетона

Table 3. Test results for prism strength and elastic constants of concrete

Номер образца Specimen number	Разрушающая нагрузка, кН Ultimate force, kN	Призмная прочность, МПа Prism strength, MPa	Модуль упругости при сжатии, МПа Modulus of elasticity in compression, MPa	Коэффициент Пуассона Poisson's ratio
1	237,3	24,7	17 850	0,14
2	225,7	24,2	20 504	0,13
3	183,8	19,1	19 892	0,16
Среднее значение Mean		22,7	19 783	0,14
Среднее квадратическое отклонение Mean square deviation		3,1	1777	0,01
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %		13,61	8,98	10,66

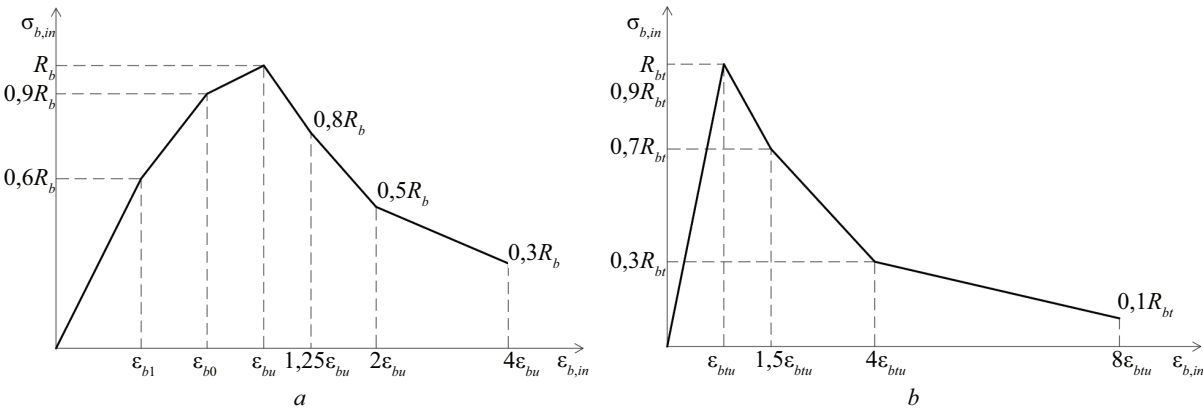


Рис. 2. Диаграмма деформирования бетона: *a* — при сжатии; *b* — при растяжении
Fig. 2. Compression strain: *a* — chart for concrete; *b* — tensile strain

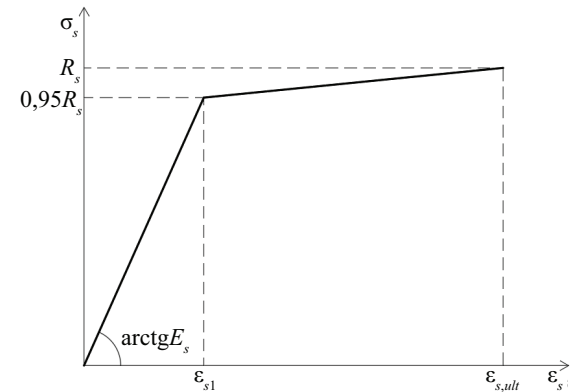


Рис. 3. Диаграмма деформирования растянутой арматуры
Fig. 3. Tensile rebars deformation diagram

виаторное напряжение Мизеса; *p* — эквивалентное давление.

Тело бетона моделировалось объемными кубиковыми элементами C3D8R с упрощенным интегрированием и контролем искажения. При достижении материалом предельных напряжений или деформаций элементы бетона данной модели работали по ни-

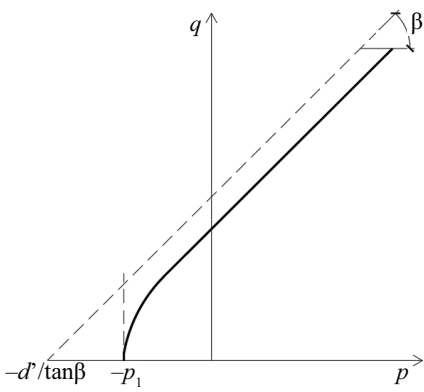


Рис. 4. Критерий прочности бетона в модели (CDP)
Fig. 4. Concrete yield strength criterion in the model (CDP)

спадающей ветви с появлением и распределением по объему трещин. Напряжения в элементах находились с использованием коэффициентов повреждения (деградации жесткости) бетона при осевом сжатии *d_c* и осевом растяжении *d_t*, учета полных деформаций сжатия *epsilon_c* и растяжения *epsilon_t* за вычетом эквивалентных пластических деформаций (рис. 5).

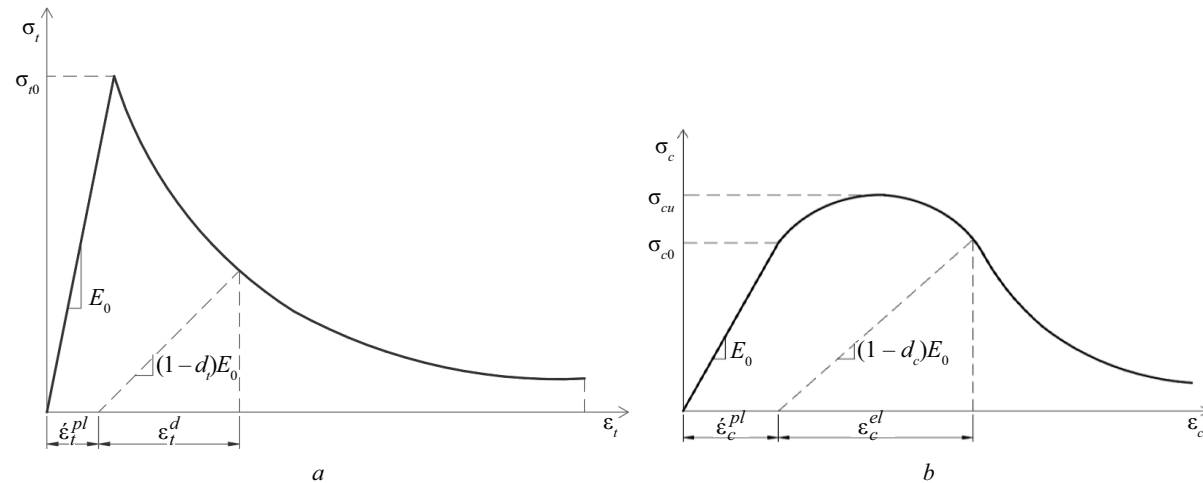


Рис. 5. Интерпретация деформаций бетона: *a* — при растяжении; *b* — при сжатии
Fig. 5. Interpretation of concrete: *a* — tensile strains; *b* — deformations in compression

Табл. 4. Параметры модели CDP

Table 4. Additional parameters of the Concrete Damaged Plasticity model

Угол дилатации, град. Dilation angle	Эксцентриситет Eccentricity	f_{b0}/f_{c0}	K	Параметр вязкости Viscosity parameter
34	0,1	1,16	0,6667	0,0001

Примечание: угол дилатации — угол, равный отношению объемной и сдвиговой деформации; эксцентриситет — параметр, отвечающий за скорость перехода в пластичное состояние материала в моделях внецентрично сжатого ограниченного бетона; f_{b0}/f_{c0} — отношение прочности бетона при двухосном сжатии к прочности при одноосном; K — параметр формы поверхности текучести для бетона.

Note: dilation angle is an angle equal to the ratio of volumetric and shear strain; eccentricity is a parameter responsible for the rate of transition to the plastic state of the material in models of eccentrically compressed confined concrete; f_{b0}/f_{c0} is the ratio of the strength of concrete under biaxial compression to the strength under uniaxial compression; K is the yield surface shape parameter for concrete.

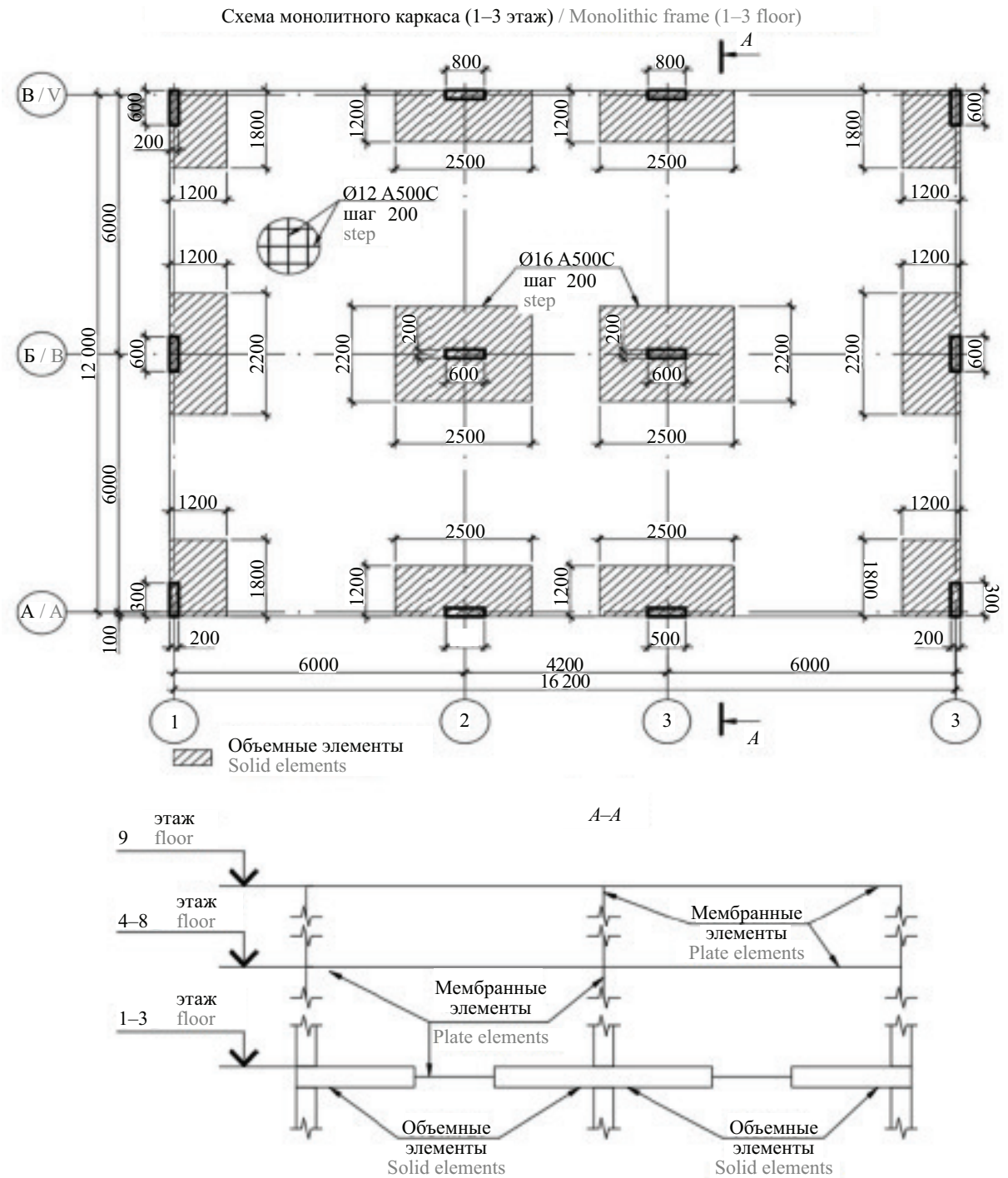


Рис. 6. Параметры исследуемого монолитного каркаса

Fig. 6. Investigated monolithic frame

Табл. 5. Параметры армирования монолитного каркаса

Table 5. Parameters of monolithic frame reinforcement

Этаж Floor	Арматура плиты / Slab rebars		Арматура пилонов Pylon rebars		Типы элементов FE types	Шаг разбиения, мм Mesh size, mm
	верхняя upper	нижняя lower	продольная, мм longitudinal, mm	поперечная, мм transversal, mm		
1	Ø12 шаг 200 (фон) step 200 (background)	Ø12 шаг 200 Ø12 step 200 (фон) (background)	Ø20 шаг 100 Ø20 step 100	Ø8 шаг 100/200 Ø8 step 100/200	Объемные/ стержневые/ оболочки Solid/ truss/ shells	50
2–3	Ø12 + Ø16 шаг 200 (опоры) step 200 (supports)				Оболочки Shells	100
4	Ø12 шаг 200 (фон) step 200 (background)		Ø16 шаг 100 Ø20 step 100		Оболочки Shells	200
5–9	Ø12 шаг 100 (опоры) step 200 (background)		Ø16 шаг 100 Ø20 step 100			

В случае, если материал не имел начальных повреждений (нами они моделируются путем удаления элементов из объемной модели), напряжения сжатия σ_c и растяжения σ_t определяются так:

$$\sigma_c = (1 - d_c) \cdot E_0 \cdot (\epsilon_c - \tilde{\epsilon}_c^{pl}); \tag{2}$$

$$\sigma_t = (1 - d_t) \cdot E_0 \cdot (\epsilon_t - \tilde{\epsilon}_t^{pl}). \tag{3}$$

Учитывалась возможность дилатации бетона при сжатии, а также стеснение ортогональных деформаций (ограниченность бетона) при использовании дополнительных параметров модели CDP, указанных в табл. 4.

Моделирование взаимодействия между стальными пластинами и бетонной поверхностью для экспериментальной установки осуществлялось с помощью контакта трения. Коэффициент трения между бетоном и металлической пластиной принимался равным 0,4. Также для более близкой имитации работы узла при реальных испытаниях были смоделированы зазоры между поверхностью бетона над стальной опорой. Шаг разбиения всех элементов принят равным 10 мм.

Моделирование каркаса. Общая схема исследуемого 9-этажного пространственного монолитного каркаса указана на рис. 6. Высота этажа принималась равной 2,7 м. При этом рассматривается достаточно распространенный тип каркаса с асимметричными пролетами и монолитными пилонами. Толщина плиты перекрытий 200 мм, с защитным слоем 25 мм. С учетом нагрузки от собственного веса к каркасу приложена равномерно распределенная полезная нагрузка 200 кг/м².

При создании схемы использовались модели материалов и типы элементов такие же, как при анализе

НДС узлов. Особенность разработки модели заключается в комбинированном подходе [17]. В частности, для снижения вычислительной емкости задачи пролетные участки плит перекрытий и центральные участки пилонов в уровне 1–3 этажей были заменены на 4-узловые элементы оболочек (мембранные элементы типа shell S4R) (см. рис. 6). Габариты плиты объемной приопорной части не превышали длину $5h$ (где h — толщина плиты) с учетом возможности включения в работу участков плиты после возникновения продавливания. В свойствах данных элементов указывались параметры слоев армирования (rebar layer). Соединение объемных элементов и оболочек осуществлялось с помощью встроенного в Abaqus инструмента Solid-shell coupling. С 4-го этажа все перекрытия описывались элементами оболочек. Параметры армирования каркаса указаны в табл. 5.

Запроектные воздействия моделировались следующим образом. Первоначально выполнялся статический расчет неповрежденной системы, в ходе которого определялись опорные реакции. Далее эти реакции уточнялись с учетом демпфирования системы так, чтобы в ходе динамического расчета было воспроизведено статическое состояние системы с реакциями, но без связей. Затем эти уточненные реакции с помощью встроенного в Abaqus инструмента predefined load передавались для моделирования аварийной ситуации в основной динамический решатель. После этого удаление реакций можно выполнять для интервала времени $[t_1; t_2]$, как показано на рис. 7 [25].

Моделирование локальных повреждений УСКП выполнялось путем удаления слоев поврежденного бетона в некоторой области, определяемой путем

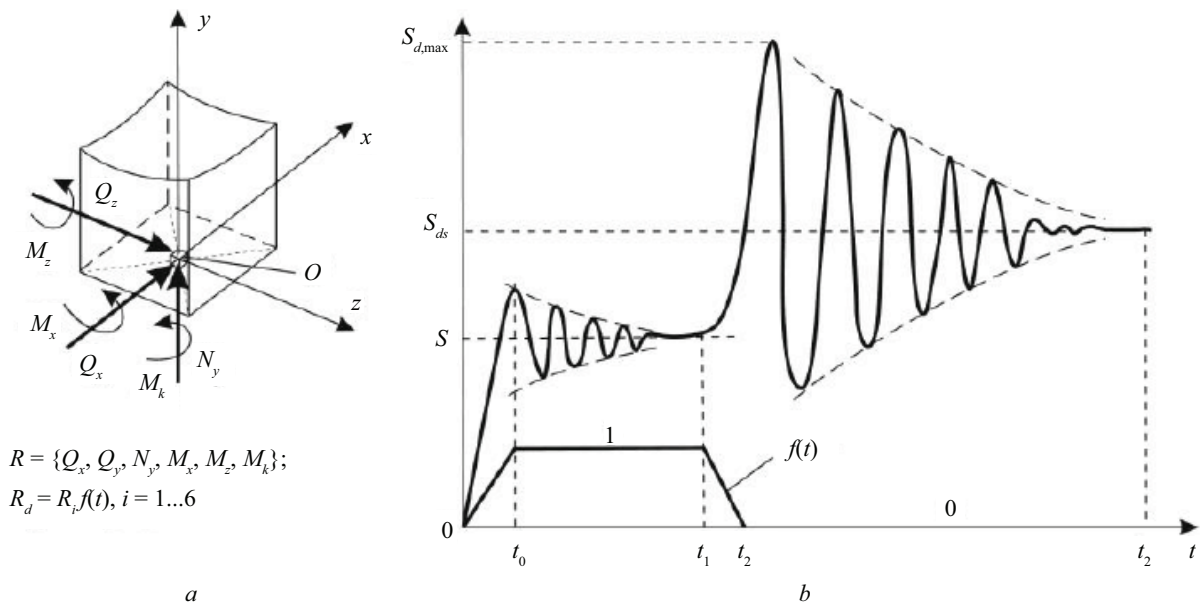


Рис. 7. Моделирование локального повреждения: система статически эквивалентных реакций сил (а); характер изменения во времени динамического усилия в опасном сечении и вид функции $f(t)$ (b)

Fig. 7. Modelling of local damage: system of statically equivalent force reactions (a); change in time of the dynamic forces for the overloaded section and type of function $f(t)$ (b)

анализа результатов экспериментального и численного моделирования ряда научных работ. При этом предлагается выделить три уровня повреждений, зависящих от значения усилия (в долях от предельного), которое воспринимал узел в период эксплуатации, и начального значения (при отсутствии повреждений) рабочей высоты сечения плиты. Эти значения приведены в следующем разделе статьи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Введем, основываясь на гипотезе исследований [15] об ограничении развития деформаций, реализующих разрушение по усеченной пирамиде продавливания, для рассматриваемых нами УСКП каркаса следующие уровни локальных повреждений (рис. 8).

Верификация объемной конечно-элементной модели УСКП. По результатам натурных испытаний была проведена верификация КЭМ по величине предельной нагрузки и деформациям бетона

и арматуры в местах наклейки тензометрических датчиков. Данные, полученные в результате испытаний, в соответствии со схемой расположения датчиков (рис. 9, 10) сопоставлялись с результатами расчета в соответствующих конечных элементах. Как видно на рисунках, экспериментальные данные достаточно близки к теоретическим, при этом численная модель дает некоторый запас по прочности. Для удобства отображения на графиках относительные деформации ϵ арматуры умножались на константу E_0 — начальный модуль упругости стали.

По результатам расчета НДС образца получены поля главных напряжений (табл. 6).

Расчет каркаса на прогрессирующее разрушение с учетом локальных повреждений УСКП. Рассмотрены 3 сценария аварийной ситуации, связанной с удалением пилона в осях Б/2 (рис. 6):

- 1) без наличия локальных повреждений УСКП;



Рис. 8. Моделирование локальных повреждений, вызванных продавливанием

Fig. 8. Modelling of local damage induced by punching process

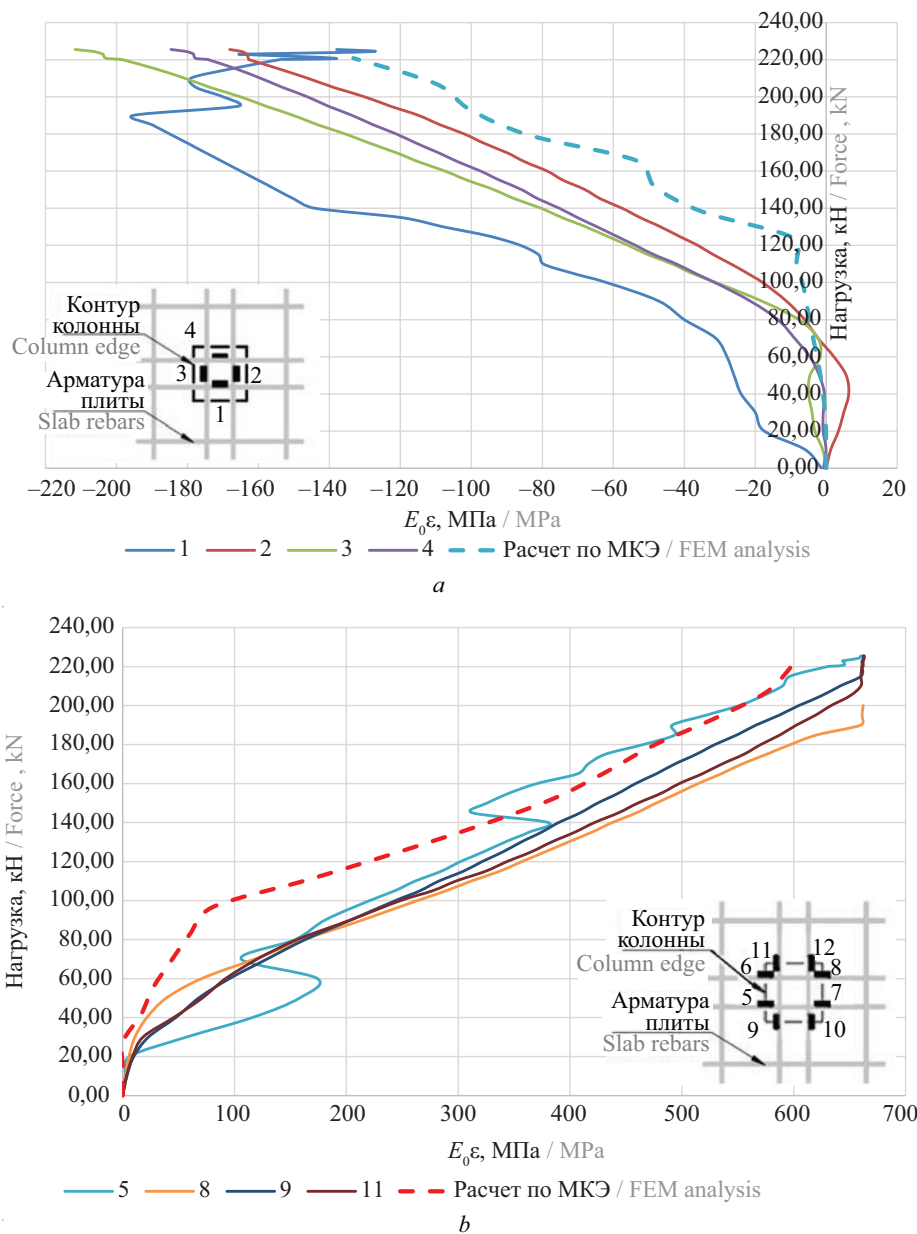


Рис. 9. Сопоставление данных по деформациям арматуры: сжатой зоны, полученным экспериментально с расчетами модели по МКЭ (а); растянутой зоны, полученным экспериментально с расчетами модели по МКЭ (b)

Fig. 9. Comparison of data on deformations of the compressed zone rebars obtained experimentally with FEM calculations of the model (a); of the tensile zone rebars obtained experimentally with FEM calculations of the model (b)

2) при наличии локальных повреждений УСКП 3-го уровня в зоне пилона Б/1 (вариант 1);

3) при наличии локальных повреждений УСКП 3-го уровня в зоне пилонов Б/1 и А/3 (вариант 2).

Считалось, что при повреждениях 3-го уровня работа узла на изгиб практически исчерпана, образуется вантовый механизм, при котором основное догружение при аварии происходит преимущественно за счет продольной силы, что позволяет использовать данные эксперимента по продавливанию только продольной силой. В случае меньших повреждений, если плита может воспринять догружение изгибающим моментом, следует использовать

данные эксперимента на продавливание с учетом действия момента, которые будут опубликованы авторами в следующих работах.

На начальном этапе для получения статически уравновешенного состояния системы опорная связь пилон Б/2 была заменена системой равнодействующих усилий с соответствующим графиком изменения во времени, как описано ранее в статье и, например, в работе [18]. Удаление пилон происходило за конечное время t в динамической постановке (см. рис. 7). Общее время расчета составляло 19 с, из них первые 4 сек система уравнивалась до состояния, соответствующего эксплуатационно-

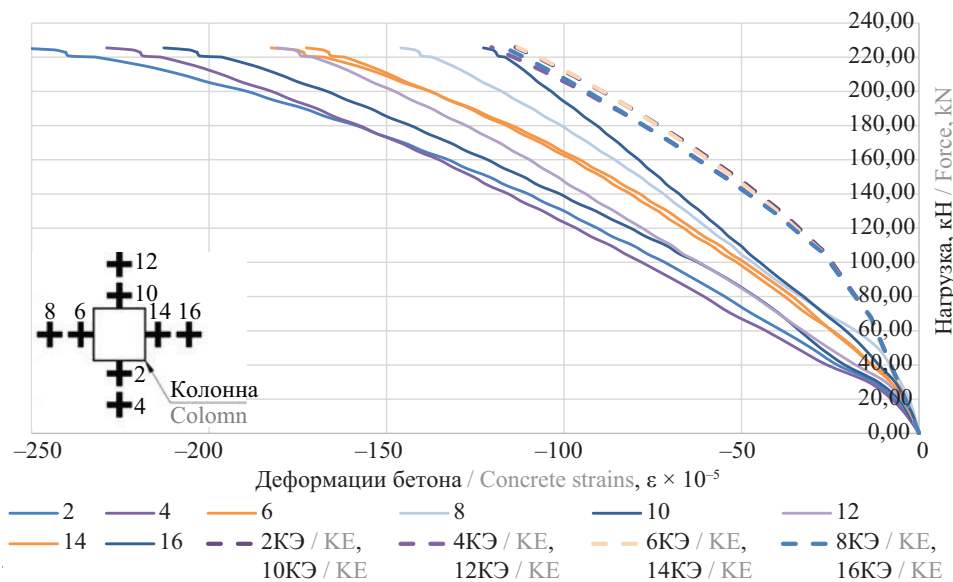


Рис. 10. Сопоставление деформаций датчиков, установленных в тангенсальном направлении (2, 4, 6...16), и результатов расчетов по МКЭ (2КЭ, 10КЭ ... 16КЭ)

Fig. 10. Comparison of deformations of sensors installed in tangential direction (2, 4, 6 ... 16) and results of FEM calculations (2KE, 10KE ... 16KE)

Табл. 6. Напряженное состояние УСКП

Table 6. Stress state of the slab-column joint unit

Сечение в главной плоскости колонны при уровне повреждений (рис. 8) Section in the main plane of the column at the damage level (Fig. 8)		
1	2	3
Сечение по торцовой плоскости колонны при уровне повреждений Column edge plane section at damage level		
1	3	3

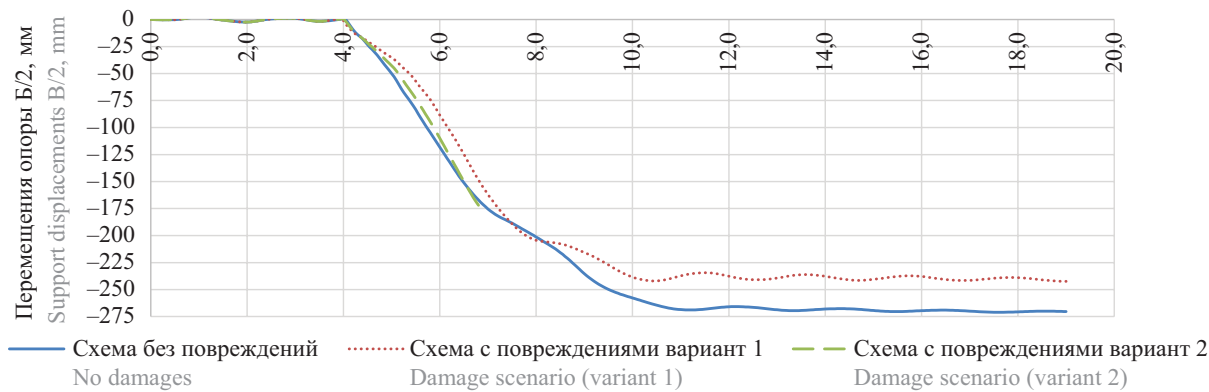


Рис. 11. Графики перемещения опоры пилона в осях Б/2 при различной степени повреждений

Fig. 11. Plots of the pylon support displacement in B/2 axes at different levels of damages

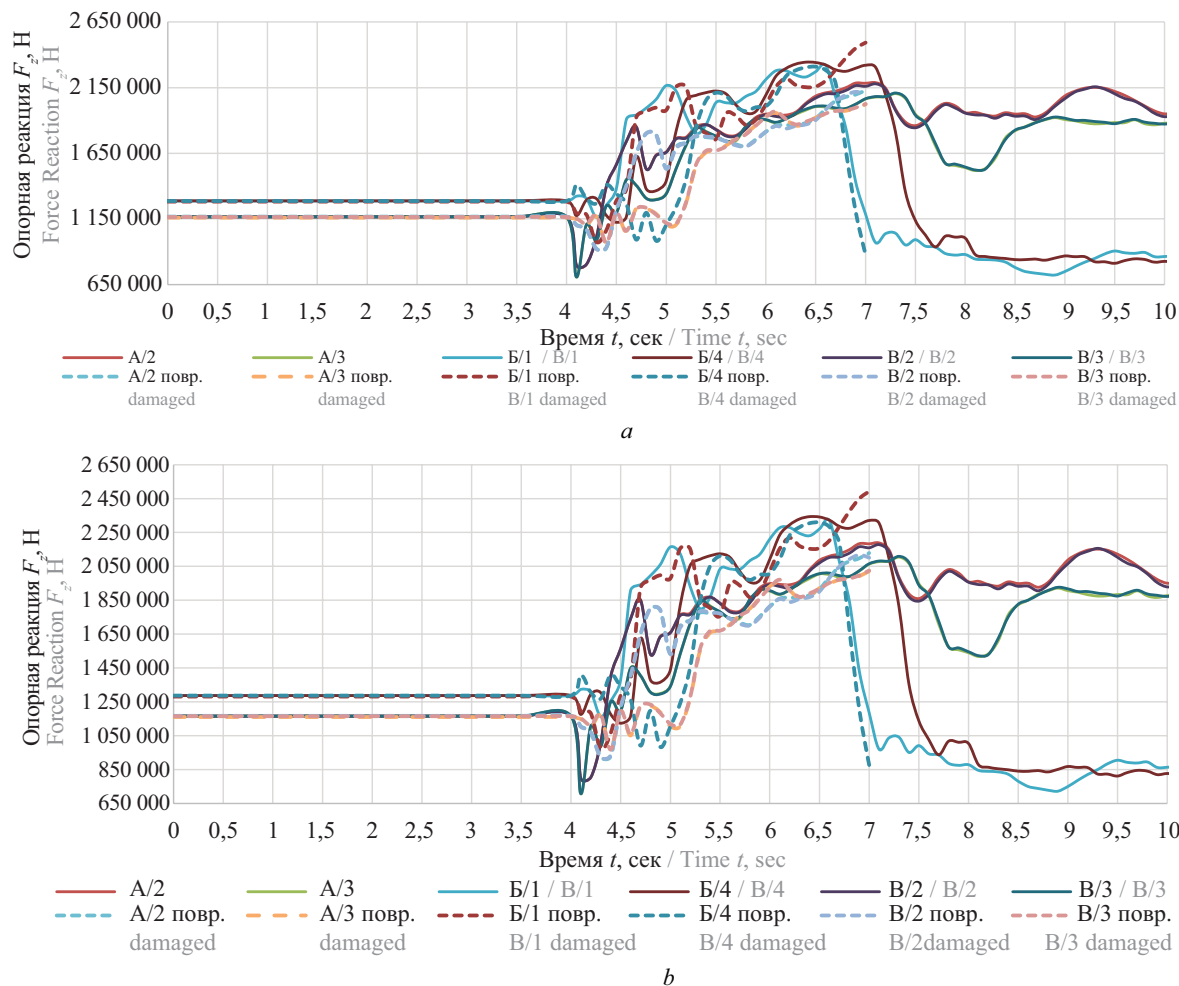
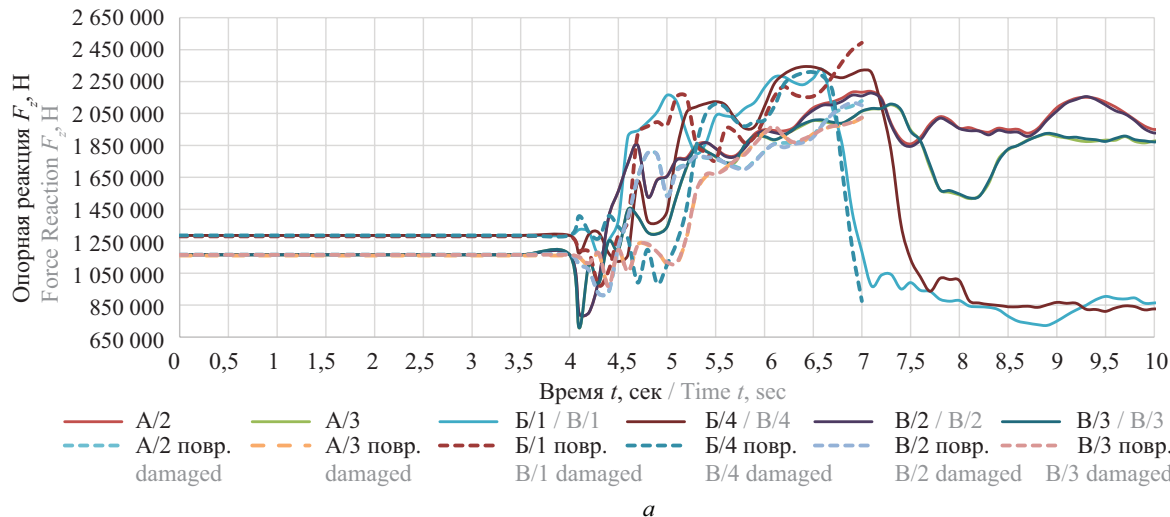


Рис. 12. График распределения опорных реакций: а — угловых пилонов (вариант 1); б — торцевых пилонов (вариант 1)
Fig. 12. Chart of time change in force reactions: а — of corner pylons (variant 1); б — of edge pylons (variant 1)

му. По результатам расчета фрагмента монолитного каркаса получены графики перемещения опоры пилон в осях Б/2 в зависимости от степени повреждения узлов у опор (рис. 11).
В момент времени $t = 4$ с происходит удаление пилон в осях Б/2. Далее отмечается стабилизация системы и фиксация данных на протяжении 15 с.

Расчет системы с повреждениями по варианту 2 был прекращен программой в момент времени $t = 7,929$ с. Индексом «повр» указываются опоры в монолитном каркасе с повреждениями. Результаты перераспределения силовых потоков при аварийном воздействии будем иллюстрировать изменением реакций во вре-



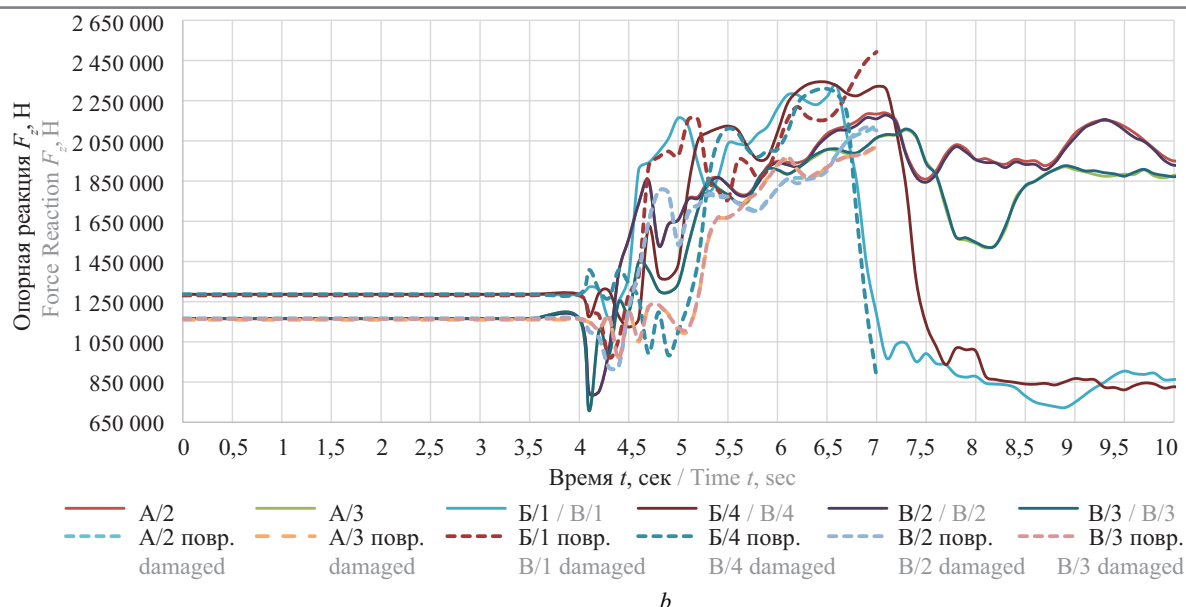


Рис. 13. График распределения опорных реакций: *a* — угловых пилонов (вариант 2); *b* — торцевых пилонов (вариант 2)
Fig. 13. Chart of time change in force reactions: *a* — of corner pylons (variant 2); *b* — of edge pylons (variant 2)

мени для опорных пилонов. Приведем эти результаты для торцевых и угловых пилонов (см. рис. 12, 13).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ изменения величины опорных реакций системы без локальных повреждений и с их наличием по первому варианту показал, что локальные повреждения ближайшего к удаляемому пилону узла приводят к дополнительному догрузению узла напротив. Общий механизм деформирования плиты при наличии повреждений по варианту 1 аналогичен ее работе без повреждений. В то же время при наличии повреждений по варианту 1 наблюдаются более высокие значения догрузений в угловых колоннах и падение опорных реакций в торцевых колоннах, что свидетельствует о перераспределении усилий в плите в направлении по оси Б. Анализируя графики опорных реакций с наличием повреждений по варианту 2, можно отметить, что локальные повреждения, аналогично варианту 1, дополнительно догружают опоры напротив. Однако в данном случае плита перекрытия начинает прогибаться в двух направлениях: вдоль центральной части по оси Б и вдоль оси 3 в перпендикулярном направлении.

Возникает дополнительное догружение угловых пилонов и рост напряжений в бетоне опорных участков пилонов наружного контура, что в конечном итоге может привести к отрыву центральной части плиты от ее наружной части.

Повреждения УСКП существенно влияют на перераспределение силовых потоков в монолитных каркасах при аварийных ситуациях. При определенных сценариях и сочетаниях повреждений для систем, спроектированных без учета защиты от прогрессирующего разрушения и имеющих расчетные контуры уменьшенной длины (двухсторонние и трехсторонние), продавливание в результате аварийного догружения может привести к прогрессирующему разрушению системы вплоть до ее полного разрушения.

Введены уровни локальных повреждений, которые могут помочь оценить степень опасности накопленных эксплуатационных повреждений и предотвратить значительные риски материальных потерь. Вместе с тем необходимы дальнейшие исследования, позволяющие установить влияние уровня повреждений, их типа, объема и сценария групповых повреждений на механическую безопасность монолитных каркасов с безбалочными перекрытиями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // Engineering Structures. 2018. Vol. 173. Pp. 122–149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082
2. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Оптимальное проектирование несущих конструкций зданий с учетом относительного риска аварий // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 7. С. 819–830. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.819-830. EDN HU1EAL.

3. Тамразян А.Г. К анализу узла сопряжения монолитных плит и колонн при продавливании // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : мат. Междунар. академических чтений. 2020. С. 101–109. EDN HSMPUN.

4. Залесов А.С., Дорофеев В.С., Шеховцов И.В. Прочность и деформативность плит на продавливание // Бетон и железобетон. 1992. № 8. С. 14–17. EDN OUCCKB.

5. Филатов В.Б., Бубнов Е.П. Экспериментальные исследования прочности плоских железобетонных плит при продавливании // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 2. С. 86–91. EDN YFPWRB.

6. Muttoni A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement // ACI structural Journal. 2008. Vol. 105. Issue 4. DOI: 10.14359/19858

7. Gardner N.J., Huh J., Chung L. Lessons from the Sampoong department store collapse // Cement and Concrete Composites. 2002. Vol. 24. Issue 6. Pp. 523–529. DOI: 10.1016/s0958-9465(01)00068-3

8. Wood J.G.M. Pipers row car park collapse: Identifying risk // Concrete. 2003. Vol. 37. Issue 9. Pp. 29–31.

9. Кабанцев О.В., Горбатов С.В., Песин К.О. Оценка влияния локальных дефектов перекрытия на основе учета поэтапного изменения расчетной схемы под нагрузкой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2 (49). С. 89–108. EDN TOLUXH.

10. Liu J., Tian Y., Orton S.L., Said A.M. Resistance of flat-plate buildings against progressive collapse. I: Modeling of slab-column connections // Journal of Structural Engineering. 2015. Vol. 141. Issue 12. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001294

11. Yi W.J., Zhang F.Z., Kunnath S.K. Progressive collapse performance of RC flat plate frame structures // Journal of Structural Engineering. 2014. Vol. 140. Issue 9. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000963

12. Russell J.M., Owen J.S., Hajirasouliha I. Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss // Engineering Structures. 2015. Vol. 99. Pp. 28–41. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.04.040

13. Кабанцев О.В., Митрович Б. К выбору характеристик предельных состояний монолитных железобетонных несущих систем для режима прогрессирующего обрушения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 6 (378). С. 234–241. EDN TTXZYX.

14. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Бухтиярова А.С. Сопротивление пространственных узлов сопряжения железобетонных каркасов многоэтажных зданий

при запроектных воздействиях // Строительство и реконструкция. 2011. № 5 (37). С. 21–32. EDN OIRNVV.

15. Трекин Н.Н., Саркисов Д.Ю., Крылов В.В., Евстафьева Е.Б., Андриян К.Р. Несущая способность монолитных железобетонных плит на продавливание при статическом и динамическом нагружении // Строительство и реконструкция. 2022. № 5 (103). С. 67–79. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-103-5-67-79. EDN HCBULC.

16. Micallef K., Sagaseta J., Ruiz M.F., Muttoni A. Assessing punching shear failure in reinforced concrete flat slabs subjected to localised impact loading // International Journal of Impact Engineering. 2014. Vol. 71. Pp. 17–33. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.04.003

17. Ulaeto N. Numerical modelling of symmetric and asymmetric punching and post-punching shear responses of RC flat slabs // 11th European LS-DYNA Conference 2017. 2017.

18. Melo G., Regan P.E. Post-punching resistance of connections between flat slabs and interior columns // Magazine of Concrete Research. 1998. Vol. 50. Issue 4. Pp. 319–327. DOI: 10.1680/mac.1998.50.4.319

19. Fernández Ruiz M., Mirzaei Y., Muttoni A. Post-punching behavior of flat slabs // ACI Structural Journal. 2013. Vol. 110. Issue 5. DOI: 10.14359/51685833

20. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 3. № 3. С. 62–74. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.62-74. EDN IKRNWX.

21. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 4 (80). Pp. 73–80. DOI: 10.18720/MCE.80.7. EDN XYLDTF.

22. Lubliner J., Oliver J., Oller S., Onate E. A plastic-damage model for concrete // International Journal of Solids and Structures. 1989. Vol. 25. Issue 3. Pp. 299–326. DOI: 10.1016/0020-7683(89)90050-4

23. Rasoul Z.M.R.A., Mtaher H.M.A. Accuracy of concrete strength prediction behavior in simulating punching shear behavior of flat slab using finite element approach in Abaqus // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2019. Vol. 7. Issue 4. P. 1933. DOI: 10.21533/pen.v7i4.943

24. Genikomsou A.S., Polak M.A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS // Engineering Structures. 2015. Vol. 98. Pp. 38–48. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.04.016

25. Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Динамика безбалочных железобетонных каркасов сооружений при повреждении плит продавливанием // Строительство и реконструкция. 2021. № 4 (96). С. 23–34. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-23-34. EDN UJXFML.

Поступила в редакцию 13 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 15 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 31 мая 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Анатолий Викторович Алексейцев** — доктор технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; aalexw@mail.ru;

Михаил Дмитриевич Антонов — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6327-7406, РИНЦ ID: 1101963; mishany96969@mail.ru.

Вклад авторов:

Алексейцев А.В. — формулирование концепции исследования, методика исследования, научное редактирование, формулирование выводов.

Антонов М.Д. — анализ источников и литературы, проведение испытаний и обработка их результатов, построение и анализ КЭ модели, подготовка текста, формулирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018; 173:122-149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082
2. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Optimal structures design: accounting of costs and relative accidents risk. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(7):819-830. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.819-830. EDN HUUEAL. (rus.).
3. Tamrazyan A.G. To analyze the junction of flat slabs and columns during punching. Safety of the Russian construction fund. Safety of the Russian construction fund. *Problems and solutions : materials of International Academic Readings*. 2020; 101-109. EDN HSMPUN. (rus.).
4. Zalesov A.S., Dorofeev V.S., Shekhovcov I.V. Strength and deformability of plates for punching. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1992; 8:14-17. EDN OUCCKB. (rus.).
5. Filatov V.B., Bubnov E.P. Experimental investigation of punching shear strength of flat reinforced concrete slabs. *Industrial and Civil Engineering*. 2017; 2:86-91. EDN YFPWRB. (rus.).
6. Muttoni A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. *ACI structural Journal*. 2008; 105(4). DOI: 10.14359/19858
7. Gardner N.J., Huh J., Chung L. Lessons from the Sampoong department store collapse. *Cement and Concrete Composites*. 2002; 24(6):523-529. DOI: 10.1016/s0958-9465(01)00068-3
8. Wood J.G.M. Pipers row car park collapse: Identifying risk. *Concrete*. 2003; 37(9):29-31.
9. Kabantsev O.V., Gorbатов S.V., Pesin K.O. Estimation of local defects of loaded slabs considering a step change in design diagram. *Journal of Construction and Architecture*. 2015; 2(49):89-108. EDN TOLUXH. (rus.).
10. Liu J., Tian Y., Orton S.L., Said A.M. Resistance of flat-plate buildings against progressive collapse. I: Modeling of slab-column connections. *Journal of Structural Engineering*. 2015; 141(12). DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001294
11. Yi W.J., Zhang F.Z., Kunnath S.K. Progressive collapse performance of RC flat plate frame structures. *Journal of Structural Engineering*. 2014; 140(9). DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000963
12. Russell J.M., Owen J.S., Hajirasouliha I. Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss. *Engineering Structures*. 2015; 99:28-41. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.04.040
13. Kabancev O.V., Mitrovic B. For the selection of characteristics of limit states of monolithic reinforced concrete systems for the mode of progressive drop. *Textile Industry Technology*. 2018; 6(378):234-241. EDN TTXZYZ. (rus.).
14. Kolchunov V.I., Kljueva N.V., Buhtjarova A.S. Strength of joints in spatial reinforced concrete frames of high rise buildings under actions beyond design basis. *Building and Reconstruction*. 2011; 5(37):21-32. EDN OIRNVV. (rus.).
15. Trekin N.N., Sarkisov D.Yu., Krylov V.V., Yvstafieva E.B., Andrian K.R. Strength of monolithic reinforced concrete slabs for punching under static and dynamic loading. *Building and Reconstruction*. 2022; 5(103):67-79. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-103-5-67-79. EDN HCBULC. (rus.).
16. Micallef K., Sagaseta J., Ruiz M.F., Muttoni A. Assessing punching shear failure in reinforced concrete flat slabs subjected to localised impact loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2014; 71:17-33. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.04.003
17. Ulaeto N. Numerical modelling of symmetric and asymmetric punching and post-punching shear responses of RC flat slabs. *11th European LS-DYNA Conference 2017*. 2017.
18. Melo G., Regan P.E. Post-punching resistance of connections between flat slabs and interior columns.

Magazine of Concrete Research. 1998; 50(4):319-327. DOI: 10.1680/mac.1998.50.4.319

19. Fernández Ruiz M., Mirzaei Y., Muttoni A. Post-punching behavior of flat slabs. *ACI Structural Journal*. 2013; 110(5). DOI: 10.14359/51685833

20. Tamrazyan A.G. Conceptual approaches to robustness assessment of building structures, buildings and facilities. *Reinforced Concrete Structures*. 2023; 3(3):62-74. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.62-74. EDN IKRNWX. (rus.).

21. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 4(80):73-80. DOI: 10.18720/MCE.80.7. EDN XYLDTF.

22. Lubliner J., Oliver J., Oller S., Onate E. A plastic-damage model for concrete. *International Journal*

of Solids and Structures. 1989; 25(3):299-326. DOI: 10.1016/0020-7683(89)90050-4

23. Rasoul Z.M.R.A., Mtaher H.M.A. Accuracy of concrete strength prediction behavior in simulating punching shear behavior of flat slab using finite element approach in Abaqus. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019; 7(4):1933. DOI: 10.21533/pen.v7i4.943

24. Genikomsou A.S., Polak M.A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. *Engineering Structures*. 2015; 98:38-48. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.04.016

25. Alekseytsev A.V., Antonov M.D. Dynamics of reinforced concrete non-beam frames in case of damage to slabs punching. *Building and Reconstruction*. 2021; 4(96):23-34. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-23-34. EDN UJXFML. (rus.).

Received February 13, 2024.

Adopted in revised form on February 15, 2024.

Approved for publication on May 31, 2024.

B I O N O T E S: **Anatoly V. Alekseytsev** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; aalexw@mail.ru;

Mikhail D. Antonov — postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6327-7406, ID RSCI: 1101963; mishany96969@mail.ru.

Contribution of the authors:

Anatoly V. Alekseytsev — preparing a conception of investigation, making a method of investigation, scientific editing, making conclusion.

Mikhail D. Antonov — analyzing research material, experimental testing; processing the results, creating and analyzing of FE models, preparing a text, making conclusion.

The authors declare that they have no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.012

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483

Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов

Дмитрий Николаевич Лазовский¹, Артур Иванович Гиль¹,
Дмитрий Олегович Глухов²

¹ Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (ПГУ);
г. Новополоцк, Республика Беларусь;

² Софтклуб; г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Сжатые сталежелезобетонные конструкции в связи с требованиями уменьшенных размеров поперечных сечений для вертикальных несущих конструкций при высокой прочности и жесткости конструкций, а также их огнестойкости во всем мире находят широкое применение при строительстве высотных зданий, зрелищных сооружений и др. Методы их расчета постоянно совершенствуются. Деформационный подход к расчету позволяет получать параметры их напряженно-деформированного состояния (НДС) на любой стадии деформирования под нагрузкой, учитывать физическую нелинейность работы материалов, стадийность нагружения.

Материалы и методы. Выборка сжатых сталежелезобетонных элементов для теоретического исследования составлена по данным, опубликованным в открытых источниках. Создана модель поперечного сечения с учетом совместной работы бетона, жесткой и гибкой арматуры, диаграмм их деформирования с точки зрения физической нелинейности. Предложен критерий разрушения поперечного сечения сталежелезобетонного элемента без ограничения предельных деформаций материалов при сжатии.

Результаты. Сформулированы предпосылки использования деформационного подхода к расчету сталежелезобетонных элементов. Рассмотрены две стадии их работы: при действии вынужденных деформаций усадки при твердении бетона и последующем нагружении. На примерах принятой выборки сжатых сталежелезобетонных элементов показаны преимущества деформационного подхода при их расчете.

Выводы. Деформационный подход к расчету дает возможность получать параметры НДС сжатых сталежелезобетонных элементов произвольной формы поперечного сечения с различным распределением армирования по поперечному сечению, учитывать нелинейность деформирования материалов, усадку бетона. Предложенный критерий разрушения сжатых сталежелезобетонных элементов позволяет в полной мере учесть перераспределение усилий между бетоном, жесткой и гибкой арматурой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сжатый сталежелезобетонный элемент, деформационный подход, диаграммы деформирования, система уравнений равновесия и совместности деформаций поперечного сечения, гипотеза плоских сечений, критерий разрушения, нелинейность деформирования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1469–1483. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483

Автор, ответственный за переписку: Артур Иванович Гиль, a.hil@psu.by.

Deformation approach to the calculation of compressive strength of steel-reinforced concrete elements

Dzmitry N. Lazouski¹, Artur I. Hil¹, Dzmitry O. Hlukhau²

¹ Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk; Novopolotsk, Republic of Belarus;

² Softclub; Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. Compressed steel-reinforced concrete structures, due to the requirements of reduced cross-sectional dimensions for vertical load-bearing structures with high strength and rigidity of structures, as well as their fire resistance, are widely used throughout the world in the construction of high-rise buildings, entertainment structures, etc. Methods for their calculation are constantly being improved. The deformation approach to calculation makes it possible to obtain the parameters of their stress-strain state (SSS) at any stage of deformation under load, to take into account physical nonlinearity of the materials and the loading stages.

Materials and methods. The selection of compressed steel-reinforced concrete elements for the theoretical study was made according to the data published in open sources. A cross-sectional model was compiled, taking into account the joint work of concrete, rigid and flexible reinforcement, and their deformation diagrams, taking into account physical nonlinearity.

A criterion for the destruction of the cross section of a steel-reinforced concrete element without limiting the limiting deformations of materials under compression is proposed.

Results. The prerequisites for using the deformation approach to the calculation of steel-reinforced concrete elements are formulated. Two stages of their operation are considered: under the action of forced shrinkage deformations during concrete hardening and subsequent loading. Using examples of the accepted specimen of compressed steel-reinforced concrete elements, the advantages of the deformation approach in their calculation are shown.

Conclusions. The deformation approach to calculation makes it possible to obtain the SSS parameters of compressed steel-reinforced concrete elements of arbitrary cross-section shape with different distribution of reinforcement over the cross-section, to take into account the nonlinearity of deformation of materials, concrete shrinkage. The proposed criterion for the destruction of compressed steel-reinforced concrete elements allows to take into account the redistribution of forces between concrete, rigid and flexible reinforcement to full extent.

KEYWORDS: compressed steel-reinforced concrete element, deformation approach, deformation diagrams, system of equations of equilibrium and joint deformation of cross-section, hypothesis of plane sections, failure criterion, nonlinearity of deformation

FORCITATION: Lazouski D.N., Hil A.I., Hlukhau D.O. Deformation approach to the calculation of compressive strength of steel-reinforced concrete elements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1469-1483. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483 (rus.).

Corresponding author: Artur I. Hil, a.hil@psu.by.

ВВЕДЕНИЕ

Сталежелезобетонные конструкции в XXI в. находят широкое применение во всем мире при строительстве высотных жилых и общественных многоэтажных зданий, зрелищных сооружений в связи с требованиями уменьшенных размеров поперечных сечений для вертикальных несущих конструкций при высокой прочности и жесткости конструкций, а также их огнестойкости [1–4]. Увеличение прочности и жесткости сжатых сталежелезобетонных элементов достигается увеличением степени армирования их поперечного сечения до 17–20 % и более за счет использования жесткой арматуры из прокатных или сварных профилей преимущественно без замкнутых полостей в поперечном сечении.

Следует отметить, что при появлении сталежелезобетонных конструкций в конце XIX – первой половине XX в. совмещение в одном элементе двух основных конструкционных материалов — стали и железобетона производилось в основном с целью увеличения их огнестойкости за счет защитных свойств бетона. При этом, как дополнительный эффект, отмечалась их более высокая несущая способность и жесткость [3–7]. Не уделялось должного внимания соединительным элементам для совместной работы стальных элементов с бетоном. В большинстве случаев совместная работа составляющих сталежелезобетонных элементов частично решалась за счет адгезионных свойств бетона и трения стального элемента по контакту с бетоном [5–7].

На современном этапе развития сталежелезобетонных конструкций обеспечение совместной работы стальной и железобетонной составляющих выполняется установкой соединительных элементов в виде жестких или гибких упоров, анкеров, стаб-болтов

и др.^{1, 2, 3, 4, 5} Совместная работа без деформаций сдвига относительно друг друга в зоне контакта всех составляющих сталежелезобетонных элементов позволяет предположить линейное распределение относительных деформаций по их поперечному сечению [8–10].

Метод расчета по допускаемым напряжениям сталежелезобетонных конструкций на ранних этапах их развития основывался на предположении упругой работы бетона и стали. Длительность внешнего воздействия с проявлением ползучести бетона учитывалась снижением его модуля упругости [7].

Метод расчета по предельному равновесию в классическом понимании для железобетона с предположением пластических деформаций бетона и стали в предельной по прочности стадии получил широкое распространение для сталежелезобетона. Названный метод расчета в интерпретации метода предельных состояний сталежелезобетонных элементов в предельной стадии с учетом пластических деформаций бетона и арматуры и ограниченно пластических деформаций профильной стали исполь-

¹ Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой. М. : Стройиздат, 1978. 57 с.

² EN 1994-1-1:2005. Еврокод 4. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. Ч. 1. Общие правила для зданий и сооружений. М., 2011. 123 с.

³ Руководство для проектировщиков к Еврокоду 4: Проектирование сталежелезобетонных конструкций EN 1994-1-1. М., 2013.

⁴ СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. М., 2017.

⁵ ТКП 45-5.03-16–2005 (02250). Конструкции сталежелезобетонные покрытий и перекрытий. Правила проектирования / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2006. 71 с.

зуется в нормативных документах до настоящего времени^{3, 6, 7} [11].

Сжатые сталежелезобетонные вертикальные элементы высотных зданий в виде колонн нижних этажей могут воспринимать сжимающие нагрузки 15–20 тыс. т и более. При связевой конструктивной системе здания колонны воспринимают главным образом сжимающую нагрузку, приложенную в их центре тяжести. Однако учет случайных эксцентриситетов в обоих направлениях согласно требованиям нормативных документов вызывает появление изгибающих моментов 1000–1200 тм, что существенно усложняет расчет [12–15].

Названные методы расчета сталежелезобетонных элементов при внешних воздействиях рассматривают только предельную стадию перед разрушением, не учитывают нелинейность деформирования составляющих их поперечное сечение материалов и перераспределение усилий между ними. Учет физической нелинейности при расчете параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) сжатых сталежелезобетонных элементов даст возможность повысить точность расчетных моделей, как отмечалось в научных исследованиях [16–19].

Развитие вычислительных возможностей современной техники позволяет к расчету сталежелезобетонных элементов применить численные методы расчета, учесть накопление деформаций всех составляющих поперечного сечения на всех этапах жизненного цикла конструкции (от момента времени ее изготовления до предельного состояния)⁸ [16–26]. Деформационный подход к расчету поперечного сечения сталежелезобетонного элемента, состоящего из различных материалов с различными прочностными и деформационными характеристиками, распределенных по поперечному сечению (с арматурой и жесткими профилями, не сосредоточенными у противоположных граней), дает возможность учесть стадийность работы конструкции, связанную с последовательным включением в работу составных частей поперечного сечения, усадку и ползучесть бетона, предварительное напряжение стали, а также наглядно графически представить параметры их НДС [27–32].

В основу деформационного метода расчета параметров НДС сталежелезобетонных элементов положены допущение об отсутствии деформаций

сдвига в месте контакта стали и бетона (справедлива гипотеза плоских сечений), диаграммы деформирования стали и бетона, уравнения равновесия внутренних усилий [16, 18, 29–32].

Цель исследования — применение деформационного подхода для расчета сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов, который учитывает физическую нелинейность деформирования бетона, арматуры и стали прокатных или сварных профилей, усадку бетона, стадийность нагружения составляющих поперечного сечения и позволяет получать их параметры НДС на любой стадии работы при внешних воздействиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Верификация методики расчета сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов на основе деформационного подхода выполнялась путем сопоставления теоретических значений сопротивления сжатию N_u , вычисленных по предлагаемой методике, со значениями сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов в предельной стадии, вычисленных по методике действующих нормативных документов^{3, 4, 7, 8}.

Выборка численных исследований для верификации методики составлена по данным расчетов сжатых сталежелезобетонных элементов, приведенных в работе [13] и методическом пособии по расчету и проектированию сталежелезобетонных конструкций с жесткой арматурой⁷ с продольным армированием сварными или прокатными профилями и арматурными стержнями.

В качестве расчетной диаграммы деформирования бетона при сжатии призменной прочностью f_c с начальным модулем упругости E_c , устанавливающей зависимость между напряжениями σ_c и относительными деформациями ε_c , принимается нелинейная диаграмма состояния бетона с ниспадающей ветвью, рекомендованная Европейским комитетом по бетону (ЕКБ-ФИП)^{9, 10}, без ограничения ее длины по деформациям с целью получения полного перераспределения усилий между составляющими поперечного сечения сталежелезобетонного элемента (рис. 1, а):

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = \frac{k_c \eta_c - \eta_c^2}{1 + (k_c - 2)\eta_c}; \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = \frac{k_{ct} \eta_{ct} - \eta_{ct}^2}{1 + (k_{ct} - 2)\eta_{ct}}, \quad (1)$$

$$\text{где } k_c = \frac{1,1E_c |\varepsilon_{c1}|}{f_c}; \eta_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}};$$

$$\varepsilon_{c1} = f_c \left(0,12 + \frac{18,8}{f_c} \right) \cdot 10^{-4}; f_{ct} = 0,232 \sqrt[3]{f_c^2};$$

⁶ Методические рекомендации по расчету и проектированию сталежелезобетонных перекрытий. М. : Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2018. 62 с.

⁷ Методическое пособие по расчету и проектированию сталежелезобетонных конструкций с жесткой арматурой. М. : Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2018. 49 с.

⁸ Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. М. : Стройиздат, 1988, 120 с.

⁹ EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004. Pp. 33–34.

¹⁰ СП 5.03.01–2020. Бетонные и железобетонные конструкции. Минск : Министерство строительства и архитектуры Республики Беларусь, 2020. С. 53–54.

$$k_{ct} = \frac{E_{ct}\epsilon_{ct1}}{f_{ct}}; \eta_{ct} = \frac{\epsilon_{ct}}{\epsilon_{ct1}}.$$

Для получения полной нелинейной диаграммы деформирования бетона сталежелезобетонного элемента при растяжении, согласно трудам [33–35], находим начальный модуль упругости бетона при растяжении E_{ct} , относительные деформации ϵ_{ct1} в пиковой точке диаграммы деформирования и предельную растяжимость бетона ϵ_{ctu} :

$$E_{ct} = \frac{10^7 \cdot f_{ct}}{750 + 81,55 \cdot f_{ct}}; \epsilon_{ct1} = \frac{2 \cdot f_{ct}}{E_{ct}}; \epsilon_{ctu} = \frac{K \cdot \epsilon_{ct1}}{2};$$
$$K = 6,4 + 0,1223 f_c.$$

Расчетная диаграмма деформирования арматуры (стали прокатных или сварных профилей) при сжатии и растяжении сопротивлением f_y (f_{yt}) с начальным модулем упругости E_s (E_{st}), устанавливающей зависимость между напряжениями σ_s (σ_{st}) и относительными деформациями ϵ_s (ϵ_{st}), принимается билинейной с ограничением относительных деформаций удлинения при разрыве (рис. 1, б). При этом расчетная диаграмма деформирования для стержневой арматуры класса S500 принимается¹¹ с наклонным участком, определяемым показателем $k = \sigma_s / f_y$, зависящим от класса деформативности (пластичности) арматуры, а для стержневой арматуры класса S400 и стали жесткой арматуры — с горизонтальным участком (диаграмма Прандтля). Предельное значение относительной деформации растянутой стержневой и жесткой арматуры равно $\epsilon_{su} = \epsilon_{stu} = 0,025$.

Для верификации методики расчета сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов на основе деформационного подхода принята конструкция

колонны нижнего этажа длиной 8,4 м высотного здания квадратного поперечного сечения с размерами 1500×1500 мм из бетона с начальным модулем упругости $E_c = 42 \cdot 10^3$ МПа, расчетным сопротивлением $f_c = 31,4$ МПа с учетом длительности действия нагрузки и высоты слоя бетонирования более 1,5 м. Колонна симметрично армирована жесткой арматурой из двух накрест расположенных двутавров с модулем упругости $E_{st} = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, расчетным сопротивлением $f_{yt} = 409$ МПа и гибкой арматурой из 36 стержней диаметром 36 мм из стали класса A500C ($E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа, $f_y = 435$ МПа) (рис. 2, а). От внешних воздействий колонна воспринимает усилие сжатия $N = 149\,700$ кН. Случайные эксцентриситеты в направлении осей x и y равны $e_{ax} = e_{ay} = 5$ см, и с учетом значения коэффициента влияния продольного изгиба $\eta = 1,131$ колонна воспринимает изгибающие моменты $M_x = M_y = 8470$ кНм [13].

Методика расчета прочности на косое внецентренное сжатие сталежелезобетонных элементов, изложенная в действующих нормативных документах^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}, предусматривает расчет предельного сжимающего усилия N , исходя из значений предельных усилий элемента при центральном $N_{ult} = 216\,580$ кН (с учетом коэффициента⁴ $\varphi = 0,92$ $N_{ult} = 23\,541$ кН) и внецентренном в направлении обеих осей $N_x = N_y = 191\,830$ кН приложении сжимающего усилия по формуле^{4, 12}:

$$N = \frac{1}{\frac{1}{N_x} + \frac{1}{N_y} - \frac{1}{N_{ult}}} =$$
$$= \frac{1}{\frac{1}{191\,830} + \frac{1}{191\,830} - \frac{1}{216\,580}} = 172\,150 \text{ кН.}$$

¹¹ СТБ EN 10080–2011. Арматура для железобетонных конструкций. Арматура свариваемая. Общие технические условия. Минск : Госстандарт, 2011. 53 с.

¹² Сахновский К.В. Железобетонные конструкции. Киев : Будівельник, 1961. 840 с.

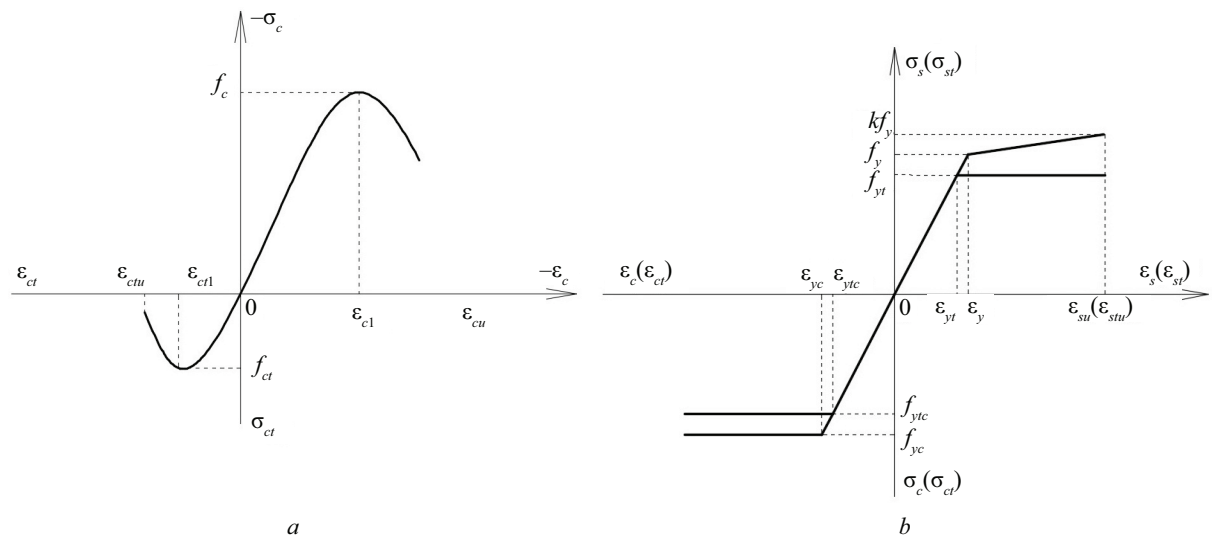


Рис. 1. Расчетные диаграммы деформирования при сжатии и растяжении бетона (а); стержневой и жесткой арматуры (б)
Fig. 1. Calculated diagrams of deformation under compression and tension concrete (a); rod and rigid reinforcement (b)

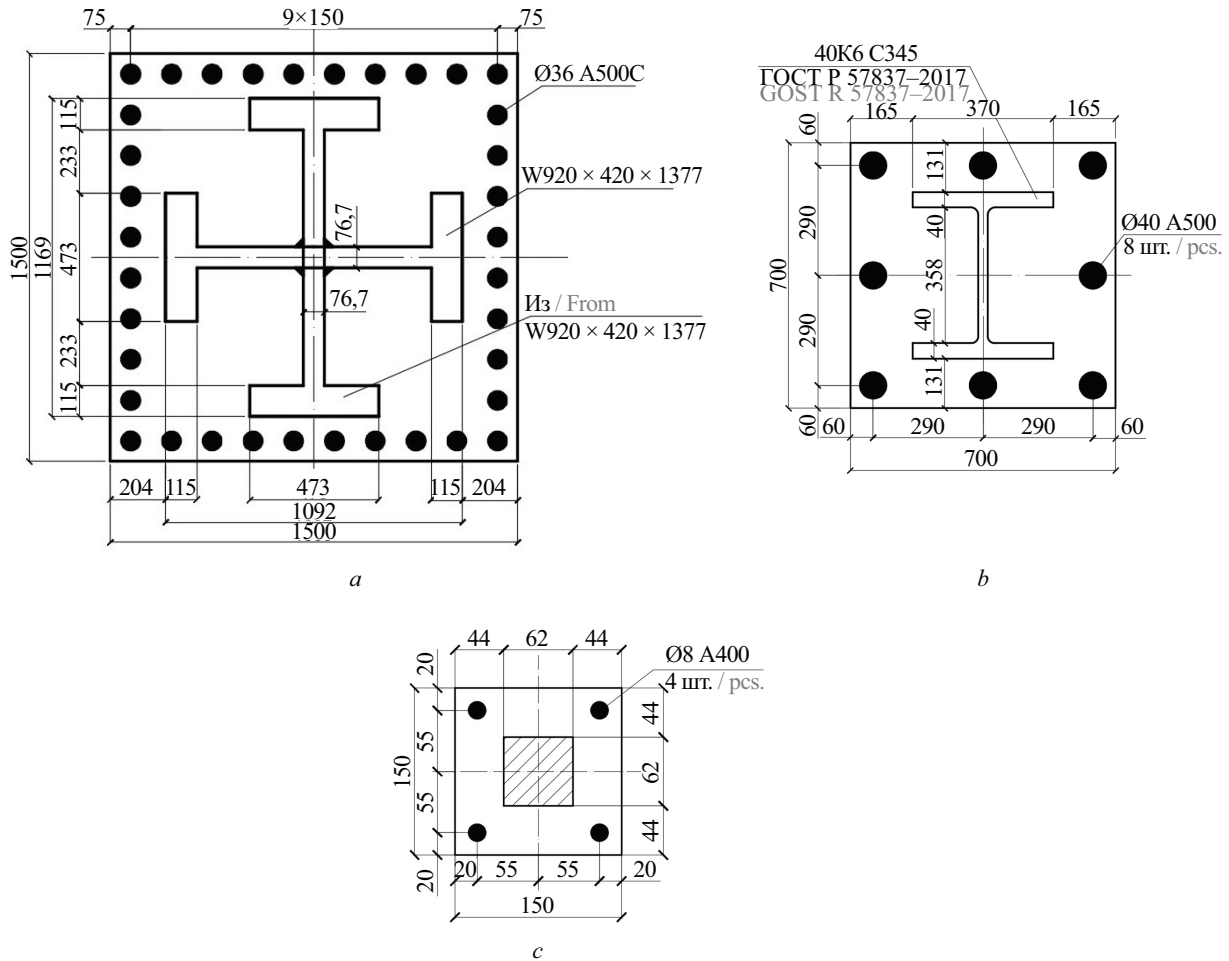


Рис. 2. Поперечное сечение сталежелезобетонной колонны с жесткой арматурой в виде: *a* — двух накрест расположенных сварных двутавров [13]; *b* — прокатного двутавра⁷; *c* — сердечника сплошного сечения⁷

Fig. 2. Cross section of a steel-reinforced concrete column with rigid reinforcement in the form of: *a* — two cross-positioned welded I-beams [13]; *b* — rolled I-beam⁷; *c* — solid core⁷

Помимо вышеназванного сталежелезобетонного элемента, для верификации методики расчета на основе деформационного подхода в выборку входят две колонны с жесткой арматурой, армированные, кроме стержневой арматуры, прокатным двутавром и стальным сердечником сплошного сечения⁷.

Сталежелезобетонная колонна среднего этажа рамного каркаса (статически неопределимая) длиной 3,0 м квадратного поперечного сечения с размерами по рис. 2, *b* из бетона с начальным модулем упругости $E_c = 32,5 \cdot 10^3$ МПа и расчетным сопротивлением $f_c = 15,3$ МПа с учетом длительности нагрузки. Жесткая арматура — двутавр 40К6 по ГОСТ Р 57837–2017 из стали с модулем упругости $E_{st} = 2,06 \cdot 10^5$ МПа и расчетным сопротивлением $f_{st} = 310$ МПа. Стержневая арматура расположена по контуру и представляет собой 8 стержней диаметром 40 мм класса А500 с расчетным сопротивлением $f_y = 435$ МПа и модулем упругости $E_s = 2 \times 10^5$ МПа. Нагрузки: изгибающий момент в плоскости наибольшей жесткости двутавра $M_y = 490,5$ кНм; изгибающий момент в плоскости наименьшей жест-

кости двутавра $M_x = 196,2$ кНм; продольная сила $N = 7700,0$ кН.

Предельное сжимающее усилие N , вычисленное по формуле (2) исходя из значений предельных усилий элемента при центральном $N_{ult} = 23\,197$ кН (с учетом коэффициента⁴ $\phi = 0,92$, $N_{ult} = 25\,214,6$ кН) и внецентренном приложении сжимающего усилия в направлении обеих осей $N_x = 13\,319,9$ кН; $N_y = 10\,848,6$ кН равно 7837 кН.

Сталежелезобетонная колонна длиной 0,6 м среднего этажа рамного каркаса квадратного поперечного сечения с размерами по рис. 2, *c* из бетона с начальным модулем упругости $E_c = 17,5 \cdot 10^3$ МПа и расчетным сопротивлением $f_c = 51,3$ МПа (с учетом длительности нагрузки). Жесткая арматура — сплошной сердечник квадратного поперечного сечения из стали с модулем упругости $E_{st} = 2,06 \cdot 10^5$ МПа и расчетным сопротивлением $f_{st} = 245$ МПа. Стержневая арматура представляет собой 4 стержня диаметром 8 мм класса А400 с расчетным сопротивлением $f_y = 400$ МПа и модулем упругости $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа. Продольное сжимающее усилие $N = 650,0$ кН с эксцентриситетами в направлении обеих осей $e_{0,x} = 10,66$ мм и $e_{0,y} = 22,92$ мм

(с учетом коэффициента $\eta = 1,066$ и случайного эксцентриситета $e_{ax} = e_{ay} = 10$ мм).

Предельное сжимающее усилие N , вычисленное по формуле (2) исходя из значений предельных усилий элемента при центральном $N_{ult} = 1969$ кН (с учетом коэффициента⁴ $\varphi = 0,92$ $N_{ult} = 2140$ кН) и внецентренном приложении сжимающего усилия в направлении обеих осей $N_x = 1065,4$ кН; $N_y = 1766,1$ кН, составляет 961,5 кН.

Все сталежелезобетонные элементы выборки являются кососжатыми с постоянным заданным эксцентриситетом приложения усилия в процессе деформирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчетная модель сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов с учетом стадийности их изготовления предполагает суммирование относительных деформаций, составляющих поперечного сечения на каждой стадии.

В поперечном сечении сталежелезобетонного элемента усадка бетона сдерживается жесткой и гибкой арматурой, в которой уже в процессе твердения бетона возникают дополнительные усилия, которые находятся в равновесии. При полном контакте с бетоном жесткой и гибкой арматуры, который предполагает их совместное деформирование на всех стадиях работы, и высокой степени их армирования возможно появление усадочных трещин, пронизывающих все сечение бетона. Поэтому учет деформаций усадки бетона является важным моментом при расчете параметров НДС сжатого сталежелезобетонного элемента.

На первой стадии для учета относительных деформаций усадки бетона при его твердении моделируется поперечное сечение незагруженного внешней нагрузкой сталежелезобетонного элемента. Рассматривается элемент, состоящий из жесткой и гибкой арматуры, для которого предполагается линейное распределение относительных деформаций по поперечному сечению (гипотеза плоских сечений) и на который воздействуют вынужденные деформации от усадки бетона. При действии усадочных деформаций в жесткой и гибкой арматуре появляются деформации сжатия, а в бетоне — деформации растяжения. При несимметричном армировании сталежелезобетонного элемента на поле относительных деформаций от усадки бетона дополнительно накладывается поле вторичных относительных деформаций от внецентренного приложения усилий в бетоне относительно центра тяжести жесткой и гибкой арматуры поперечного сечения, что эквивалентно действию изгибающего момента.

Согласно нормативным документам^{9, 11} относительную деформацию полной усадки $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ бетона в момент времени t имеющего возраст t_s к моменту

начала воздушно-сухого хранения, определяют по формуле:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s), \quad (3)$$

где $\varepsilon_{cbs}(t)$ — относительная деформация базовой усадки бетона, зависящая от прочности бетона, вида и класса прочности цемента; $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ — относительная деформация усадки высыхания бетона, учитывающая вид цемента и влияние относительной влажности среды хранения.

В общем случае несимметричного поперечного сечения система уравнений для расчета параметров НДС сжатого сталежелезобетонного элемента в двух плоскостях, состоящая из уравнений равновесия и гипотезы плоских сечений, описывающей положение плоскости распределения относительных деформаций по его поперечному сечению, на первой стадии расчета имеет вид:

$$\begin{cases} \iint \sigma(\varepsilon(x, y)_I)(x - x_0) dx dy = 0 \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y)_I)(y - y_0) dx dy = 0 \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y)_I) dx dy = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где $s(x, y)$, $e(x, y)_I$ — нормальные напряжения, относительные деформации на первой стадии расчета в элементарной площадке бетона, жесткой или гибкой арматуры с координатами (x, y) ; x_0 и y_0 — координаты центра тяжести поперечного сечения сталежелезобетонного элемента; $1/r_x$ и $1/r_y$ — кривизна продольной оси сталежелезобетонного элемента относительно соответственно оси x и y ; ε_{zs} — относительная деформация от действия усилия усадки бетона, соответствующая его центральному приложению.

Решая систему уравнений равновесия и совместности деформаций с учетом деформаций усадки (4) нелинейной деформационной модели итерационным методом, получаем параметры НДС сталежелезобетонного элемента при действии вынужденных деформаций усадки бетона при его твердении. Поскольку на данной стадии расчета выполнение уравнений равновесия достигается при малых значениях внутренних усилий в элементах поперечного сечения, критерии остановки итерационного процесса по продольной силе и изгибающему моменту принимаются на несколько порядков меньше, чем при расчете в случае силового воздействия. Полученные на первой стадии расчета относительные деформации сталежелезобетонного элемента будут являться исходными на последующих стадиях его работы.

Для примера рассмотрим поперечное сечение сталежелезобетонной колонны (рис. 2, а) из обычного бетона с симметричным армированием жесткой и гибкой арматурой при воздействии усадки бетона при его твердении с вынужденными относи-

тельными деформациями $\epsilon_{cs}(t, t_s) = 0,00025$. Результаты расчета представлены на рис. 3.

В бетоне сталежелезобетонного элемента при действии усадки бетона растягивающие нормальные напряжения составляют 1,3 МПа, а сжимающие напряжения в жесткой и гибкой арматуре распределяются в соответствии с их модулями упругости и равны соответственно 6,2 и 5,9 МПа. В точках контакта жесткой и гибкой арматуры с бетоном сумма относительных деформаций арматуры и растянутого в результате усадки бетона остается постоянной, равной значению относительной деформации усадки бетона $\epsilon_{cs}(t, t_s)$. При больших значениях относительной деформации усадки бетона расчет показывает появление трещин нормального отрыва

в бетоне из-за превышения предельных деформаций растяжения бетона ϵ_{sti} .

На второй стадии расчета система уравнений для расчета параметров НДС сжатого сталежелезобетонного элемента в двух плоскостях имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \iint \sigma(\epsilon(x, y)_{II})(x - x_0) dx dy &= Ne_{0x} \\ \iint \sigma(\epsilon(x, y)_{II})(y - y_0) dx dy &= Ne_{0y} \\ \iint \sigma(\epsilon(x, y)_{II}) dx dy &= N \\ \epsilon(x, y)_{II} &= \epsilon_{zN} + 1/r_x(x - x_0) + 1/r_y(y - y_0) + \epsilon(x, y)_I \end{aligned} \right. \quad , (5)$$

где $\sigma(x, y)$, $\epsilon(x, y)_{II}$ — нормальные напряжения, относительные деформации на первой стадии расчета в элементарной площадке бетона, жесткой или гибкой

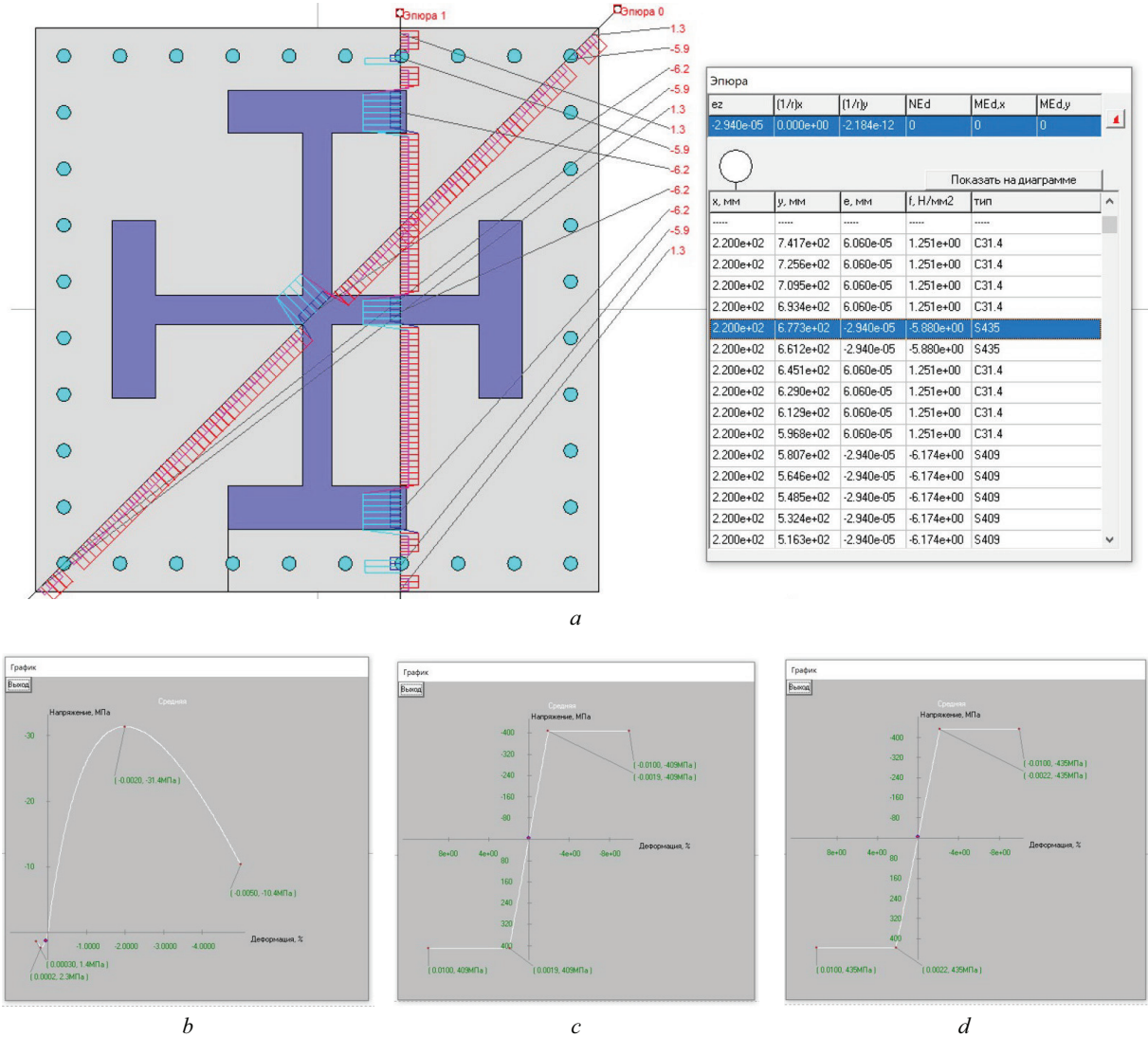


Рис. 3. Результат расчета, распределения: *a* — усадочных относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению сталежелезобетонной колонны (цифры красным цветом справа от поперечного сечения — нормальные напряжения, МПа); *b* — относительных деформаций и нормальных напряжений в бетоне; *c* и *d* — то же, соответственно в гибкой и жесткой арматуре

Fig. 3. Calculation result: *a* — distribution of shrinkage relative deformations and normal stresses along the cross section of a steel-reinforced concrete column (numbers in red to the right of the cross section — normal stresses in MPa); *b* — relative deformations and normal stresses in concrete; *c* and *d* — the same, respectively, in flexible and rigid reinforcement

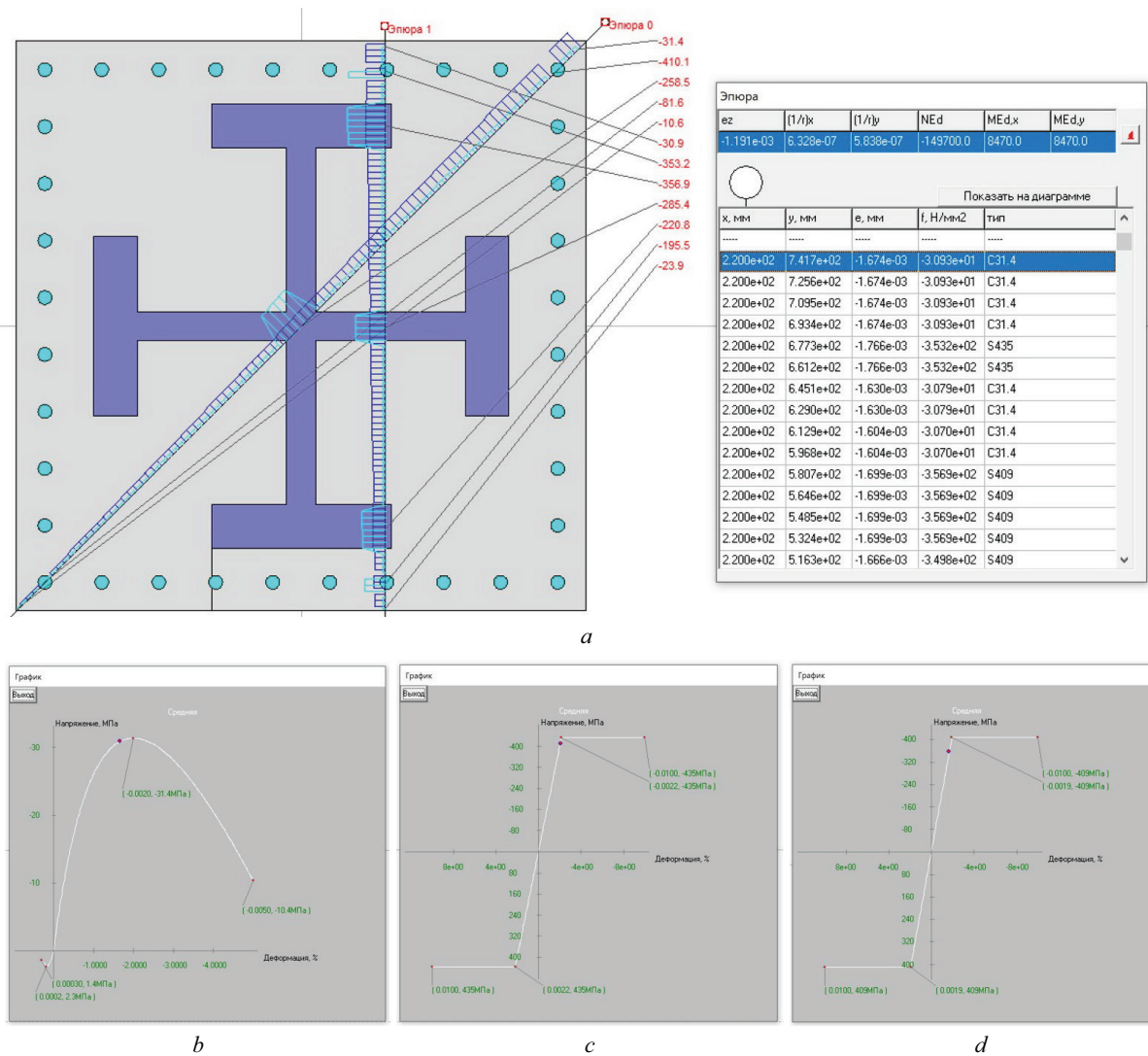


Рис. 4. Результат расчета, распределения: *a* — относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению сталежелезобетонной колонны при действующем продольном усилии $N = 149\,700$ кН (цифры красным цветом справа от поперечного сечения — нормальные напряжения, МПа); *b* — относительных деформаций и нормальных напряжений в бетоне; *c* и *d* — то же, соответственно в гибкой и жесткой арматуре

Fig. 4. Calculation result: *a* — distribution of relative deformations and normal stresses along the cross section of a steel-reinforced concrete column with an acting longitudinal force $N = 149,700$ kN (numbers in red to the right of the cross section — normal stresses in MPa); *b* — relative deformations and normal stresses in concrete; *c* and *d* — the same, respectively, in flexible and rigid reinforcement

арматуры с координатами (x, y) ; ϵ_{zN} — относительная деформация в центре тяжести поперечного сечения от действия продольного сжимающего усилия.

Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений в рассматриваемом поперечном сечении сталежелезобетонной колонны (рис. 1, *a*) при действии сжимающего усилия $N = 149\,700$ кН и изгибающих моментов в обоих направлениях $M_x = M_y = 8470$ кНм, полученное на второй стадии расчета, представлено на рис. 4.

Критерием разрушения сжатого сталежелезобетонного элемента принимается максимальное продольное усилие N , при котором уравнения равновесия и уравнения совместности деформаций сходятся (без ограничения сжимающих относительных дефор-

маций материалов, составляющих его поперечное сечение).

Результаты вычисления предельного значения внутренних усилий и распределения относительных деформаций и нормальных напряжений рассматриваемой колонны приведены на рис. 5. Моделирование НДС в предельной стадии работы колонны под нагрузкой показывает достижение относительных деформаций жесткой и гибкой арматуры значений, соответствующих их расчетным сопротивлениям, работу бетона на нисходящей ветви его диаграммы деформирования.

Предельное значение сжимающего продольного усилия с учетом случайных эксцентриситетов в обоих направлениях рассматриваемой сталежеле-

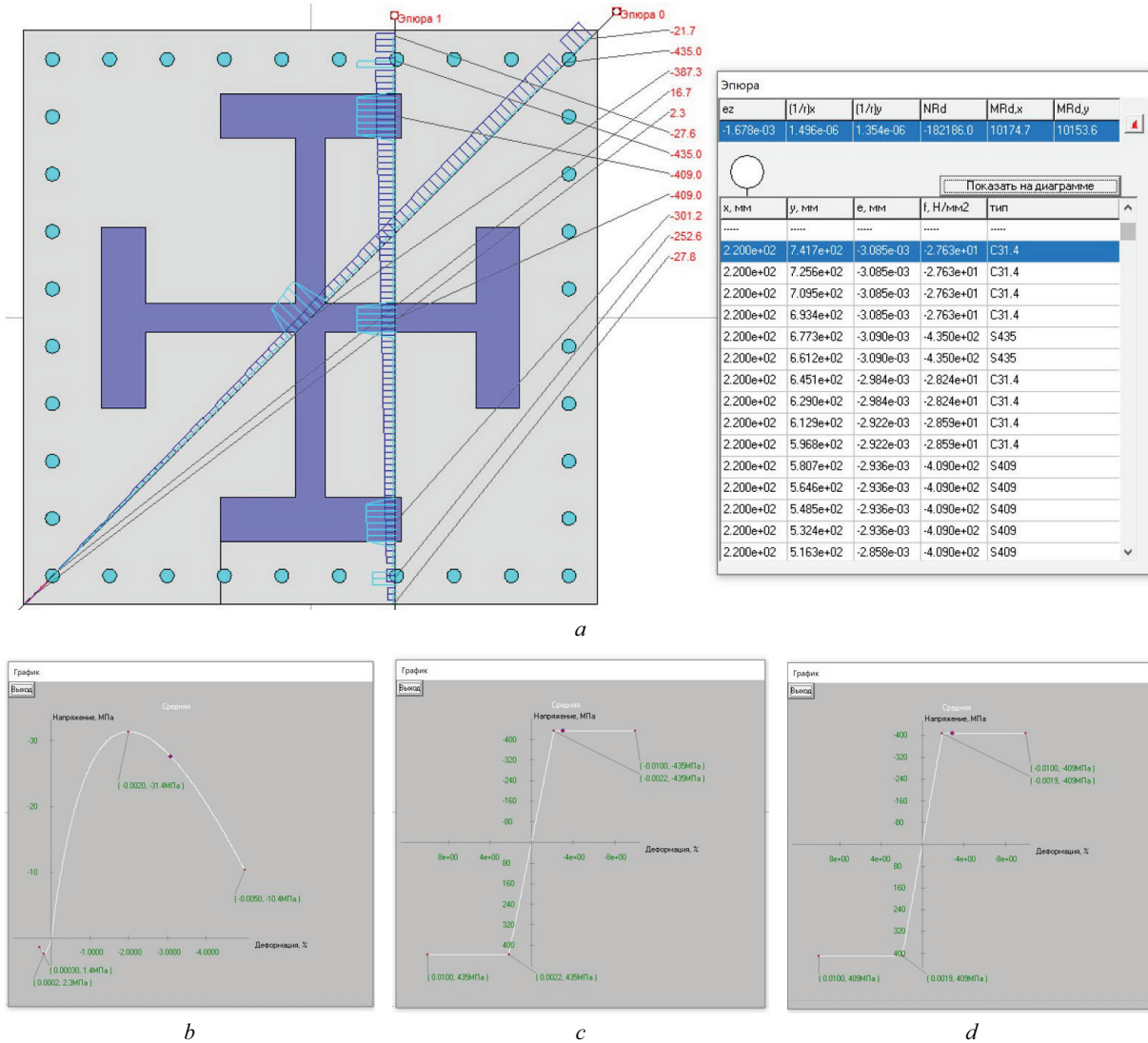


Рис. 5. Результат расчета: *a* — предельного усилия и распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению сталежелезобетонной колонны [13] (цифры красным цветом справа от поперечного сечения — нормальные напряжения в МПа); *b* — относительных деформаций и нормальных напряжений в бетоне; *c* и *d* — то же, соответственно в гибкой и жесткой арматуре

Fig. 5. Calculation result: *a* — ultimate force and distribution of relative deformations and normal stresses along the cross section of a steel-reinforced concrete column [13] (numbers in red to the right of the cross section — normal stresses in MPa); *b* — relative deformations and normal stresses in concrete; *c* and *d* — the same, respectively, in flexible and rigid reinforcement

зобетонной колонны с учетом усадки бетона равно $N = 182\,761,5$ кН, что на 6,2 % превышает значения предельного усилия, вычисленного по нормативной методике в литературном источнике [13]. Аналогичный расчет этой колонны без учета усадки бетона показывает меньшее значение сжимающего предельного усилия $N = 181\,812$ кН, что объясняется перераспределением усилий в поперечном сечении из-за начальных относительных деформаций $\varepsilon(x, y)_1$ в составляющих поперечного сечения: сжимающих — в жесткой и гибкой арматуре и растягивающих — в бетоне. Усадка бетона при его твердении служит своего рода предварительным напрягающим фактором для арматуры сталежелезобетонного элемента и для случая сжатия (при наличии площадки текучести арматуры и неогра-

ниченной длины нисходящей ветви диаграммы деформирования бетона), положительно влияет на значение его предельного сжимающего усилия.

Распределения относительных деформаций и нормальных напряжений в поперечном сечении сталежелезобетонных колонн (рис. 2, *b*, *c*) при действии предельного сжимающего усилия N и соответствующих изгибающих моментов в обоих направлениях M_x и M_y , полученные в результате расчета в соответствии с деформационной моделью без учета усадки бетона, представлены на рис. 6, 7.

Сопоставление полученных результатов расчета предельных усилий при деформационном моделировании поперечного сечения сжатых сталежелезобетонных колонн с предельными усилиями,

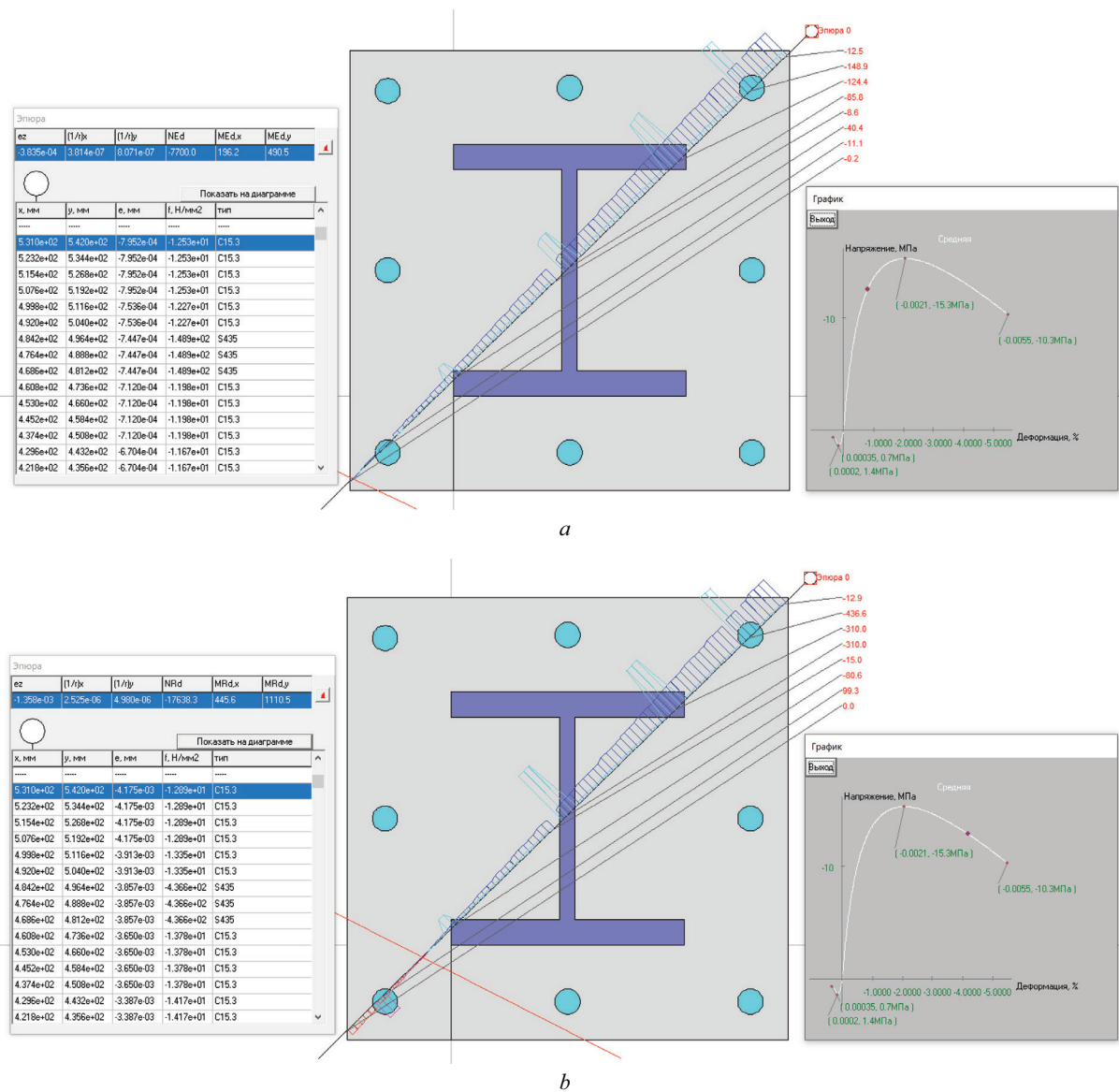


Рис. 6. Результат расчета распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению сталежелезобетонной колонны, армированной прокатным двутавром⁷, при действии: а — продольного усилия $N = 7700$ кН; б — предельного усилия $N = 17\,638$ кН (цифры красным цветом справа от поперечного сечения — нормальные напряжения в МПа)

Fig. 6. The result of calculating the distribution of relative deformations and normal stresses over the cross section of a steel-concrete column reinforced with a rolled I-beam⁷ under the action of: a — longitudinal force $N = 7,700$ kN; b — ultimate force $N = 17,638$ kN (numbers in red to the right of the cross section — normal stresses in MPa)

вычисленными по нормативной методике⁷, показывает превышение 56 и 18,6 %. Моделирование работы сжатых сталежелезобетонных элементов на основе деформационного подхода позволяет получать значения внецентренно приложенного сжимающего усилия образования трещин нормального отрыва на растянутых гранях элементов. Для рассмотренных двух колонн⁷ продольное внецентренно приложенное сжимающее усилие образования трещин равно: для колонны (рис. 2, б) — $N_{cr} = 16\,988$ кН; для колонны (рис. 2, с) — $N_{cr} = 593,2$ кН, что составляет соответственно 96 и 50,2 % от их предельного усилия, и для внецентренно сжатых элемен-

тов зависит от эксцентриситета приложения усилия от внешних воздействий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате настоящего исследования реализован деформационный подход к расчету сжатых сталежелезобетонных элементов, преимущества которого для расчета элементов с распределенной по поперечному сечению арматурой многократно отмечались в литературных источниках [1, 4, 13, 16–18, 30, 32]. Деформационный расчетный метод применительно к сжатым сталежелезобетонным элементам с учетом совместной работы бетона, жесткой и гибкой

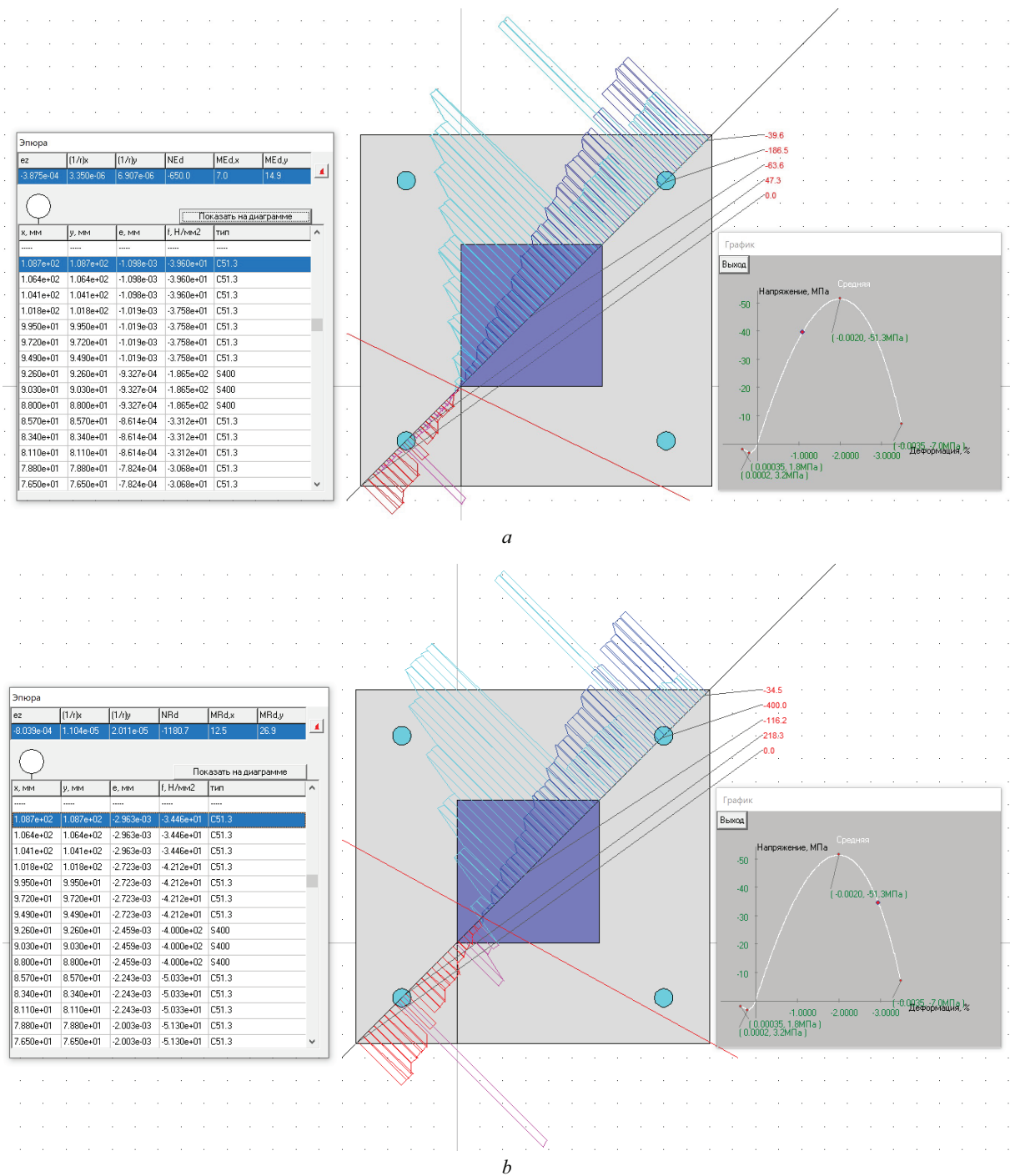


Рис. 7. Результат расчета распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению сталежелезобетонной колонны, армированной сердечником сплошного сечения⁷, при действии: *a* — продольного усилия $N = 650$ кН; *b* — предельного усилия $N = 1180$ кН (цифры красным цветом справа от поперечного сечения — нормальные напряжения в МПа)

Fig. 7. The result of calculating the distribution of relative deformations and normal stresses over the cross section of a steel-reinforced concrete column reinforced with a solid core⁷ under the action of: *a* — longitudinal force $N = 650$ kN; *b* — ultimate force $N = 1,180$ kN (numbers in red to the right of the cross section — normal stresses in MPa)

арматуры, физической нелинейности деформирования материалов позволяет получать распределение нормальных напряжений и относительных деформаций по их поперечному сечению на любой стадии работы, включая усадку бетона при его твердении и образование трещин нормального отрыва.

Предлагаемый общий критерий разрушения сжатых сталежелезобетонных элементов по нормальному сечению в виде максимального сжимающего усилия из условий равновесия и совместного деформирования материалов позволяет в полной мере учитывать перераспределение усилий в поперечном

сечении между бетоном, жесткой и гибкой арматурой.

Деформационная модель сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов дает возможность решать задачи в области проектирования для вновь возводимых элементов и усиления существующих, рассчитывать элементы произвольной формы по-

перечного сечения с различными эксцентриситетами приложения продольных сжимающих усилий. В дальнейшем следует рассмотреть вопросы учета длительности внешнего воздействия, ширины раскрытия трещин, стадийности включения в работу составляющих поперечного сечения материалов, предварительного напряжения жесткой и гибкой арматуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тамразян А.Г., Лолейт А.Ф. История развития теории железобетона : биографический очерк. М. : МГСУ, 2018. 178 с.
2. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России // Успехи современной науки. 2017. Т. 4. № 4. С. 205–208. EDN YROOWX.
3. Кибирева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона // Экология и строительство. 2018. № 2. С. 27–34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004. EDN XWIEZV.
4. Травуш В.И., Конин Д.В., Рожкова Л.С., Крылов А.С. Отечественный и зарубежный опыт исследований работы сталежелезобетонных конструкций на внецентренное сжатие // Строительство и реконструкция. 2016. № 5 (67). С. 31–44. EDN WMYKDD.
5. Васильев А.П. Железобетон с жесткой арматурой. М. ; Л. : Гос. изд. строит. лит., 1941. 123 с.
6. Антонов К.К., Житницкая Э.А. Осевое и внецентренное сжатие железобетонных колонн с арматурой двутаврового профиля // Исследование конструкций высотных зданий. М., 1953. 231 с.
7. Виноградова Н.А., Швец Г.А. Исследования сталежелезобетонных изгибаемых конструкций (обзор) // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 1 (42). С. 114–127. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-1-12. EDN SFPYFY.
8. Замалиев Ф.С. Учет нелинейных свойств материалов и податливости слоев при расчете прочности сталежелезобетонных перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 5. С. 38–40. EDN QAMHXB.
9. Замалиев Ф.С., Тамразян А.Г. Оценка несущей способности сталебетонных балок на основе гнутых профилей // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 8. С. 1220–1229. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1220-1229. EDN ZJTIFYX.
10. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S. Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 3 (79). Pp. 36–44. DOI: 10.18720/MCE.79.4. EDN YOENUT.
11. Алмазов В.О., Арутюнян С.Н. Проектирование сталежелезобетонных плит перекрытий по Еврокоду 4 и российским рекомендациям // Вестник МГСУ. 2015. № 8. С. 51–65. EDN UGUISR.
12. Мартыросян А.С., Травуш В.И., Кашеварова Г.Г. Исследование влияния геометрии жесткой арматуры на распределение нагрузки в элементах сталежелезобетонной конструкции // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2017. № 1 (25). С. 147–158. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.01.13. EDN YORIZL.
13. Десяткин М.А., Конин Д.В., Мартыросян А.С., Травуш В.И. Расчет сталежелезобетонной колонны высотного дома на косое внецентренное сжатие // Жилищное строительство. 2015. № 5. С. 92–95. EDN RUOCED.
14. Травуш В.И., Конин Д.В., Рожкова Л.С., Крылов А.С., Каприелов С.С., Чилин И.А. и др. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на внецентренное сжатие // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 3. С. 127–135. EDN WWOVFVZ.
15. Крылов С.Б., Корнюшина М.П. Численно-экспериментальные исследования прочности сжатых сталежелезобетонных элементов, выполненных с использованием высокопрочного бетона и труб квадратного сечения из стали класса С345 // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 6. С. 53–63. DOI: 10.37153/2618-9283-2023-5-53-63. EDN RTXUBI.
16. Мухамедиев Т.А., Старчикова О.И. Расчет прочности сталежелезобетонных колонн с использованием деформационной модели // Бетон и железобетон. 2006. № 4. С. 18–21. EDN HUGELV.
17. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К расчету прочности, жесткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4 (26). С. 113–120. EDN RSTDVV.
18. Кудинов О.В. Новый подход к оценке прочности сталежелезобетонных перекрытий // Бетон и железобетон. 2010. № 2 (563). С. 14–16.

19. Арленинов П.Д., Крылов С.Б. Современное состояние нелинейных расчетов железобетонных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 3. С. 50–53. EDN ZFIVKZ.
20. Gholamhoseini A., Gilbert R.I., Bradford M. Long-Term Behavior of Continuous Composite Concrete Slabs with Steel Decking // *ACI Structural Journal*. 2018. Vol. 115. Issue 2. DOI: 10.14359/51701133
21. Holomek J., Bajer M. Experimental and Numerical Investigation of Composite Action of Steel Concrete Slab // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 40. Pp. 143–147. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.070
22. Kvocak V., Kozlejova V., Dubecky D. Analysis of encased steel beams with hollow cross-sections // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 40. Pp. 223–228. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.084
23. Lowe D., Das R., Clifton C. Characterization of the splitting behavior of steel-concrete composite beams with shear stud connection // *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 3. Pp. 2174–2179. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.352
24. Nadasky P. Steel-Concrete Composite Beams for Slim Floors—Specific Design Features in Scope of Steel Frames Design // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 40. Pp. 274–279. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.093
25. Soty R., Shima H. Formulation for Maximum Shear Force on L-Shape Shear Connector Subjected to Strut Compressive Force at Splitting Crack Occurrence in Steel-Concrete Composite Structures // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 14. Pp. 2420–2428. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.304
26. Waldmann D., May A., Thapa V.B. Influence of the sheet profile design on the composite action of slabs made of lightweight woodchip concrete // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 148. Pp. 887–899. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.193
27. Лившиц Я.Д. Расчет железобетонных конструкций с учетом влияния усадки и ползучести бетона : учебное пособие. Киев : Вища школа, 1976. 280 с.
28. Сидоров А.В. О закономерностях подobia ползучести и усадки железобетонных элементов // Известия вузов. Серия: Строительство и архитектура. 1988. № 1. С. 5–10.
29. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций. М. : НИИЖБ, 1986.
30. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. М. : Стройиздат, 1982. 287 с.
31. Глухов Д.О., Глухова Т.М., Кундас С.П. Мягкие вычисления для организации компьютерного представления номограмм на примере вычисления предельного коэффициента ползучести // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2010. № 3. С. 2–6. EDN ULXVVD.
32. Лазовский Д.Н., Тур В.В., Глухов Д.О., Лазовский Е.Д. Учет ползучести и усадки бетона по СП 5.03.01–2020 при расчете железобетонных конструкций на основе деформационной расчетной модели // Вестник Брестского государственного технического университета. 2021. № 2 (125). С. 7–12. EDN VUYAHW.
33. Тур В.В., Рак Н.А. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций. Брест : БГТУ, 2003. 252 с. EDN DOFAPF.
34. Bortolotti L. First Cracking Load of Concrete Subjected to Direct Tension (SP-882) // *ACI Materials Journal*. 1991. Vol. 88. Issue 1. DOI: 10.14359/2393
35. Kolleger J. Comparison of Fixed and Rotating Crack Models in the Analysis of Panels, Plates and Shells Subjected to Shear // Concrete Shear in Earthquake. Houston International Workshop, Texas, USA, 1991. Pp. 216–225.

Поступила в редакцию 13 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 6 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Дмитрий Николаевич Лазовский** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций; **Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (ПГУ)**; г. Новополоцк, Республика Беларусь; ул. Блохина, д. 29; РИНЦ ID: 907311, Scopus: 5720341798, ResearcherID: HGC-3867-2022, ORCID: 0000-0001-5278-938X; d.lazovski@psu.by;

Артур Иванович Гиль — кандидат технических наук, заместитель декана инженерно-строительного факультета; **Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (ПГУ)**; г. Новополоцк, Республика Беларусь; ул. Блохина, д. 29; РИНЦ ID: 907375, ORCID: 0000-0002-5627-1438; a.hil@psu.by;

Дмитрий Олегович Глухов — кандидат технических наук, доцент, главный инженер-программист; **Софтклуб**; 220141, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, д. 168/1; Scopus: 57191614869, ORCID: 0000-0003-4983-2919; dzmitry.hlukhau@softclub.by.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G.A.F. Loleit. *History of the development of the theory of reinforced concrete: biographical sketch*. Moscow, MGSU, 2018; 178. (rus.).
2. Babalich V.S., Androsof E.N. Steel-reinforced concrete structures and the prospects for their application in Russian construction practice. *Advances in Modern Science*. 2017; 4(4):205-208. EDN YROOWX. (rus.).
3. Kibireva Iu.A., Astafeva N.S. The use of steel-concrete structures. *Ecologiya i Stroitelstvo*. 2018; 2:27-34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004. EDN XWIEZV. (rus.).
4. Travush V., Konin D.V., Rozhkova L., Krylov A. Domestic and foreign experience in research of composite structures for eccentric compression. *Building and Reconstruction*. 2016; 5(67):31-44. EDN WMIYKD. (rus.).
5. Vasiliev A.P. *Reinforced concrete with rigid reinforcement*. Moscow; Leningrad, State. ed. builds. lit., 1941; 123. (rus.).
6. Antonov K.K., Zhitnitskaya E.A. Axial and eccentric compression of reinforced concrete columns with I-profile reinforcement. *Research of high-rise building structures*. Moscow, 1953; 231. (rus.).
7. Vinogradova N., Shvets G. Studies of bending structures of composite steel and reinforced concrete (review). *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2020; 1(42):114-127. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-1-12. EDN SFPYFY. (rus.).
8. Zamaliev F.S. Taking into account nonlinear properties of materials and deformability of layers when calculating the strength of steel-reinforced concrete floors. *Industrial and Civil Engineering*. 2013; 5:38-40. EDN QAMHXB. (rus.).
9. Zamaliev F.S., Tamrazyan A.G. To the evaluation of the carrying capacity of steel concrete beams on the basis of bent profiles. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(8):1220-1229. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1220-1229. EDN ZJTIFYX. (rus.).
10. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S. Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 3(79):36-44. DOI: 10.18720/MCE.79.4. EDN YOEHUT.
11. Almazov V.O., Harutyunyan S.N. Design of Composite Reinforced Concrete Slabs according to Eurocode 4 and Russian Recommendations. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 8:51-65. EDN UGUISR. (rus.).
12. Martirosyan A., Travush V., Kashevarova G. Study of influence of the rigid reinforcement geometry on the load distribution in steel-concrete composite construction elements. *PNRPU Bulletin. Urban development*. 2017; 1(25):147-158. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.01.13. EDN YORIZL. (rus.).
13. Desyatkin M.A., Konin D.V., Martirosyan A.S., Travush V.I. Calculation of composite column high-rise building at skew eccentric compression. *Housing Construction*. 2015; 5:92-95. EDN RUOCED. (rus.).
14. Travush V.I., Konin D.V., Rozhkova L.S., Krylov A.S., Kaprielov S.S., Chilin I.A. et al. Experimental study of composite structures, working for eccentric compression. *Academia. Architecture and Construction*. 2016; 3:127-135. EDN WWOVZ. (rus.).
15. Krylov S.B., Korniyushina M.P. Numerical and experimental studies of the strength of compressed steel-reinforced concrete elements made using high-strength concrete and square steel pipes of class C345. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2023; 6:53-63. DOI: 10.37153/2618-9283-2023-5-53-63. EDN RTXUBI. (rus.).
16. Mukhamediev T.A., Starchikova O.I. Calculation of the strength of steel-reinforced concrete columns using a deformation model. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2006; 4:18-21. EDN HUGELV. (rus.).
17. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaikin O.V. Calculation of strength, stiffness and crack resistance of eccentrically compressed reinforced concrete elements using non-linear deformation model. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2013; 4(26):113-120. EDN RSTDVV. (rus.).
18. Kudinov O.V. A new approach to assessing the strength of steel-reinforced concrete floors. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2010; 2(563):14-16. (rus.).
19. Arleninov P.D., Krylov S.B. The current state of nonlinear calculations of reinforced concrete structures. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2017; 3:50-53. EDN ZFIVKZ. (rus.).
20. Gholamhoseini A., Gilbert R.I., Bradford M. Long-Term Behavior of Continuous Composite Concrete Slabs with Steel Decking. *ACI Structural Journal*. 2018; 115(2). DOI: 10.14359/51701133
21. Holomek J., Bajer M. Experimental and Numerical Investigation of Composite Action of Steel Concrete Slab. *Procedia Engineering*. 2012; 40:143-147. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.070
22. Kvocak V., Kozlejova V., Dubecky D. Analysis of encased steel beams with hollow cross-sections. *Procedia Engineering*. 2012; 40:223-228. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.084
23. Lowe D., Das R., Clifton C. Characterization of the splitting behavior of steel-concrete composite beams with shear stud connection. *Procedia Materials Science*. 2014; 3:2174-2179. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.352
24. Nadasky P. Steel-Concrete Composite Beams for Slim Floors—Specific Design Features in Scope

of Steel Frames Design. *Procedia Engineering*. 2012; 40:274-279. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.093

25. Soty R., Shima H. Formulation for Maximum Shear Force on L-Shape Shear Connector Subjected to Strut Compressive Force at Splitting Crack Occurrence in Steel-Concrete Composite Structures. *Procedia Engineering*. 2012; 14:2420-2428. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.304

26. Waldmann D., May A., Thapa V.B. Influence of the sheet profile design on the composite action of slabs made of lightweight woodchip concrete. *Construction and Building Materials*. 2017; 148:887-899. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.193

27. Livshits Ya.D. *Calculation of reinforced concrete structures taking into account the influence of shrinkage and creep of concrete*. Kyiv, Higher School, 1976; 280. (rus.).

28. Sidorov A.V. On the patterns of similarity of creep and shrinkage of reinforced concrete elements. *News of universities. Series: Construction and Architecture*. 1988; 1:5-10. (rus.).

29. Karpenko N.I., Mukhamediev T.A., Petrov A.N. Initial and transformed diagrams of concrete and reinforcement deformation. *Collection of articles. Stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures*. Moscow, NIIZhB, 1986. (rus.).

30. Bondarenko V.M., Bondarenko S.V. *Engineering methods of nonlinear theory of reinforced concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1982; 287. (rus.).

31. Hlukhau D., Hlukhava T., Kundas S. Soft computing for the computer representation of nomogram of limit creep factor. *Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences*. 2010; 3:2-6. EDN ULXVVD. (rus.).

32. Lazovsky D.N., Tour V.V., Glukhov D.O., Lazovsky E.D. Accounting for creep and shrinkage of concrete according to SP 5.03.01-2020 when calculating reinforced concrete structures based on a deformation calculation model. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2021; 2(125):7-12. EDN VUYAHW. (rus.).

33. Tur V.V., Rak N.A. *Strength and deformation of concrete in structural calculations*. Brest, Publishing house BSTU, 2003; 252. EDN DOFAPF. (rus.).

34. Bortolotti L. First Cracking Load of Concrete Subjected to Direct Tension (SP-882). *ACI Materials Journal*. 1991; 88(1). DOI: 10.14359/2393

35. Kolleger J. Comparison of Fixed and Rotating Crack Models in the Analysis of Panels, Plates and Shells Subjected to Shear. *Concrete Shear in Earthquake*. Houston International Workshop, Texas, USA, 1991; 216-225.

Received March 13, 2024.

Adopted in revised form on June 6, 2024.

Approved for publication on June 6, 2024.

B I O N O T E S: **Dzmitry N. Lazouski** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Structures; **Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk**; 29 Blokhina st., Novopolotsk, 211440, Republic of Belarus; ID RSCI: 907311, Scopus: 5720341798, ResearcherID: HGC-3867-2022, ORCID: 0000-0001-5278-938X; d.lazovski@psu.by;

Artur I. Hil — Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean of the Faculty of Civil Engineering; **Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk**; 29 Blokhina st., Novopolotsk, 211440, Republic of Belarus; ID RSCI: 907375, ORCID: 0000-0002-5627-1438; a.hil@psu.by;

Dzmitry O. Hlukhau — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Software Engineer; **Softclub**; 168/1 Nezavisimosti st., Minsk, 220141, Republic of Belarus; Scopus: 57191614869, ORCID: 0000-0003-4983-2919; dzmitry.hlukhau@softclub.by.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Экспериментальные исследования влияния деформаций
в узловых соединениях на напряженно-деформированное
состояние в натурной опоре из МИК-С

Владимир Николаевич Должиков, Елена Николаевна Должикова
Сочинский государственный университет (СГУ); г. Сочи, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Деформации в болтовых соединениях элементов при теоретических исследованиях учитывались путем введения модулей линейных деформаций элементов взамен модулей упругости. Необходимость учета деформативности сопряжений связана с тем, что жесткие узлы стержневых конструкций в действительности деформативны, а шарнирные способны воспринимать моменты. Податливость болтовых соединений приводит к увеличению общих деформаций структурных конструкций на 40 % и изменению усилий в элементах до 30 %. В некоторых случаях усилия в элементах меняют знак.

Материалы и методы. Эксперимент проводился при содействии Мостоотряда № 81 на натурной конструкции вспомогательной опоры для полунавесной сборки пролетного строения моста, согласованной с ЦНИИС и Главмостостроем. Вертикальная нагрузка на опору создавалась весом монтируемого пролетного строения моста, горизонтальная — с помощью троса, прикрепленного к трактору-бульдозеру С-100. Контроль натяжения троса бульдозером выполняли динамометром. Измерения относительных деформаций осуществляли по маякам, засверленным в тело элементов, с помощью деформометра с базой 505 мм и ценой деления 0,01 мм. Смещения в болтовых соединениях элементов замеряли деформометром с базой 125 мм.

Результаты. Экспериментальные значения усилий, полученные при наличии смещений в соединениях вспомогательной опоры, достаточно близки к результатам расчета по предложенному методу. Средние значения отношений экспериментальных усилий в элементах с учетом смещений в соединениях к значениям теоретических усилий без смещений (по шарнирной схеме) и к значениям теоретических усилий с учетом смещений в болтовых соединениях по предложенной методике соответственно равны 0,84 и 1,05. Среднее относительное изменение усилий, вызванное смещениями в соединениях элементов, составляет 48 % для раскосов и 18 % для стоек.

Выводы. Показано, что экспериментальные значения усилий в элементах близки к их расчетным значениям, определенным по расчетным модулям линейной деформации. При этом величины усилий существенно отличаются от их значений, полученных расчетом без учета смещений в элементах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модуль линейной деформации, напряженно-деформированное состояние, экспериментальные исследования, усилия, смещения в соединениях

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Должиков В.Н., Должикова Е.Н. Экспериментальные исследования влияния деформаций в узловых соединениях на напряженно-деформированное состояние в натурной опоре из МИК-С // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1484–1493. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1484-1493

Автор, ответственный за переписку: Владимир Николаевич Должиков, doljikov_v@mail.ru.

Experimental studies of the influence of deformations in nodal
joints on the stress-strain state in a full-scale support made
of MIC-C

Vladimir N. Dolzhikov, Elena N. Dolzhikova
Sochi State University (SSU); Sochi, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Deformations in bolted joints of elements in theoretical studies were taken into account by introducing linear deformation modules of elements instead of elasticity modules. The necessity to take into account the deformability of the interfaces is due to the fact that rigid nodes of rod structures are actually deformable, while hinged ones are able to perceive moments. The pliability of bolted joints leads to increase in the total deformations of structural structures by 40 % and change in the forces in the elements by up to 30 %. In some cases, the forces in the elements change the sign.

Materials and methods. The experiment was carried out with the assistance of Bridge Crew No. 81 on a full-scale design of an auxiliary support for the semi-mounted assembly of the bridge span structure, coordinated with the Central Research Institute and Glavmoststroy. The vertical load on the support was created by the weight of the bridge superstructure being mounted, the horizontal load was created using a cable attached to a C-100 bulldozer tractor. Cable tension control with

a bulldozer was performed with a dynamometer. Relative deformations were measured using beacons drilled into the body of the elements using a strainmeter with a base of 505 mm and a division price of 0.01 mm. The displacements in the bolted joints of the elements were measured with a strainmeter with a base of 125 mm.

Results. The experimental force values obtained in the presence of displacements in the joints of the auxiliary support are quite close to the calculation results according to the proposed method. The average value of the ratio of experimental forces in the elements, taking into account displacements in the joints, to the values of theoretical forces without displacements (according to the hinge scheme) and to the values of theoretical forces, taking into account displacements in bolted joints, according to the proposed methodology, are 0.84 and 1.05, respectively. The average relative change in forces caused by displacements in the joints of the elements is 48 % for braces and 18 % for racks.

Conclusions. It is shown that the experimental values of the forces in the elements are close to their calculated values determined by the calculated modules of linear deformation. At the same time, the magnitude of the forces differs significantly from their values obtained by calculation without taking into account the displacements in the elements.

KEYWORDS: linear deformation modulus, stress-strain state, experimental studies, forces, displacements in joint

FOR CITATION: Dolzhikov V.N., Dolzhikova E.N. Experimental studies of the influence of deformations in nodal joints on the stress-strain state in a full-scale support made of MIC-C. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1484-1493. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1484-1493 (rus.).

Corresponding author: Vladimir N. Dolzhikov, dolzhikov_v@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие экспериментальные исследования на натурной конструкции вспомогательной опоры для полунавесной сборки пролетного строения при строительстве железнодорожного моста через р. Дон из элементов МИК-С являются продолжением исследований авторов по влиянию деформативности узловых соединений на напряженно-деформированное состояние (НДС) металлических стержневых систем [1]. Деформации в болтовых соединениях элементов при теоретических исследованиях учитывались путем введения модулей линейных деформаций элементов взамен модулей упругости [1]. Расчет ведется итерационным методом с поэтапным уточнением усилий в элементах. В первом приближении значения модулей деформации элементов определяются по напряжениям в конструкции с не смещающимися узлами.

При исследовании НДС на натурной конструкции вспомогательной опоры для полунавесной сборки пролетного строения при строительстве железнодорожного моста через р. Дон у г. Георгиев смещения в ее болтовых соединениях учитывались посредством использования коэффициентов изменения модулей упругости, определяемых как отношение модуля линейной деформации элемента к модулю упругости материала.

Необходимость учета деформативности сопряжений связана с тем, что жесткие узлы стержневых конструкций в действительности деформативны, а шарнирные способны воспринимать значительные моменты. Этот факт подтверждается в работе [2].

Экспериментально-теоретические исследования, проводившиеся в Центральном научно-исследовательском институте строительных конструкций имени В.А. Кучеренко на опорах ЛЭП с болтовыми соединениями [3], показали, что податливость в болтовых соединениях приводит к остаточным прогибам в системе, увеличению ее деформативности и резкому перераспределению внутренних усилий.

Выполнены исследования по определению параметров деформирования узловых соединений, установлено, что податливость узловых элементов способствует появлению дополнительных прогибов в структурной плите и перераспределению внутренних усилий в системе [4]. Результаты испытаний позволили установить, что экспериментальные вертикальные перемещения узлов структуры превышают их численные значения [5].

Определены действительные жесткостные характеристики узловых элементов системы для случая одноосного растяжения, которые использовались при составлении расчетных схем [6]. Податливость узловых элементов учитывалась [6] введением по концам стержневых элементов вставок с полученными жесткостными характеристиками, что дало возможность приблизить расчетные значения вертикальных перемещений к экспериментальным значениям. Вопрос действительной работы каркаса здания в целом с учетом особенностей работы узлов, соединяющих несущие элементы, представляет интерес для решения инженерных задач [7]. В работе [7] также исследуется влияние начальных зазоров во фланцевых соединениях типа «балка – колонна» на прочностные и деформативные характеристики узлового решения.

Методике учета деформативности узловых соединений уделяется большое внимание и в европейских странах. Так, в публикациях [8–10] представлены результаты исследований узловых соединений с учетом их жесткостных параметров.

Податливость болтовых соединений приводит к увеличению общих деформаций структурной конструкции на 40 % и изменению усилий в элементах до 30 %. В некоторых случаях усилия в элементах меняют знак, т.е. растянутый элемент начинает работать на сжатие и теряет устойчивость. Проблемам устойчивости элементов стержневых конструкций посвящено большое количество работ как отечественных, так и зарубежных ученых [11]. Одна

из отличительных особенностей таких систем — нелинейная работа узловых соединений [12].

Осуществлен краткий обзор отечественных и зарубежных исследований, посвященных методам определения податливости узлов стальных конструкций, методикам расчета конструкций с учетом податливости узлов, способам моделирования узлов с учетом податливости [13]. Результаты численных и экспериментальных исследований стальных ферм из гнутых тонкостенных профилей и алгоритм методики расчета конструкций с учетом податливости узловых соединений представлены в труде [14]. Приведена оценка влияния податливости опорного узла колонны на распределение усилий в элементах стального рамно-связевого каркаса [15]. Изучено влияние податливости узлов баз колонн на НДС каркаса [16].

Результаты исследований работы узлов сопряжения колонн и несущих ригелей системы «Купасс» на распределение НДС представлены в публикации [17]. Установлено, что основным фактором, определяющим деформируемость соединения, служит деформация углов, на долю которой приходится до 87 % общей деформации соединения [18]. Проведены исследования конечной жесткости узловых соединений металлических конструкций [19]. Показаны результаты экспериментальных и теоретических исследований работы соединений для различных видов нагружения [20]. В работе [21] отмечается, что узловые соединения являются ключевыми элементами в конструкциях. В них сконцентрирована основная часть напряжений.

Выявлено, что податливость узловых соединений купола оказывает влияние на его НДС, в том числе на усилия в стержнях и прогибы узлов [22].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель настоящего экспериментального исследования — изучение влияния деформативности в узловых соединениях стержневых конструкций на НДС системы. Экспериментальные исследования проводились на натурной опоре из элементов МИК-С для продольной подвижки пролетных строений моста.

Задачи эксперимента: оценка влияния деформативности в узловых соединениях элементов временной вспомогательной опоры при загрузении ее весом пролетного строения и искусственно созданной горизонтальной нагрузкой.

Для решения указанной задачи разработана программа экспериментального исследования, согласованная с Всесоюзным научно-исследовательским институтом транспортного строительства (ЦНИИС) и Главмостостроем:

- испытание временной опоры на сжатие путем загрузения ее пролетным строением моста во время продольной подвижки;

- создание искусственной горизонтальной нагрузки с помощью троса, прикрепленного через динамометр к трактору-бульдозеру С-100;

- статистическая обработка полученных в ходе натурного эксперимента данных и оценка достоверности;

- сравнение полученных экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

Эксперимент проводился при содействии Мостоотряда № 81 на вспомогательной опоре В-У1 для сборки пролетного строения при строительстве железнодорожного моста левого пути через р. Дон на 670 км у г. Георгию-Деж по методике, согласованной с ЦНИИС и Главмостостроем.

Сборка вспомогательной опоры осуществлялась в соответствии с «Руководством и нормативами по технологии постановки высокопрочных болтов в монтажных соединениях металлоконструкций»¹, разработанных к главе СНиП III-18-75 «Металлические конструкции. Правила производства и приемки работ».

Для соединений элементов вспомогательной опоры применялись высокопрочные болты, гайки и шайбы, изготовленные в соответствии с требованиями ГОСТ 22353-77, ГОСТ 22356-77.

Согласно ГОСТ 22356-77 высокопрочные болты имеют клеймо завода-изготовителя, а также маркировку, показывающую временное сопротивление в кгс/мм², и условное обозначение номера плавки.

Механические свойства и материалы болтов, гаек и шайб отвечают требованиям табл. 1-3¹.

С целью определения влияния деформативности в одноболтовых соединениях на НДС элементов временной опоры выполнены экспериментальные исследования работы стержневой конструкции. Для этого была разработана методика выполнения эксперимента, собрана временная опора из МИК-С, установлены маяки на стойках и раскосах и сняты нулевые показания на незагруженной временной опоре.

В состав натурной экспериментальной конструкции входили две семярусные секции из элементов МИК-С, соединенные в уровне 6-й и 7-й секций раскосами и горизонтальными схватками. Каждая секция состоит из 4 стоек и 4 раскосов. Соединение стоек и раскосов, а также стоек секций, осуществлялось на высокопрочных болтах диаметром 24 мм. Номинальная разность диаметров болта и отверстия составляла 1 мм.

Вся временная опора опиралась на металлическую инвентарную конструкцию пакетного типа МИК-П. Нагрузка от пролетного строения на временную опору передается тоже через пакетную

¹ Руководство и нормативы по технологии постановки высокопрочных болтов в монтажных соединениях металлоконструкций // ЦНИИ Проектстальконструкция Госстроя СССР. М. : Стройиздат, 1982. 92 с.

конструкцию МИК-П, установленную поверх 7-го яруса опоры.

Общий вид вспомогательной опоры без нагружения показан на рис. 1.

Комплект МИК-С включает 12 марок: стойки, раскосы, распорки и цельносварные ростверки. Сечения элементов трубчатые с площадью $24,2 \text{ см}^2$ для стоек и $14,13 \text{ см}^2$ для раскосов и распорок. Наружный диаметр стоек — 203 мм. Толщина стенки стоек — 9 мм. Наружный диаметр раскосов и распорок — 95 мм. Толщина стенки раскосов и распорок — 5 мм. Соединения элементов решетки в узлах одноболтовые на высокопрочных болтах диаметром 24 мм.

Установка высокопрочных болтов в соединениях элементов опоры проводилась без контроля натяжения с помощью обычных ключей.

Вертикальная нагрузка на опору создавалась весом пролетного строения.

Горизонтальная нагрузка прикладывалась с помощью троса, прикрепленного к трактору-бульдозеру С-100. Контроль натяжения троса бульдозером выполняли динамометром. Определение параметров и характеристик динамометра производилось при следующих условиях:

- температура окружающего воздуха — 18°C ;
- относительная влажность — 48 %;
- атмосферное давление — 720 мм рт. ст.

Динамометр был установлен в положении, при котором измеряемое усилие направлено вдоль присоединительных звеньев. Нагрузка прилагалась плавно, без рывков.

В момент снятия показаний приборов вертикальная нагрузка на одну (испытываемую) плоскость опоры от веса пролетного строения и монтажного агрегата составляла 800 кН, горизонтальная — 17,7 кН.

Общий вид вспомогательной опоры в момент испытания вертикальной и горизонтальной нагрузкой приведен на рис. 2.

Схема вспомогательной опоры с нумерацией узлов и расположением приложенных нагрузок показана на рис. 3.

Измерения относительных деформаций выполняли по маякам, засверленным в тело элементов, с помощью деформометра (рис. 4) с базой 505 мм и ценой деления 0,01 мм.

Смещения в болтовых соединениях элементов замеряли деформометром с базой 125 мм (рис. 5).

Принятая для проведения измерений система регистрации напряжений в элементах конструкций с помощью механических тензометров, разработанных в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, со съемным деформометром является наиболее надежной в полевых условиях по сравнению с использованием электромеханических или электронных систем измерений. При применении электромеханических или электронных систем измерений возможна реальная угроза повреждения или утрата закреплен-



Рис. 1. Общий вид вспомогательной опоры до нагружения
Fig. 1. General view of the auxiliary support before loading

ных на конструкциях приборов или соединительных кабелей для электромеханических датчиков. Воздействие на электромеханические или электронные датчики атмосферных осадков и электромагнитного излучения от сварочных работ или другого строительного-монтажного оборудования также может привести к их повреждению [23].

Нулевые отсчеты замеряли после установки опоры в проектное положение без нагружения пролетным строением (рис. 1). Снятие нулевых отсчетов в нижних 2 секциях опоры до высоты 4 м не представлялось возможным ввиду сильного паводка. Усилие в раскосе 28–32 и усилие в распорке 27–28 приведены в таблице. Усилия в остальных распорках не приведены, так как они нулевые.



Рис. 2. Общий вид вспомогательной опоры под нагрузкой
Fig. 2. General view of the auxiliary support under load

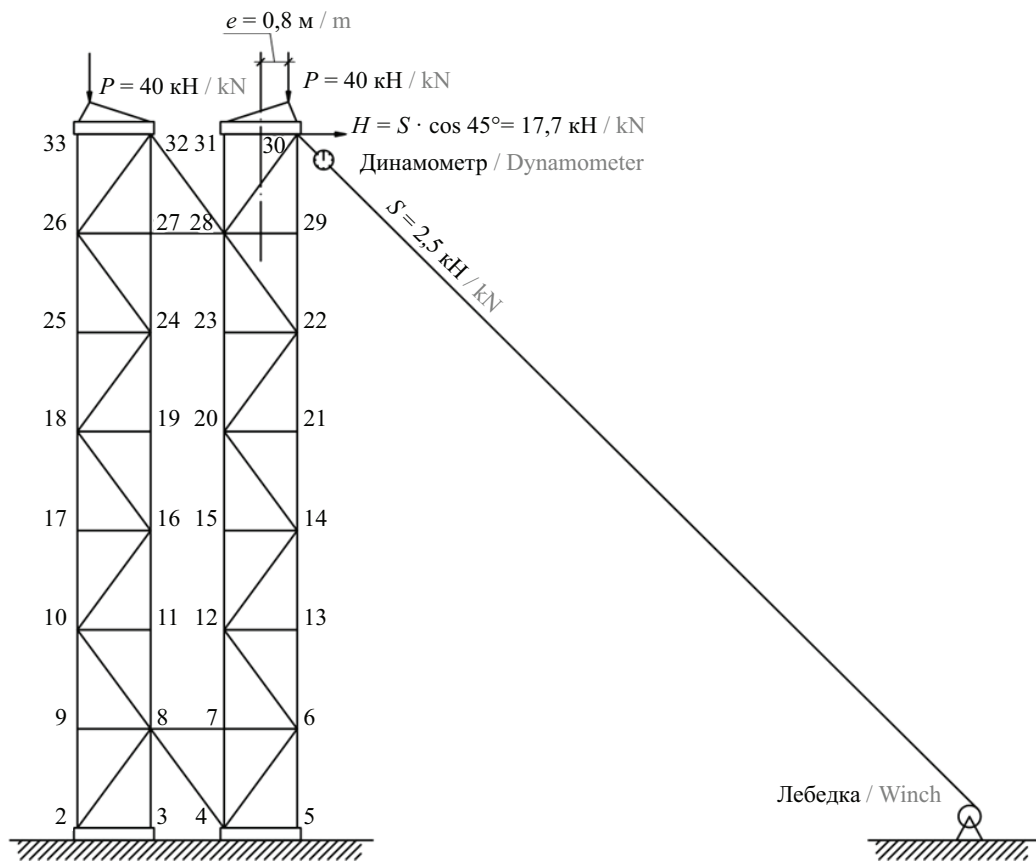


Рис. 3. Схема вспомогательной опоры с нумерацией узлов и расположением приложенных нагрузок
Fig. 3. The diagram of the auxiliary support with the numbering of nodes and the location of the applied loads



Рис. 4. Измерение относительных деформаций элементов опоры деформетром с базой 505 мм
Fig. 4. Measurement of relative deformations of support elements with a deformometer with a base of 505 mm

Экспериментальные усилия в элементах определяли по замеренным в ходе эксперимента относительным деформациям.

Для сравнения с экспериментом выполнены расчеты опоры без и с учетом смещений (по предложенному методу) в болтовых соединениях раскосов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При расчете опоры без учета смещений в узловых соединениях расчетная схема опоры представлялась как статически неопределимая конструкция с двумя неизвестными X_1, X_2 соответственно неизвестным усилиям в соединительных элементах (27–28) и (28–32). Задача решалась методом сил. Число канонических уравнений (кинематической эквивалентности) всегда равно числу удаленных связей и имеет вид:

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1p} = 0;$$

$$\delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} = 0.$$

Единичные коэффициенты δ_{ik} и свободные члены Δ_{ip} представляют собой перемещение и определяются по формуле Мора.

Учет смещений в болтовых соединениях элементов опоры учитывался путем введения модулей линейных деформаций элементов взамен модулей упругости металла МИК-С. Модуль линейной деформации материала болтового соединения E_{ci} при усилии N_i в i -м элементе запишется как [1, 24]:

$$E_{ci} = N_i / \Delta_{ci} = (T_i + S_i(\Delta_{ci})) / u + v + \Delta_{cm},$$

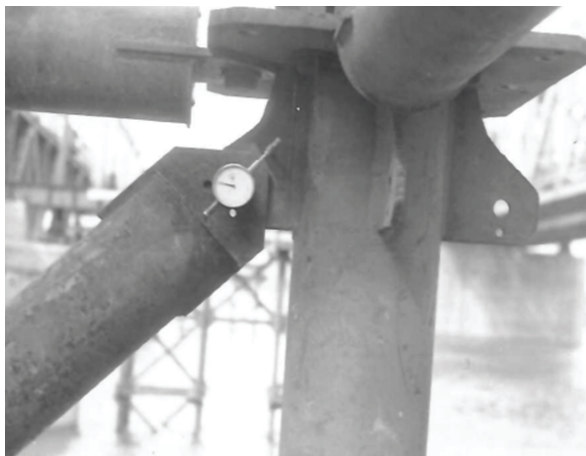


Рис. 5. Измерение смещений в болтовых соединениях элементов

Fig. 5. Changing the displacements in the bolted connections of the elements

где T_i — сила трения в соединении i -го элемента; $S_i(\Delta_{ci})$ — эмпирическая зависимость при работе i -го соединения на смятие [25]; u — сдвиг соединения на разность номинальных диаметров болта и отверстия; v — допускаемые отклонения от номинальных диаметров болта и отверстия; Δ_{cm} — неупругая деформация смятия.

Для соединения на высокопрочных болтах сила трения T_i определяется по формуле [25]:

$$T_i = N_n f(b_0 + b_1 \Delta_i),$$

где N_n — нормативное усилие натяжения болта; f — коэффициент трения; b_0, b_1 — эмпирические параметры.

Значения эмпирических параметров низколегированной и углеродистой стали приводятся в таблице [25].

Изменение расстояний Δl_i между центрами узлов i -го элемента определяется как сумма упругой

деформации Δl_{yi} и смещений в креплениях в начале $\Delta_{1,i}$ и конце $\Delta_{2,i}$ i -го элемента. Тогда [1]:

$$\Delta l_i = \Delta l_{yi} + \Delta_{1,i} + \Delta_{2,i}$$

или

$$\Delta l_i = N_i (l_i / EF_i + 1/E_{c,1i} + 1/E_{c,2i}).$$

Отсюда находим модуль линейной деформации i -го элемента:

$$E_{э,i} = l_i EE_{c,1i} E_{c,2i} / EF_i E_{c,1i} + EF_i E_{c,2i} + l_i E_{c,1i} i E_{c,2i}.$$

Расчет ведется методом итераций с поэтапным уточнением усилий в элементах. Итерационный процесс можно выполнять, также уточняя напряжения σ_i в i -м элементе. В этом случае формула для определения модуля линейной деформации элемента будет иметь вид:

$$E_{э,i} = E / (2E \Delta l_i / \sigma_i + 1).$$

В первом приближении значения модулей $E_{э,i}$ определяются по напряжениям в конструкции с не смещающимися узлами.

По результатам измерений деформаций с помощью деформометров по закону Гука устанавливались напряжения в элементах временной опоры из МИК-С. Показание деформометра позволяло определить напряжение, возникающее в месте установки прибора.

Согласно закону Гука:

$$\sigma = E \epsilon,$$

где σ — напряжение в конструкции; E — модуль упругости материала; $\epsilon = \Delta L / L$ — относительная деформация; ΔL — абсолютная деформация; $L = 50$ см — измерительная база прибора.

Дальше напряжения преобразовывались в усилия.

Начало отсчета индикатора переносилось в середину его шкалы, что позволяло измерять напряжения как в сжатых, так и в растянутых элементах.

Сравнение результатов расчета и эксперимента приведено в таблице.

Начало–конец элемента The beginning is the end of the element	Усилия в элементах, кН / Forces in the elements, kN		
	Теоретические / Theoretical		Экспериментальные при наличии смещений в соединениях $N_{cm}^э$ Experimental in the presence of displacements in the joints N_r^{ex}
	Без учета смещений в соединениях $N_{ш}^{(r)}$ Excluding offsets in joints $N_j^{(r)}$	С учетом смещений в соединениях $N_{cm}^{(r)}$ Including offsets in joints $N_r^{(r)}$	
1	2	3	4
10–17	–220,6	–273,3	–271,6
11–16	–231,2	–162,0	–181,1
12–15	–99,8	–43,7	–50,3
13–14	–265,9	–338,5	–301,8
14–21	–325,6	–361,9	–331,9
15–20	–99,8	–43,7	–60,3
16–19	–136,1	–103,2	–110,6
17–18	–220,6	–273,3	–271,6
18–25	–315,7	–332,1	–342,0

Начало–конец элемента The beginning is the end of the element	Усилия в элементах, кН / Forces in the elements, kN		
	Теоретические / Theoretical		Экспериментальные при наличии смещений в соединениях N_{cm}^3 Experimental in the presence of displacements in the joints N_r^{ex}
	Без учета смещений в соединениях $N_{ш}^{(T)}$ Excluding offsets in joints $N_j^{(T)}$	С учетом смещений в соединениях $N_{cm}^{(T)}$ Including offsets in joints $N_r^{(T)}$	
1	2	3	4
19–24	–136,1	–103,2	–90,5
20–23	–40,1	–20,3	–30,1
21–22	–325,6	–361,9	–352,1
22–29	–385,3	–385,3	–372,2
23–28	–40,1	–20,3	–30,1
24–27	–41,1	–44,4	–50,3
25–26	–315,7	–332,1	–321,9
26–33	–367,6	–367,6	–362,1
27–32	–41,1	–44,4	–40,2
28–31	–32,4	–32,4	–30,1
29–30	–385,3	–385,3	–382,2
12–14	–42,2	–16,5	–16,5
10–16	67,2	41,5	47,0
16–18	–67,2	–41,5	–41,1
14–20	42,2	16,5	17,6
20–22	–42,2	–16,5	–17,6
18–24	67,2	41,5	47,0
24–26	–67,2	–41,5	–41,1
22–28	42,2	16,5	17,6
28–30	25,0	25,0	23,5
28–32	6,1	8,5	11,7
26–32	6,1	8,5	5,8
26–27	43,2	23,4	23,5
27–28	43,2	23,4	29,4

Средняя величина замеренных в ходе эксперимента смещений составила 0,4 мм и объясняется наличием небольших усилий в раскосах (см. таблицу).

Экспериментальные значения усилий, полученные при наличии смещений в соединениях вспомогательной опоры, достаточно близки к результатам расчета по предложенному методу.

Максимальное изменение усилий в результате смещений в болтовых соединениях составило:

- увеличение усилий в элементах 10–17, 13–14, 17–18, 18–25 соответственно равно 23; 13,5; 23; 8 %;
- уменьшение усилий в элементах 11–16, 12–15, 19–24, 12–14 соответственно равно 21,7; 49,6; 33,5; 69,9 %.

Средние значения отношений экспериментальных усилий в элементах с учетом смещений в соединениях к значениям теоретических усилий без смещений (по шарнирной схеме) и к значениям теоретических усилий с учетом смещений в болто-

вых соединениях по предложенной методике соответственно равны 0,84 и 1,05.

Среднее относительное изменение усилий, вызванное смещениями в соединениях элементов, составляет 48 % для раскосов и 18 % для стоек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены экспериментальные исследования на натурной временной опоре из МИК-С для полунавесной сборки пролетных строений.

В результате экспериментальных исследований установлено, что значения усилий, возникающих в стержнях временной опоры после деформаций в соединениях, существенно отличаются от полученных расчетом без учета смещений.

Увеличение усилий в элементах 10–17, 13–14, 17–18, 18–25 соответственно равно 23; 13,5; 23; 8 %. Уменьшение усилий в элементах 11–16, 12–15,

19–24, 12–14 соответственно равно 21,7; 49,6; 33,5; 69,9 %. Среднее относительное изменение усилий, вызванное смещениями в соединениях элементов, составляет 48 % для раскосов и 18 % для стоек.

Максимальное увеличение усилий в элементах составляет 23 %, максимальное уменьшение усилий — 69,9 %.

Показано, что экспериментальные значения усилий в элементах близки к их расчетным значениям, определенным по расчетным модулям линейной деформации.

Средние значения отношений экспериментальных усилий в элементах к значениям теоретических

усилий без смещений и к значениям теоретических усилий с учетом смещений в болтовых соединениях (по предложенной методике) соответственно равны 0,84 и 1,05.

Наиболее чувствительными к деформациям в соединениях являются раскосы, при этом в более нагруженных относительное изменение усилий вследствие податливости узлов меньше, чем в менее нагруженных.

Результаты эксперимента показывают, что столь значительные изменения усилий и напряжений от деформативности в узловых соединениях стержневых конструкций необходимо учитывать при проектировании инженерных сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Должиков В.Н., Удотова О.А. Влияние податливости узловых соединений на напряженно-деформированное состояние металлических стержневых систем // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 11 (779). С. 15–25. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-779-11-15-25. EDN RVOXQH.
2. Васильков Б.С., Володин Н.М. Расчет сборных конструкций зданий с учетом податливости соединений. М. : Стройиздат, 1985. 144 с.
3. Трофимов В.И., Третьякова Э.В., Зуева И.И. Учет влияния податливости болтового соединения на работу структурной конструкции // Строительная механика и расчет сооружений. 1976. № 1. С. 24–26. EDN YREYHX.
4. Драган В.И., Шурин А.Б. Податливость стержневых систем с узловыми соединениями на пространственных листовых фасонках // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 7. С. 37–43. EDN UBYGRL.
5. Davoodi M.R., Pashaei M.H., Mostafavian S.A. Experimental study of the effects of bolt tightness on the behaviour of MERO-type double layer grids // Journal of the international Association for Shell and Spatial Structures. 2007. Vol. 48. Issue 153. Pp. 45–52.
6. Ghasemi M., Davoodi M.R., Mostafavia S.A. Tensile stiffness of MERO-type connector regarding bolt tightness // Journal of Applied Sciences. 2010. Vol. 10. Issue 9. Pp. 724–730. DOI: 10.3923/jas.2010.724.730
7. Туснин А.Р., Платонова В.Д. Экспериментальные исследования влияния зазоров во фланцевых соединениях на напряженно-деформированное состояние узла // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 11. С. 1763–1779. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1763-1779. EDN HXHVKE.
8. Yoganata Y.S., Suswanto B., Iranata D., Irawan D. Analysis study of extended end plate connection due to cyclic load using finite element method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 930. Issue 1. P. 012050. DOI: 10.1088/1757-899X/930/1/012050
9. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection // Materials. 2020. Vol. 13. Issue 22. P. 5133. DOI: 10.3390/ma13225133
10. Zhao D., Wang Z., Pan J., Wang P. Error analysis method of geometrically incomplete similarity of end-plate connection based on linear regression // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. Issue 14. P. 4812. DOI: 10.3390/app10144812
11. Kayumov R.A., Shakirzyanov F.R. Large Deflections and Stability of Low-Angle Arches and Panels During Creep Flow // Advanced Structured Materials. 2020. С. 237–248. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2_18
12. Zheng Y., Guo Z. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplok steel tubular scaffold // Journal of Constructional Steel Research. 2021. Vol. 177. P. 106415. DOI: 10.1016/J. JCSR.2020.106415
13. Калужный Д.В., Джашеев Р.Ю. Влияние учета податливости узлов аутригеров на напряженно-деформированное состояние элементов стальных конструкций высотных зданий // Молодой ученый. 2023. № 24 (471). С. 85–94. EDN QHIYIR.
14. Лапшин А.А., Морозов Д.В., Колесов А.И. Методика проектирования стальных конструкций из гнутых тонколистовых незамкнутых профилей с учетом податливости узловых соединений на самонарезающих винтах // Приволжский научный журнал. 2014. № 3 (31). С. 16–25. EDN SNZKRV.
15. Новоселов А.А., Карелин Д.А. Оценка влияния податливости опорного узла стальной колонны // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 4 (43). С. 26–31. EDN ZWDQCB.
16. Никитина К.Е. Влияние податливости узлов на напряженно-деформированное состояние каркаса // Молодой ученый. 2020. № 23 (313). С. 123–129. EDN GNYFTN.
17. Балдин И.В., Уткин Д.Г., Балдин С.В. Исследование работы узлов сопряжения колонны и несущих ригелей системы «Купасс» // Вестник Том-

ского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 5 (52). С. 72–79. EDN VHMMUR.

18. Tushina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections // *Magazine of Civil Engineering*. 2017. № 5 (73). Pp. 25–39. DOI: 10.18720/MCE.73.3. EDN ZNLKNH.

19. Лимонина А.А., Цыгановкин В.В., Юхни-на А.А. Исследование конечной жесткости соединений металлических конструкций // *Молодой ученый*. 2021. № 22 (364). С. 139–144. EDN SRKGYS.

20. Li S., Zhou Z., Luo H., Milani G., Abruzzese D. Behavior of traditional Chinese mortise-tenon joints: Experimental and Numerical insight for coupled vertical and reversed cyclic horizontal loads // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 30. P. 101257. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101257

21. Белозеров П.Г. Планирование эксперимента узловых соединений элементов железобетонных конструкций с применением технологии быстромонтируемого вертикального скользящего соединения // *Элек-*

тронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2023. № 6. С. 1–6. EDN AEQRML.

22. Тур В.И., Тур А.В. Влияние податливости узловых соединений на напряженно-деформированное состояние металлического сетчатого купола // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 6–6. С. 1165–1168. EDN SFCEKZ.

23. Фарфель М.И., Гукова М.И., Кондрашов Д.В., Коняшин Д.Ю. Апробированная методика проведения мониторинга в зданиях и сооружениях // *Вестник НИЦ Строительство*. 2021. № 1 (28). С. 110–123. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-1(28)-110-123. EDN PQRXAD.

24. Должиков В.Н. Влияние податливости болтовых соединений на работу вспомогательных опор для строительства мостов. Обзор // *Международный журнал экспериментального образования*. 2016. № 11–2. С. 243–248. EDN WZVOYD.

25. Вейнблат Б.М., Бунеев Г.И. Расчет сооружений с несущими высокопрочными болтами // *Труды МАДИ*. 1975. № 77. С. 37–42.

Поступила в редакцию 2 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 28 июля 2024 г.

Одобрена для публикации 9 августа 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Николаевич Должиков** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства и сервиса, почетный работник высшего профессионального образования России; **Сочинский государственный университет (СГУ)**; 354000, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Пластунская, д. 94; doljikov_v@mail.ru;

Елена Николаевна Должикова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства и сервиса; **Сочинский государственный университет (СГУ)**; 354000, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Пластунская, д. 94; elena.nikolaevna.50@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Dolzhikov V.N., Udotova O.A. Influence of the malleability of nodal joints on the stress-strain state of metal rod systems. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023; 11(779):15-25. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-779-11-15-25. EDN RVOXQH. (rus.).

2. Vasilkov B.S., Volodin N.M. *Calculation of prefabricated structures of buildings taking into account the malleability of joints*. Moscow, Stroyizdat, 1985; 144. (rus.).

3. Trofimov V.I., Tretyakova E.V., Zueva I.I. Consideration of the influence of the ductility of a bolted joint on the operation of a structural structure. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 1976; 1:24-26. EDN YREYHX. (rus.).

4. Dragan V.I., Shurn A.B. Ductility of rod systems with nodal connections on dimensional leaf corner plates. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 7:37-43. EDN UBYGRL. (rus.).

5. Davoodi M.R., Pashaei M.H., Mostafavian S.A. Experimental study of the effects of bolt tightness on the behaviour of MERO-type double layer grids. *Journal of the international Association for Shell and Spatial Structures*. 2007; 48(153):45-52.

6. Ghasemi M., Davoodi M.R., Mostafavia S.A. Tensile stiffness of MERO-type connector regarding bolt tightness. *Journal of Applied Sciences*. 2010; 10(9):724-730. DOI: 10.3923/jas.2010.724.730

7. Tushin A.R., Platonova V.D. Influence of gaps in flange joints on the stress-strain state of the unit. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(11):1763-1779. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1763-1779. EDN XHXVKE. (rus.).

8. Yoganata Y.S., Suswanto B., Iranata D., Irawan D. Analysis study of extended end plate connection due to cyclic load using finite element method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engi-*

neering. 2020; 930(1):012050. DOI: 10.1088/1757-899X/930/1/012050

9. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection. *Materials*. 2020; 13(22):5133. DOI: 10.3390/ma13225133

10. Zhao D., Wang Z., Pan J., Wang P. Error analysis method of geometrically incomplete similarity of end-plate connection based on linear regression. *Applied Sciences*. 2020; 10(14):4812. DOI: 10.3390/app10144812

11. Kayumov R.A., Shakirzyanov F.R. Large Deflections and Stability of Low-Angle Arches and Panels During Creep Flow. *Advanced Structured Materials*. 2020; 237-248. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2_18

12. Zheng Y., Guo Z. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplock steel tubular scaffold. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021; 177:106415. DOI: 10.1016/J.JCSR.2020.106415

13. Kalyuzhny D.V., Dzhasheev R.Y. The influence of accounting for the malleability of outrigger nodes on the stress-strain state of elements of steel structures of high-rise buildings. *Young Scientist*. 2023; 24(471):85-94. EDN QHIYIR. (rus.).

14. Lapshin A.A., Morozov D.A., Kolesov A.I. Methods of designing steel structures of cold-formed profiles with pliability of nodal connections on tapping screws. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2014; 3(31):16-25. EDN SNZKRV. (rus.).

15. Novoselov A.A., Karelin D.A. Impact assessment of the steel column datum node deformation capacity. *Bulletin of the Siberian State University of Railway Engineering*. 2017; 4(43):26-31. EDN ZWDQCB. (rus.).

16. Nikitina K.E. The influence of the malleability of nodes on the stress-strain state of the frame. *Young Scientist*. 2020; 23(313):123-129. EDN GNYFTN. (rus.).

17. Baldin I.V., Utkin D.G., Baldin S.V. Static load testing for beam-to-column connection in univer-

sal prefabricated antiseismic structural system. *Journal of Construction and Architecture*. 2015; 5(52):72-79. EDN VHMMUR. (rus.).

18. Tushina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 5(73):25-39. DOI: 10.18720/MCE.73.3. EDN ZNLKNH.

19. Limonina A.A., Tsyganovkin V.V., Yukhnina A.A. Investigation of the finite stiffness of joints of metal structures. *Young Scientist*. 2021; 22(364):139-144. EDN SRKGYS. (rus.).

20. Li S., Zhou Z., Luo H., Milani G., Abruzzese D. Behavior of traditional Chinese mortise-tenon joints: Experimental and Numerical insight for coupled vertical and reversed cyclic horizontal loads. *Journal of Building Engineering*. 2020; 30:101257. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101257

21. Belozarov P.G. Planning an experiment of nodal joints of elements of reinforced concrete structures using the technology of a quick-mounted vertical sliding joint. *Scientific Works of KubSTU*. 2023; 6:1-6. EDN AEQRML. (rus.).

22. Tur V.I., Tur A.V. Influence of nodal joints compliance upon stress-strained state of metal mesh dome. *Fundamental Research*. 2014; 6-6:1165-1168. EDN SFCEKZ. (rus.).

23. Farfel M., Gukova M., Kondrashov D., Konyashin D. Proven methods of monitoring in buildings and structures. *Bulletin of the Scientific Research Center "Construction"*. 2021; 1(28):110-123. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-1(28)-110-123. EDN PQRXAD. (rus.).

24. Dolzhikov V.N. Influence of the ductility of bolted joints on the operation of auxiliary supports for bridge construction. Review. *International Journal of Experimental Education*. 2016; 11-2:243-248. EDN WZVOYD. (rus.).

25. Weinblat B.M., Buneev G.I. Calculation of structures with load-bearing high-strength bolts. *Proceedings of MADI*. 1975; 77:37-42. (rus.).

Received April 2, 2024.

Adopted in revised form on July 28, 2024.

Approved for publication on August 9, 2024.

B I O N O T E S: **Vladimir N. Dolzhikov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction and Service, Honorary Worker of Higher Professional Education of Russian Federation; **Sochi State University (SSU)**; 94 Plastunskaya st., Sochi, Krasnodar region, 354000, Russian Federation; dolzhikov_v@mail.ru;

Elena N. Dolzhikova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction and Service; **Sochi State University (SSU)**; 94 Plastunskaya st., Sochi, Krasnodar region, 354000, Russian Federation; elena.nikolaevna.50@mail.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Разработка методики расчета перекрестно-балочного
фундамента на наклонном основании, осложненного
карстово-провальными процессами

Александр Борисович Барыкин, Борис Юрьевич Барыкин,
Евгений Владимирович Зеленин

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского);
г. Симферополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработана расчетная схема провально-карстовой воронки на закарстованных территориях с использованием результатов лабораторных экспериментальных исследований, позволяющая определить форму и размер карстового провала в зависимости от диаметра (радиуса) карстовой полости, глубины ее залегания, угла наклона основания и угла внутреннего трения грунтов, слагающих склон.

Материалы и методы. Приведена методика расчета нормальных контактных напряжений в наклонном грунтовом основании под подошвой перекрестно-балочного фундамента при образовании карстово-провальных воронок. Рассмотрены три основных случая расположения карстовой полости в массиве склона при наиболее неблагоприятном расположении карстовой полости относительно конструкций перекрестно-балочного фундамента.

Результаты. Получена аналитическая зависимость, позволяющая определить теоретическое значение расчетного значения диаметра L_c полости в наклонном основании, а также установить основные расчетные зависимости для установления нормальных контактных напряжений, которые дают возможность оценить изменения параметров НДС работы перекрестно-балочного фундамента после обрушения свода полости и образования сложной формы воронки обрушения.

Выводы. Разработанная методика удобна в применении для качественной оценки проектных решений при проектировании перекрестно-балочных фундаментов на наклонном основании на карстоопасных территориях. Полученные вариантные расчетные значения основных параметров НДС по предложенной методике позволят использовать рациональные конструктивные решения при проектировании.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: провально-карстовая воронка, перекрестно-балочный фундамент, наклонное основание, склон, нормальные контактные напряжения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Барыкин А.Б., Барыкин Б.Ю., Зеленин Е.В. Разработка методики расчета перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании, осложненного карстово-провальными процессами // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1494–1504. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1494-1504

Автор, ответственный за переписку: Евгений Владимирович Зеленин, workandearn@mail.ru.

Development of the calculation methodology of cross-beam
foundation on the sloping base complicated by karst
and sinkhole processes

Alexander B. Barykin, Boris Yu. Barykin, Evgeniy V. Zelenin
V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A calculation scheme of karst sinkhole in karst territories using the results of laboratory experimental studies is developed, which makes it possible to determine the shape and size of karst sinkhole depending on the karst cavity diameter (radius), its depth, the base slope angle and the angle of internal friction of soils composing the slope.

Materials and methods. The method of calculation of normal contact stresses in the sloping soil base under the bottom of the cross-beam foundation during the formation of karst sinkholes is given, considering three main cases of karst cavity location in the slope massif with the most unfavourable location of the karst cavity relative to the cross-beam foundation structures.

Results. The analytical dependence allowing to determine the theoretical value of the design value of the diameter L_c of the cavity in the sloping base is obtained, as well as to establish the main design dependences for determining the normal contact stresses, which allow to estimate the changes in the VAT parameters of the cross-beam foundation operation after the cavity vault collapse and formation of a complex shape of the collapse funnel.

Conclusions. The developed methodology is convenient to use for qualitative assessment of design solutions in the design

of cross-beam foundations on a sloping base in karst-prone areas. The obtained variant design values of the main VAT parameters according to the proposed methodology will allow to apply rational design solutions in design.

KEYWORDS: sinkhole, cross-beam foundation, sloping foundation, slope, normal contact stresses

FOR CITATION: Barykin A.B., Barykin B.Yu., Zelenin E.V. Development of the calculation methodology of cross-beam foundation on the sloping base complicated by karst and sinkhole processes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1494-1504. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1494-1504 (rus.).

Corresponding author: Evgeniy V. Zelenin, workandearn@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Большая часть территории России подвержена карстовым процессам, вероятность образования которых имеет устойчивую тенденцию к увеличению [1–3]. В связи с этим исследования, направленные на изучение ключевых параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) при совместной работе конструкций фундаментов с грунтовым основанием в случае возникновения карстово-обвальных процессов, актуальны в геотехническом проектировании.

Крымский полуостров можно отнести к региону со сложной изменчивой геологической структурой. Основным явлением, подтверждающим такую сложную структурно-геологическую обстановку, служит образование негативных экзогенных процессов в грунтах: карста, оползней, эрозии и других, которые существенно усложняют инженерно-геологические условия при строительстве зданий и сооружений и отрицательно влияют на последующую их безопасную эксплуатацию [4, 5].

Из-за отсутствия благоприятных участков для строительства на южном берегу Крыма в последние годы, начиная с 2014 г., отводятся участки с уклонами от 15–30°, которые зачастую осложнены неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, в том числе карст. В качестве фундаментов на таких территориях оптимальным решением с точки зрения экономической и технической направленности является перекрестно-балочный фундамент, устраиваемый на наклонном основании [6] (рис. 1).

Карстовые явления можно отнести к одним из опаснейших геологических процессов как по степени опасности, так и скорости проявления в виде возникновения провалов и мульд оседания земной поверхности, а также по масштабам и степени угрозы для вновь застраиваемых и уже плотно застроенных городских территорий [7–10]. Карстовые провалы сопровождаются внезапным обрушением толщи грунта. Диаметры воронок могут достигать нескольких десятков метров [11–13]. Поэтому данное явление представляет наибольшую опасность

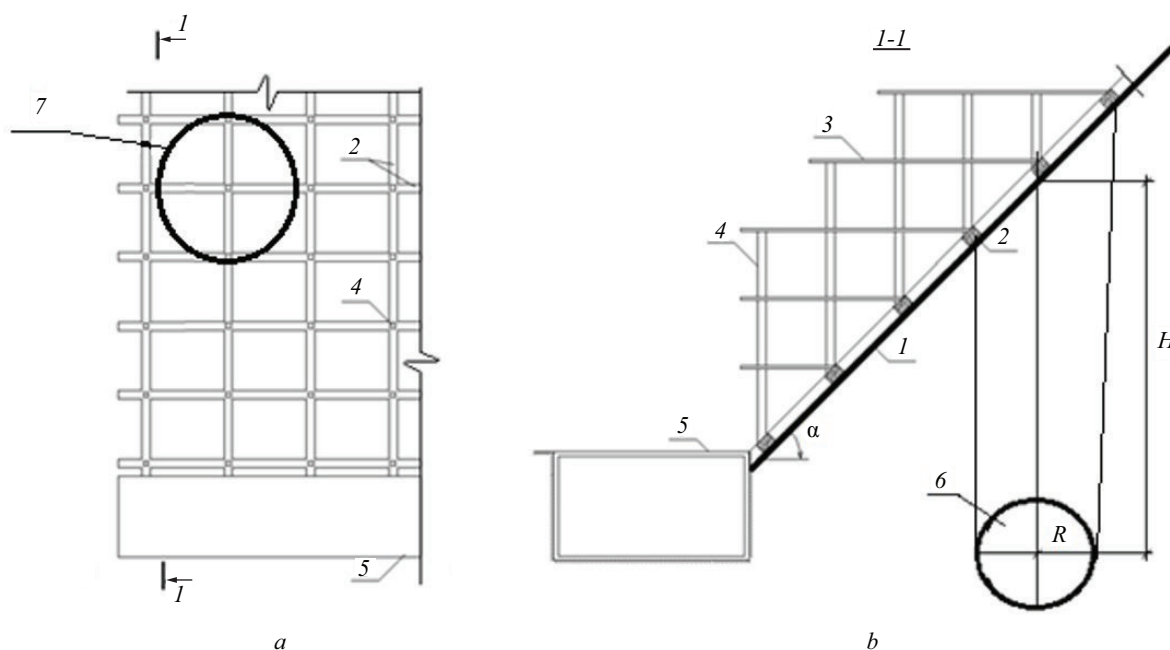


Рис. 1. Схема здания на склоне: 1 — продольные балки фундаментной решетки; 2 — поперечные балки фундаментной решетки; 3 — диски перекрытий; 4 — вертикальные несущие элементы (колонны); 5 — удерживающая заглубленная конструкция; 6 — карстовая воронка; 7 — проекция карстовой воронки на плоскость склона

Fig. 1. Scheme of the building on the slope: 1 — longitudinal beams of the foundation grid; 2 — transverse beams of the foundation grid; 3 — floor disks; 4 — vertical bearing elements (columns); 5 — retaining buried structure; 6 — sinkhole; 7 — projection of the sinkhole on the plane of the slope

для большинства зданий и сооружений, в том числе и на наклонных основаниях [14].

Современные подходы используют главным образом расчеты, в которых ключевыми параметрами являются расчетный диаметр карстового провала в основании и цилиндрическая форма тела обрушения. Существующие методы не учитывают такие параметры, как влияние наклона основания, глубина расположения карстовой полости, угол внутреннего трения грунта на формирование провальной воронки при выходе карста на поверхность, на изменение НДС основания. При этом проектирование перекрестно-балочных фундаментов на наклонных основаниях на закарстованных территориях до настоящего времени не выполнялось вследствие отсутствия комплексных экспериментально-теоретических исследований, на базе которых была бы построена приближенная к реальности форма тела обрушения и разработана методика расчета эпюры контактных напряжений.

Разработка аналитической методики расчета перекрестно-балочных фундаментов в условиях закарстованных территорий, основанной на результатах, полученных экспериментальным и численным методами с помощью МКЭ, позволит установить размер карстовой воронки и формы обрушения грунта, зависящей от известных исходных данных, таких как диаметр карстовой полости, глубина ее расположения, угол наклона основания, угол внутреннего трения, с последующим созданием расчетной модели для определения ординат эпюры нормальных контактных напряжений в наклонном основании под подошвой фундамента с учетом вариантного образования карстовых воронок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Карстовые воронки обрушения могут иметь различную форму в зависимости от генезиса образования карстовой полости: цилиндрическую, коническую, чашевидную и другие [15]. Возникновение карстово-обвальной формы сложного строения служит последовательным комбинированием простых форм. Например, в нижней части воронка может быть цилиндрической, а в верхней — конической, и наоборот.

При эксплуатации здания или сооружения на контакте «основание – фундамент» появляется НДС, которое обуславливается такими параметрами, как площадь подошвы фундамента и внешняя нагрузка на него, передаваемая от надземной части конструкций; особенности устройства котлована в условиях плотной городской застройки и влияние от рядом расположенных объектов. Грунт основания — многокомпонентная неоднородная среда, параметры которой характеризуют его свойства, которые могут значительно отличаться в условиях расположения выделенного участка под строительство. Параметры деформации основания и нормаль-

ные контактные напряжения в наклонных грунтах представляют трудоемкость при проведении геотехнических расчетов в условиях вероятного образования карстовых явлений для проектировщиков на сегодняшний день. Исключением могут быть стандартные случаи, описанные в нормативных документах. Для возможности проектирования зданий и сооружений в нестандартных условиях необходимо выполнять экспериментально-теоретические исследования. С целью разработки методики расчета фундаментов на наклонном основании, подверженном образованию карста, рассмотрим расчетную схему, представленную на рис. 2.

Карстовая воронка на наклонном основании имеет форму перевернутого наклонного усеченного конуса с большим основанием на наклонной плоскости (рис. 2). В сечении одна из поверхностей этого конуса вертикальная (GE), другая наклонная (AC). Главная задача при расчетах — определение расчетного диаметра провала L_c на поверхности склона, который связан с диаметром карстовой полости и ее радиусом R , глубиной заложения карстовой полости H , а также углами наклона основания α и внутреннего трения грунта φ . Это для фундамента имеет решающее значение, так как на протяжении диаметра провала L_c фундаментная балка теряет контакт с основанием, что резко меняет форму эпюры контактных напряжений и, естественно, внешнюю нагрузку на фундамент. Часть эпюры на длине L_c исключается из эпюры и перераспределяется на оставшиеся участки. Экспериментальными исследованиями [16] установлено, угол наклона ξ связан с углами α и φ . Расчеты показали, что данный угол равен:

$$\xi = \frac{\alpha}{n} + \frac{\varphi}{n}, \quad (1)$$

где коэффициент $n = 4$. Данный коэффициент вычислен по результатам лабораторных экспериментальных исследований с эквивалентным грунтом, проведенных на кафедре строительных конструкций Института «Академия строительства и архитектуры» Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Из схемы будем иметь, что максимальный диаметр провальной воронки L_c состоит из трех основных частей (рис. 2):

$$L_c = ED + DB + BC; \quad (2)$$

$$ED = \frac{R}{\cos \alpha}; \quad (3)$$

$$DB = \frac{R \cdot \cos \xi}{\cos \alpha}; \quad (4)$$

$$BC = \frac{[H + R \cdot (\sin \xi + \cos \xi \cdot \tan \alpha)] \cdot \sin \xi}{\sin(90 - \alpha - \xi)}. \quad (5)$$

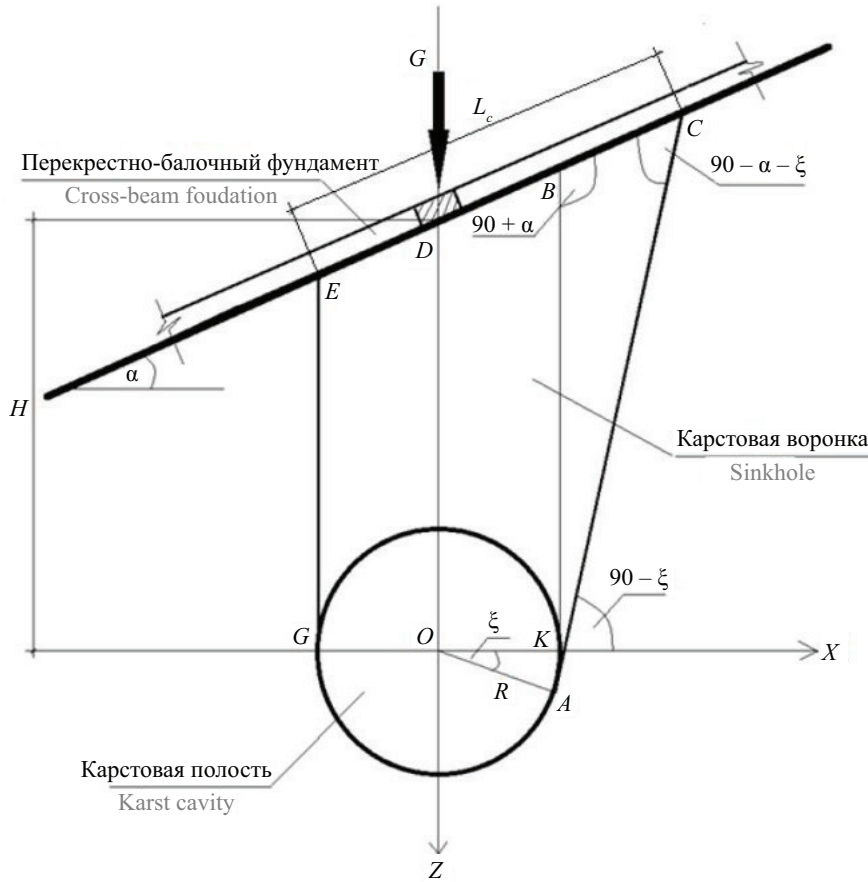


Рис. 2. Расчетная схема к определению карстовой воронки в наклонном основании

Fig. 2. Calculation scheme for karst sinkhole determination in a sloping basement

Определим длину «выключаемой» части наклонного грунтового основания:

$$L_c = \frac{R}{\cos \alpha} (1 + \cos \xi) + \frac{[H + R \cdot (\sin \xi + \cos \xi \cdot \tan \alpha)] \cdot \sin \xi}{\sin(90 - \alpha - \xi)}. \quad (6)$$

Рассмотрим три основных наиболее невыгодных случая расположения карстовой полости в наклонном основании (рис. 3).

Проанализируем каждый из этих случаев. В первом карстовая полость располагается рядом с удерживающей конструкцией и при выходе провала на поверхность из расчетной эпюры нормальных контактных напряжений, которая имеет трапециевидную форму с ординатами P_1 и P_2 , исключается ее часть с ординатами P_1 и P_{xc1} на длине провала L_c . Ординаты P_1 и P_2 определяются по методике, изложенной в работах [17, 18], по формулам:

$$P_1 = 2P_{cp}^* \Delta K; \quad (7)$$

$$P_2 = 2P_{cp}^* (1 - \Delta K), \quad (8)$$

где ΔK — коэффициент, определяющий соотношение граничных коэффициентов жесткости основа-

ния на этапах нагружения конструкции:

$$\Delta K = \frac{\frac{2}{3} P_{cp}^* L^2 b - \sum_{i=1}^n G_i \cos \alpha x_i}{\frac{1}{3} P_{cp}^* L^2 b},$$

где L — общая длина ленты, м; x_i — расстояние от точки приложения усилия G_i до нижней крайней точки фундаментной ленты, м.

Величину среднего давления P_{cp}^* устанавливают из уравнения равновесия всех сил, действующих на балку, при проектировании их на местные координатные оси $OY\alpha$. Тогда:

$$P_{cp}^* = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{Lb} \times (\cos \alpha + \cos \alpha \sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha \sin \alpha f_{tp}^6), \quad (9)$$

где f_{tp}^6 — коэффициент трения бетона по бетону, равен 0,4.

Промежуточные ординаты трапециевидной эпюры контактных давлений рассчитывают по формуле:

$$P_{xi} = P_1 - \frac{(P_1 - P_2) l_i}{L}, \quad (10)$$

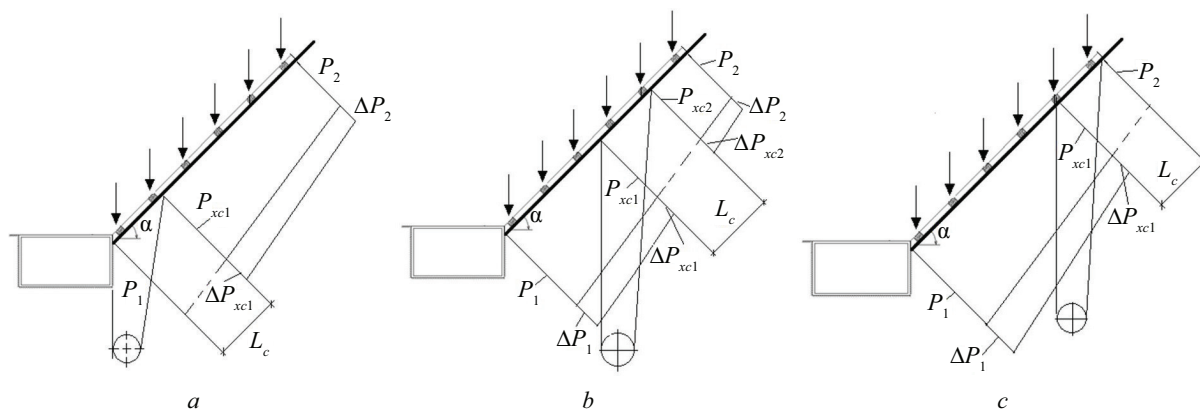


Рис. 3. Трансформирование эпюры контактных напряжений: *a* — у удерживающей конструкции; *b* — в средней части склона; *c* — в крайней точке склона

Fig. 3. Transformation of the contact stresses diagram: *a* — at the retaining structure; *b* — in the middle part of the slope; *c* — at the extreme point of the slope

где l_i — расстояние от точки, в которой определяется давление, до нижней точки фундаментной ленты, м, в данном случае $l_i = L_c$; L — длина продольной ленты, м.

При этом расчетная длина эпюры вычисляется по уравнению:

$$L_b = L - L_c; \quad (11)$$

ординаты соответственно по выражениям:

$$P_{\max} = P_{xc1} + \Delta P_{xc1}; \quad (12)$$

$$P_{\min} = P_2 + \Delta P_2. \quad (13)$$

Тогда:

$$P_{xc1} = P_1 - \frac{(P_1 - P_2) \cdot L_c}{L} = P_1 - \Delta P \cdot \frac{L_c}{L}. \quad (14)$$

Задача сводится к получению ординат дополнительной эпюры контактных давлений ΔP_2 и ΔP_{xc1} . Основными условиями получения данных неизвестных являются соотношение ординат:

$$\frac{P_{xc1}}{P_2} = \frac{\Delta P_{xc1}}{\Delta P_2} \quad (15)$$

и равенство площадей изымаемой эпюры S_{sc} и прибавляемой S_{sc}^a :

$$\frac{P_1 + P_1 - \Delta P \cdot \frac{L_c}{L}}{2} \cdot L_c = \frac{\Delta P_{xc1} + \Delta P_2}{2} \cdot (L - L_c). \quad (16)$$

Проведя соответствующие преобразования и подстановки, получим:

$$\Delta P_2 = \frac{\left(2P_1 - \Delta P \cdot \frac{L_c}{L}\right) \cdot L_c}{\left(\frac{P_{xc1}}{P_2} + 1\right) \cdot (L - L_c)}; \quad (17)$$

$$\Delta P_{xc1} = \Delta P_2 \cdot \frac{P_{xc1}}{P_2}. \quad (18)$$

Во втором случае карстовая полость находится на расстоянии x_c от удерживающей конструкции. При этом должно соблюдаться условие:

$$x_c \geq R_c,$$

где R_c — радиус карстовой полости.

Тогда левая граница карстовой полости на поверхности склона будет определяться исходя из угла наклона основания по условию:

$$\Delta x_c = x_c^* - R_c^* = \frac{1}{\cos \alpha} (x_c - R_c). \quad (19)$$

При этом из общей расчетной эпюры контактных напряжений будет изъята эпюра площадью:

$$S_{cs} = \frac{P_{xc1} + P_{xc2}}{2} \cdot L_c, \quad (20)$$

где $P_{xc1} = P_1 - \Delta P \cdot \Delta x_c / L$; $P_{xc2} = P_2 - \Delta P \cdot \frac{\Delta x_c + L_c}{L}$ — левая и правая ординаты расчетной трапециевидной эпюры контактных напряжений, между которыми напряжения становятся равными нулю из-за провала карстовой полости на длине L_c .

Исходя из нескольких условий:

1) равенства площадей изымаемой эпюры S_{cs} и прибавляемых S_1^a и S_2^a :

$$S_{cs} = S_1^a + S_2^a;$$

2) равенства соотношений соответствующих площадей эпюр:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{S_1^a}{S_2^a}, \quad (21)$$

будем иметь:

$$S_1^a = S_{cs} - \frac{S_{cs}}{1 + \delta_s}; \quad (22)$$

$$S_2^a = \frac{S_{cs}}{1 + \delta_s}, \quad (23)$$

где $\delta_s = S_1/S_2$ — соотношение площадей эпюр.

Решая уравнение (23) относительно неизвестной ординаты ΔP_{xc2} , получим:

$$\Delta P_{xc2} = \frac{(P_{xc1} + P_{xc2}) \cdot L_c}{(1 + \delta S) \cdot \Delta L_b} - \Delta P_2. \quad (24)$$

Используя уравнение (17) и производя соответствующие подстановки и замены, получим:

$$\Delta P_2 = \frac{\frac{(P_{xc1} + P_{xc2}) \cdot L_c}{(1 + \delta S) \cdot \Delta L_b} [(L - \Delta x_c - L_c) \cdot \delta S - \delta P_{xc} \cdot \Delta x_c]}{(\delta P - \delta P_{xc}) \cdot \Delta x_c}. \quad (25)$$

Тогда, используя вышеприведенные зависимости, будем иметь:

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 \cdot \delta P; \quad (26)$$

$$\Delta P_{xc1} = \Delta P_{xc2} \cdot \delta P_{xc}, \quad (27)$$

где $\delta P = P_1/P_2$ — соотношение ординат трапецевидной эпюры при отсутствии карстовой полости; $\delta P_{xc} = P_{xc1}/P_{xc2}$ — соотношение ординат трапецевидной эпюры на границах карстовой полости при ее отсутствии.

В третьем случае карстовая полость располагается у края фундаментной ленты таким образом, чтобы наклонное сечение провальной воронки находилось в крайней точке фундамента и при выходе провала на поверхность из расчетной эпюры нормальных контактных напряжений, которая имеет трапецевидную форму с ординатами P_1 и P_2 исключается ее часть с орди-

натами P_2 и P_{xc1} на длине провала L_c . Этот случай с точки зрения математических решений близок к первому, поэтому детально рассматривать решение считаем нецелесообразным. Таким образом, запишем сразу полученные значения ординат:

$$P_{xc1} = P_1 - \Delta P \cdot \delta L_b, \quad (28)$$

где $\Delta P = P_1 - P_2$ — разность максимальной и минимальной ординат трапецевидной расчетной эпюры без наличия карстовой полости в наклонном основании; $\delta L_b = L - L_c/L$ — отношение разности общей длины балки L и длины карстового провала на поверхности склона L_c к общей длине балки L :

$$\Delta P_{xc1} = \Delta P_1 \cdot \frac{P_2}{P_1}; \quad (29)$$

$$\Delta P_1 = \frac{(P_1 - \Delta P \cdot \delta L_b + P_2) \cdot L_c}{(L - L_c) \cdot P_2/P_1}. \quad (30)$$

Итак, все необходимые компоненты расчетной перераспределенной эпюры нормальных контактных напряжений в наклонном основании получены и могут быть использованы при расчете, проектировании и конструировании такого типа фундаментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки применимости представленной методики с разработанными зависимостями был проведен расчет для конкретного фундамента, представленного в работе [18].

Исходные данные

Initial data

Исходные данные Initial data	Значение параметра Parameter value
Угол наклона склона α Slope angle α	35°
Ширина здания, м Building width, m	18
Длина здания, м Building length, m	25,5
Усилие, приходящее в каждый узел решетки, кН Force arriving at each grid node, kN	1000
Модуль деформации грунта, кН/м ² Soil deformation modulus, kN/m ²	2,4 · 10 ⁴
Проектный класс бетона фундамента В25, МПа Design class of foundation concrete В25, MPa	14,5
Модуль упругости бетона, кН/м ² Modulus of elasticity of concrete, kN/m ²	3 · 10 ⁷
Модуль деформации арматуры, кН/м ² Modulus of deformation of reinforcement, kN/m ²	2,0 · 10 ⁸
Грунт основания Foundation soil	Суглинок Loam
Удельный вес в естественном состоянии γ , кН/м ³ Specific gravity in natural state γ , kN/m ³	16,2
Угол внутреннего трения φ Angle of internal friction φ	30°

Окончание табл. / End of the Table	
Исходные данные Initial data	Значение параметра Parameter value
Коэффициент трения бетона по бетону $f_{\text{п}}^{\text{б}}$ Coefficient of friction of concrete on concrete f_f^c	0,4
Диаметра карстового провала D , м Karst failure diameter D , m	5
Глубина карстовой полости, м Depth of karst cavity, m	10
Расстояние карстовой полости от удерживающей конструкции, м Distance of the karst cavity from the retaining structure, m	0

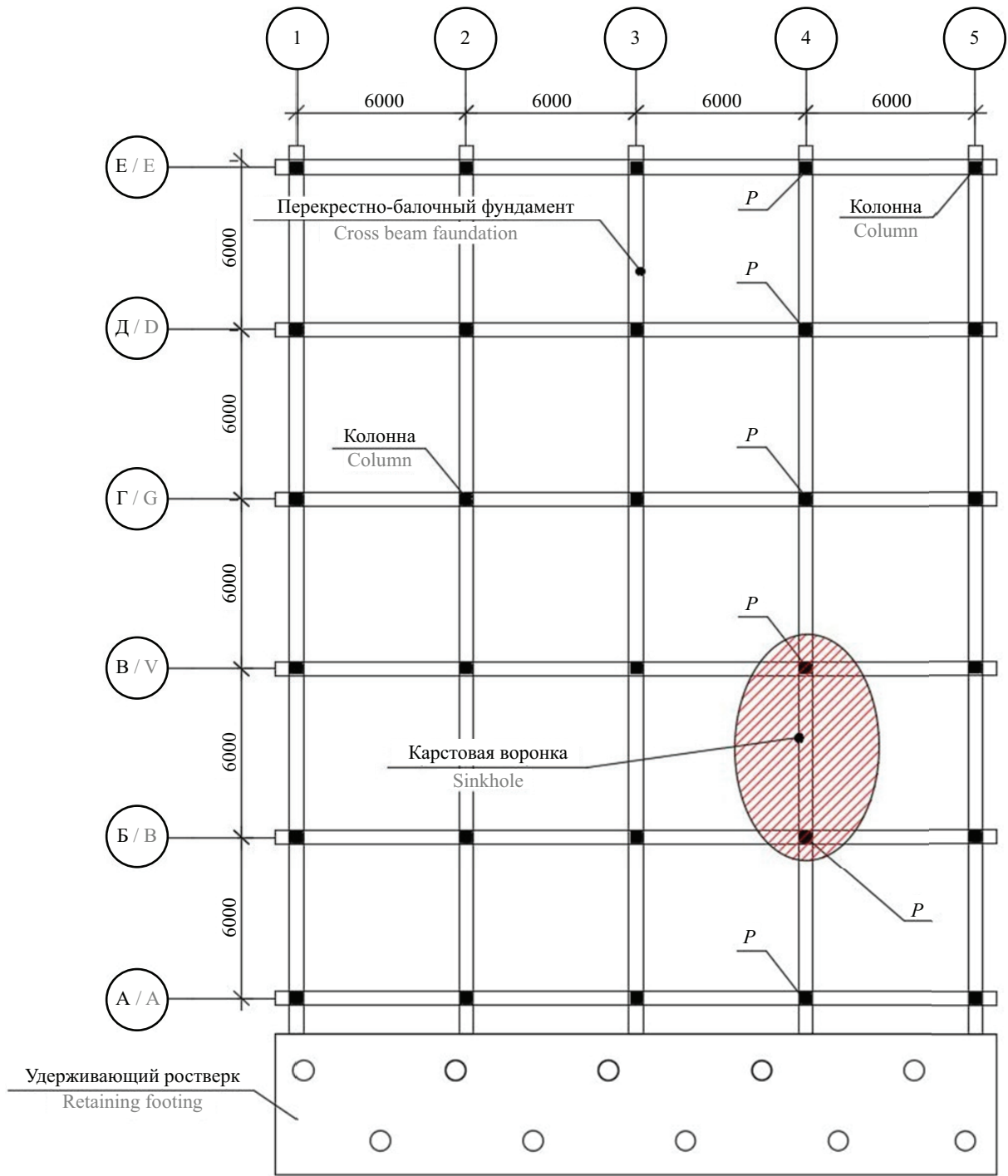


Рис. 4. Схема фундамента из перекрестных лент на склоне
Fig. 4. Schematic diagram of the foundation made of crossed tapes on a slope

Исходные данные для проектирования представлены в таблице, расчетная схема приведена на рис. 4.

При выполнении расчета фундамента без карста получена эпюра нормальных контактных напряжений в наклонном основании под крайней продольной балкой (рис. 5).

Рассчитаем длину карстового провала L_c , выходящего на поверхность.

Расчетная длина эпюры определится по уравнению (11):

$$L_b = L - L_c = 25,5 - 11,51 = 13,99 \text{ м.}$$

Расчетные ординаты эпюры по формуле (26):

$$P_{xc1} = P_1 - \frac{(P_1 - P_2) \cdot L_c}{L} = P_1 - \Delta P \cdot \frac{L_c}{L} = 254,76 - (254,79 - 111,66) \cdot \frac{11,51}{25,5} = 190,19 \text{ кН/м}^2;$$

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= \frac{\left(2P_1 - \Delta P \cdot \frac{L_c}{L}\right) \cdot L_c}{\left(\frac{P_{xc1}}{P_2} + 1\right) \cdot (L - L_c)} = \\ &= \frac{\left(2 \cdot 254,79 - (254,79 - 111,66) \cdot \frac{11,51}{25,5}\right) \cdot 11,51}{\left(\frac{190,19}{111,66} + 1\right) \cdot (25,5 - 11,51)} = \\ &= 135,43 \text{ кН/м}^2; \end{aligned}$$

$$\Delta P_{xc1} = P_2 \cdot \frac{P_{xc1}}{P_2} = 135,43 \cdot \frac{190,19}{111,66} = 309,02 \text{ кН/м}^2.$$

Тогда ординаты перераспределенной эпюры нормальных контактных напряжений после выхода карстовой воронки на поверхность будут иметь вид:

$$P_{\min}^1 = P_2 + \Delta P_2 = 111,66 + 135,43 = 247,09 \text{ кН/м}^2;$$

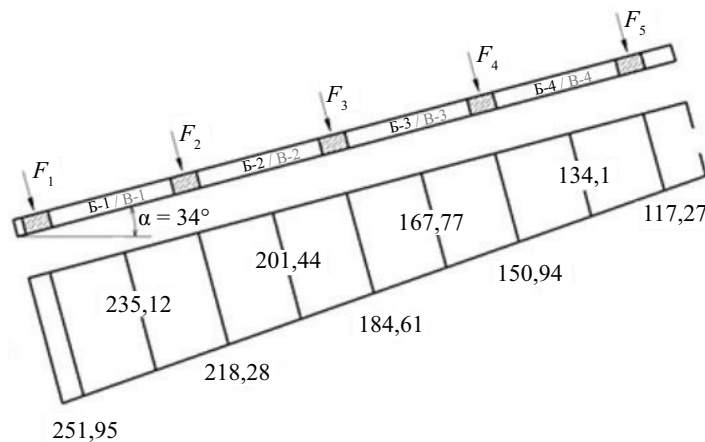


Рис. 5. Трапециевидная эпюра контактных напряжений под продольной лентой

Fig. 5. Trapezoidal diagram of contact stresses under the longitudinal strip

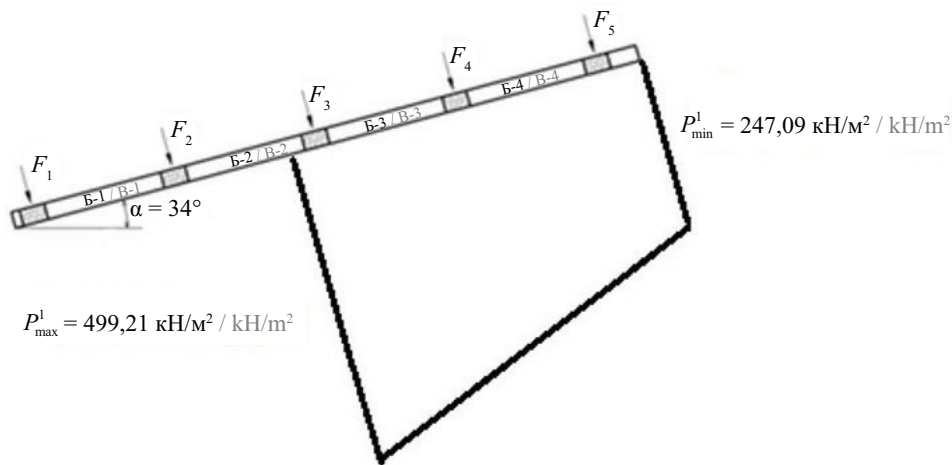


Рис. 6. Перераспределенная эпюра контактных напряжений при наличии карстовой полости

Fig. 6. Redistributed contact stress profile in the presence of a karst cavity

$$P_{\max}^I = P_{\text{xc1}} + \Delta P_{\text{xc1}} = 190,19 + 309,02 = 499,21 \text{ кН/м}^2.$$

В этом случае продольная балка фундамента рассчитывается как многопролетная на воздействие нормальных контактных напряжений трапецевидной формы на длине 13,99 м. Другая часть балки будет рассчитываться как защемленная внецентренно нагруженная консольная балка длиной 11,51 м с нагрузкой от внешних усилий и веса здания (рис. 6).

Расчет моментов и поперечных усилий для определения армирования данной конструкции выполняется по общим правилам строительной механики в программных комплексах САПР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных исследований разработана методика расчета перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании, осложненного карстово-провальными процессами.

Представленная аналитическая методика позволяет определить нормальные контактные на-

пряжения в наклонном грунтовом основании, осложненном карстово-провальными процессами с учетом совместной работы с перекрестно-балочным фундаментом. Методику возможно применять с целью расчета и конструирования фундаментов, а также определения необходимых мероприятий по противокарстовой защите для конкретных условий работы системы «фундамент – наклонное основание».

Разработанная методика может быть использована при проектировании фундаментов зданий и сооружений в условиях сложного рельефа при наличии карстово-провальных процессов на основаниях с углами наклона в пределах от 15 до 35°. Применение данной методики дает возможность выявить особенности изменения НДС системы «фундамент – наклонное основание» при возникновении карстово-провальных процессов в основании, а также проводить варианты расчеты усилий, возникающих в грунтовом основании и фундаментной конструкции в зависимости от параметров месторасположения карстовой полости, ее геометрических размеров, угла наклона основания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аникеев А.В., Рагозин А.Л., Селезнев В.Н. Оценка геологического риска на участке городского строительства // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2007. № 6. С. 547–560. EDN IBCDKZ.
2. Леоненко В.М., Леоненко М.В., Толмачев В.В. Определение параметров проектирования противокарстовой защиты в рамках геотехнической системы «карст-сооружение» // Оценка и управление природными рисками : мат. Всерос. конф. «Риск–2006». 2006. С. 315–318.
3. Tolmachev V., Leonenko M. Experience in collapse risk assessment of building on covered karst landscapes in Russia // Karst Management. 2011. Pp. 75–102. DOI: 10.1007/978-94-007-1207-2_4
4. Амеличев Г.Н., Вахрушев Б.А., Самохин Г.В., Токарев С.В. Особенности инженерных изысканий на закарстованных территориях в пределах Крымского п-ова // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях : мат. Общерос. науч.-практ. конф. 2023. С. 72–92. EDN URNRRM.
5. Вахрушев Б.А. Районирование карста Крымского полуострова // Speleology and Karstology. 2009. № 3. С. 39–46. EDN RCVUYD.
6. Барыкин Б.Ю., Барыкин А.Б., Морозов В.В. Здания и сооружения на сложном рельефе : учебно-методическое пособие. Симферополь : Институт «Академия строительства и архитектуры», 2022. 74 с.
7. Aktürk Ö., Drumm E.C., Tutluoglu L., Akgün H. Undrained stability of residual soil in karst // Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. 2008. Pp. 223–232. DOI: 10.1061/41003(327)22
8. Newton J.G. Development of Sinkholes Resulting From Man's Activities in the Eastern United States // Circular. 1987. DOI: 10.3133/cir968
9. Waltham T., Bell F., Culshaw M. Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer Praxis, 2005.
10. Zhou W., Beck B.F. Management and mitigation of sinkholes on karst lands: an overview of practical applications // Environmental Geology. 2008. Vol. 55. Pp. 837–851. DOI: 10.1007/s00254-007-1035-9
11. Roscoe K.H. The influence of strains in soil mechanics // Géotechnique. 1970. Vol. 20. Issue 2. Pp. 129–170. DOI: 10.1680/geot.1970.20.2.129
12. Salvati R., Tharp T.M., Capelli G. Conceptual model for geotechnical evaluation of sinkhole risk in the Latium Region // Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology. Lisse : Swets & Zeitlinger, 2001. Pp. 163–167.
13. Tharp T.M. Cover-collapse sinkhole formation and soil plasticity // Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. 2003. Pp. 110–123. DOI: 10.1061/40698(2003)9
14. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М. : ПУДН, 2017. 328 с. EDN ZSLFBT.

15. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М., 1995. 167 с.

16. Евтушенко С.И., Зеленин Е.В. Модельные исследования взаимодействия перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания над карстовой полостью // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 4. С. 8. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-8-8. EDN OIBIJK.

17. Барыкин А.Б. Модельные исследования деформаций оснований перекрестно-балочных фундаментов на склонах // Строительная механика и расчет сооружений. 2017. № 3 (272). С. 68–75. EDN YPJIT.

18. Барыкин А.Б. Экспериментально-теоретические основы взаимодействия перекрестно-балочных фундаментов с наклонным основанием: дис. ... канд. тех. наук. Волгоград, 2018. 184 с. EDN SSOIFD.

Поступила в редакцию 6 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 мая 2024 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2024 г.

О Б А В Т О Р А Х: Александр Борисович Барыкин — кандидат технических наук, преподаватель кафедры геотехники и конструктивных элементов, Институт «Академия строительства и архитектуры»; Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского); 295007, Республика Крым, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, д. 4; aleksbarykin@yandex.com;

Борис Юрьевич Барыкин — кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры строительных конструкций, Институт «Академия строительства и архитектуры»; Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского); 295007, Республика Крым, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, д. 4; dekan.asf@mail.ru;

Евгений Владимирович Зеленин — аспирант кафедры строительных конструкций, Институт «Академия строительства и архитектуры»; Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского); 295007, Республика Крым, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, д. 4; workandearn@mail.ru.

Вклад авторов:

Барыкин А.Б. — концепция исследования, научное редактирование.

Барыкин Б.Ю. — научное руководство.

Зеленин Е.В. — написание статьи, концепция исследования, разработка методологии, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Anikeev A.V., Ragozin A.L., Seleznev V.N. Evaluation of the geological risk on an urban construction site. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2007; 6:547-560. EDN IBCDKZ. (rus.).

2. Leonenko V.M., Leonenko M.V., Tolmachev V.V. Determination of karst protection design parameters within the framework of geotechnical system “karst-construction”. *Assessment and management of natural risks : proceedings of the All-Russian Conf. “Risk-2006”*. 2006; 315-318. (rus.).

3. Tolmachev V., Leonenko M. Experience in Collapse risk assessment of building on covered karst landscapes in Russia. *Karst Management*. 2011; 75-102. DOI: 10.1007/978-94-007-1207-2_4

4. Amelichev G.N., Vakhrushev B.A., Samokhin G.V., Tokarev S.V. Peculiarities of engineering surveys on the Carsted territories within the Crimean peninsula. *Study of Hazardous Natural Processes and Geotechnical Monitoring in Engineering Surveys : proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2023; 72-92. EDN URNRRM. (rus.).

5. Vakhrushev B.A. Karst zonation of the Crimean Peninsula. *Speleology and Karstology*. 2009; 3:39-46. EDN RCVUYD. (rus.).

6. Barykin B.Yu., Barykin A.B., Morozov V.V. *Buildings and constructions on a complex relief: educational and methodical manual*. Simferopol, Institute “Academy of Construction and Architecture”, 2022; 74. (rus.).

7. Aktürk Ö., Drumm E.C., Tutluoglu L., Akgün H. Undrained stability of residual soil in karst. *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*. 2008; 223-232. DOI: 10.1061/41003(327)22

8. Newton J.G. Development of sinkholes resulting from man’s activities in the Eastern United States. *Circular*. 1987. DOI: 10.3133/cir968

9. Waltham T., Bell F., Culshaw M. *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Springer Praxis, 2005.

10. Zhou W., Beck B.F. Management and mitigation of sinkholes on karst lands : an overview of practical applications. *Environmental Geology*. 2008; 55:837-851. DOI: 10.1007/s00254-007-1035-9

11. Roscoe K.H. The influence of strains in soil mechanics. *Géotechnique*. 1970; 20(2):129-170. DOI: 10.1680/geot.1970.20.2.129
12. Salvati R., Tharp T.M., Capelli G. Conceptual model for geotechnical evaluation of sinkhole risk in the Latium Region. *Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology*. Lisse, Swets & Zeitlinger, 2001; 163-167.
13. Tharp T.M. Cover-collapse sinkhole formation and soil plasticity. *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*. 2003; 110-123. DOI: 10.1061/40698(2003)9
14. Anikeev A.V. *Falls and sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment*. Moscow, RUDN, 2017; 328. EDN ZSLFBT. (rus.).
15. Savarensky I.A., Mironov N.A. *Guidelines for engineering-geological surveys in areas of karst development*. Moscow, 1995; 167. (rus.).
16. Evtushenko S., Zelenin E. Experimental studies of the interaction of a cross-beam foundation and an inclined base over a karst cavity. *Construction and Architecture*. 2023; 11(4):8. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-8-8. EDN OIBIJK. (rus.).
17. Barykin A.B. Model studies of deformations of cross-beam foundations on slopes. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2017; 3(272):68-75. EDN YPJIT. (rus.).
18. Barykin A.B. *Experimental-theoretical bases of interaction of cross-beam foundations with the sloping base : dis. ... Candidate of Technical Sciences*. Volgograd, 2018; 184. EDN SSOIFD. (rus.).

Received May 6, 2024.

Adopted in revised form on May 27, 2024.

Approved for publication on June 6, 2024.

B I O N O T E S : **Alexander B. Barykin** — Candidate of Technical Sciences, Lecturer at the Department of Geotechnics and Structural Elements, Institute “Academy of Construction and Architecture”; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 4 prospekt Vernadskogo, Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russian Federation; aleksbarykin@yandex.com;

Boris Yu. Barykin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lecturer at the Department of Building Structures, Institute “Academy of Construction and Architecture”; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 4 prospekt Vernadskogo, Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russian Federation; dekan.asf@mail.ru;

Evgeniy V. Zelenin — postgraduate student; Institute “Academy of Construction and Architecture”; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 4 prospekt Vernadskogo, Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russian Federation; workandearn@mail.ru.

Contribution of the authors:

Alexander B. Barykin — research concept, scientific editing.

Boris Yu. Barykin — scientific supervision.

Evgeniy V. Zelenin — article writing, research concept, methodology development, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER

УДК 69.07

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1505-1520

Обзор мирового опыта по проведению натурных испытаний существующих железобетонных конструкций

Олег Васильевич Кабанцев, Андрей Евгеньевич Лапшинов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Проанализирован отечественный и зарубежный опыт проведения натурных испытаний. Приведена ретроспектива развития стандартов на выполнение натурных испытаний в России и СССР. Осуществлен обзор мировых нормативных документов в части требований к проведению натурных испытаний конструкций, который показал недостаточную исследованность этого вопроса как в нашей стране, так и за рубежом. Полученный обзор может являться основанием для разработки национального стандарта РФ на проведение натурных испытаний.

Материалы и методы. Выполнен аналитический обзор.

Результаты. Показано состояние вопроса и применение стресс-тестов (натурных испытаний) в нашей стране, а также в Германии, США, Италии, Канаде, Австралии, Швейцарии и других странах. Представлены минимальные требования к целевой испытательной нагрузке при испытаниях, режиму нагружения и критериям приемки для экспериментальной оценки несущей способности существующих несущих конструкций, указанные в различных нормах. Проанализированы специализированные критерии приемки несущих конструкций, такие как коэффициент постоянства и отклонения от линейности, упоминаемые в отдельно взятых стандартах.

Выводы. Отмечается сходство общих подходов и отсутствие унифицированных требований к выполнению подобного вида исследований и оценке их результатов. Рассматривается необходимость разработки национального стандарта РФ на проведение натурных испытаний возведенных железобетонных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конструкции, несущие системы, нагрузка, натурные испытания, прочность, деформативность, трещиностойкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кабанцев О.В., Лапшинов А.Е. Обзор мирового опыта по проведению натурных испытаний существующих железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1505–1520. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1505-1520

Автор, ответственный за переписку: Андрей Евгеньевич Лапшинов, la686@yandex.ru.

A review of the world experience in full-scale testing of existing reinforced concrete structures

Oleg V. Kabantsev, Andrey E. Lapshinov

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

ABSTRACT

Introduction. Domestic and foreign experience of full-scale tests is analyzed. The retrospective of development of standards for conducting full-scale tests in Russia and the USSR is presented. The review of the world regulatory documents regarding the requirements for conducting full-scale tests of structures is carried out, which showed insufficient research of this question both in our country and abroad. The obtained review can be the basis for the development of the national standard of the Russian Federation for conducting full-scale tests.

Materials and methods. Analytical review.

Results. The state of the issue and the application of stress tests (full-scale tests) in our country, as well as in Germany, the USA, Italy, Canada, Australia, Switzerland and other countries are shown. The minimum requirements for the target test load during testing, the loading mode and acceptance criteria for the experimental assessment of the load-bearing capacity of existing load-bearing structures specified in various standards are given. Specialized criteria for the acceptance of load-bearing structures, such as the permanency ratio and deviation from linearity index, mentioned in individual standards, are analyzed.

Conclusions. The similarity of common approaches and the lack of unified requirements for conducting this type of research and evaluating their results are noted. The necessity to develop a national standard of the Russian Federation for full-scale tests of erected reinforced concrete structures is considered.

KEYWORDS: structures, load-bearing systems, load, full-scale tests, strength, deformability, crack resistance

FOR CITATION: Kabantsev O.V., Lapshinov A.E. A review of the world experience in full-scale testing of existing reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1505-1520. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1505-1520 (rus.).

Corresponding author: Andrey E. Lapshinov, la686@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В отдельных случаях при обследовании зданий и сооружений или их приемке требуется оценить нестандартное проектное решение или допущенные в ходе строительства отклонения от проекта. Однако зачастую оценить безопасность таких решений или отклонений расчетным методом не представляется возможным из-за несовершенства или отсутствия соответствующих методик. В таком случае прибегают к проведению натурных испытаний конструкции, находящейся в проектном положении непосредственно на объекте. Как правило, такие испытания выполняются по специально разработанной программе. И разработка программы, и испытания осуществляются научными организациями. Следует подчеркнуть, что прямые нормативные требования по проведению, анализу и приемке результатов натурных испытаний существующих конструкций, входящих в состав несущей системы, отсутствуют.

Согласно п. 6 ст. 15 Федерального закона № 384-ФЗ¹ соответствие проектных значений параметров и проектных характеристик зданий или сооружений требованиям безопасности должны быть обоснованы ссылками на требования ФЗ, а также ссылками на требования стандартов и сводов правил, включенных в перечни ФЗ, или на требования специальных технических условий.

При этом в случае отсутствия указанных требований соответствие проектных значений и характеристик здания или сооружения требованиям безопасности должно быть обосновано одним или несколькими способами из следующих:

- 1) результаты исследований;
- 2) расчеты и (или) испытания, выполненные по сертифицированным или апробированным иным способом методикам;
- 3) моделирование сценариев возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий, в том числе при неблагоприятном сочетании опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий;
- 4) оценка риска возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий.

Таким образом, в некоторых случаях механическая безопасность зданий и сооружений, а также отдельных конструкций может быть обеспечена выполнением натурных испытаний по сертифицированным или апробированным иным способом ме-

тодикам. Исходя из трактовки закона проведением натурных испытаний конструкций можно обосновывать соответствие проектных или действительных характеристик конструкций здания или сооружения требованиям безопасности. То есть, иными словами, можно обосновать соответствие фактической несущей способности возведенных конструкций проектным значениям методом прямых испытаний нагружением экспериментальной нагрузкой.

Анализ перечня нормативных документов показывает, что на сегодня в РФ отсутствуют нормативные документы на натурные испытания существующих железобетонных конструкций (ЖБК), входящих в состав несущей системы, что является препятствием для реализации положений п. 6 ст. 15 Федерального закона № 384-ФЗ.

В нашей стране натурные испытания элементов несущих систем и отдельных конструкций, входящих в состав таких систем, разработаны для отдельных классов сооружений. Достаточно упомянуть, что методы испытаний существующих конструкций внедрены в инженерную практику и используются для подтверждения проектных значений несущей способности при приемке мостовых сооружений (СП 79.13330.2012²) или свайных фундаментов (СП 24.13330.2021³). Также среди действующих стандартов на испытания конструкций можно отметить ГОСТ Р 56379–2015⁴, распространяющийся на определение несущей способности полов, однако данный метод испытаний не вошел в широкую инженерную практику из-за ограниченности применения, сложности изготовления оснастки (деформатора) и необходимости иметь упор сверху. В сложившихся обстоятельствах нормативный документ по применению методов испытаний существующих ЖБК широкого спектра зданий и сооружений весьма востребован практикой строительства и необходима его разработка.

В связи с высокой актуальностью проблемы авторы настоящей статьи проанализировали международные нормы по экспериментальной оценке несущей способности существующих и входящих в состав несущих систем ЖБК с целью сопоставления этих подходов с имеющимся в России уровнем техники, а также для определения перспективных подходов к методике экспериментальной оценки

² СП 79.13330.2012. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. Актуализированная редакция СНиП 3.06.07–86.

³ СП 24.13330.2021. СНиП 2.02.03–85. Свайные фундаменты.

⁴ ГОСТ Р 56379–2015. Полы. Метод испытания несущей способности.

¹ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ.

несущей способности существующих ЖБК зданий и сооружений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполнен аналитический обзор состояния нормативной базы разных стран в части, касающейся оценки несущей способности ЖБК методом проведения натурных испытаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ниже представлено состояние нормативной базы разных стран в части проведения натурных испытаний ЖБК.

СССР/Россия

ГОСТ 8829–58 стал первым стандартом такого рода в нашей стране и был введен в Советском Союзе в 1958 г. Он назывался «Детали железобетонные сборные. Методы испытаний и оценка прочности, жесткости и трещиностойкости». С тех пор стандарт обновлялся каждое десятилетие: в 1966, 1977, 1985 и 1994 гг. Также некоторое время действовали строительные нормы СН 417–70⁵, которые впоследствии отменены, а взамен с 01.01.78 утвержден и введен в действие ГОСТ 8829–77 (ИУС 3–77).

⁵ СН 417–70. Временные указания по контролю и оценке прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных изделий и конструкций неразрушающими методами.

На текущий момент в РФ действует межгосударственный стандарт ГОСТ 8829–2018⁶. Он предназначен для применения лабораториями, осуществляющими контрольные статические испытания изделий нагружением в соответствии с требованиями ГОСТ 13015⁷, т.е. только изделий заводской готовности. Стандарт не распространяется на испытание натурных существующих конструкций, а также на оценку правильности проектирования изделий. Редакция ГОСТ 8829 от 1994 г. допускала использовать методы испытаний и правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости изделий, определенных стандартом при проведении исследовательских испытаний вновь проектируемых изделий. Однако редакция от 2018 г. уже не распространяется на испытания с целью оценки правильности проектирования изделий.

Испытания согласно ГОСТ 8829–2018 выполняются до разрушения, при этом значения контрольных разрушающих нагрузок назначаются в зависимости от коэффициента *C*, учитывающего не только предполагаемый механизм и характер разрушения, но и вид бетона испытываемых конструкций (таблица).

⁶ ГОСТ 8829–2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости.

⁷ ГОСТ 13015. Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения.

Значения коэффициента *C* для испытываемых изделий в зависимости от механизма и характера разрушения, а также вида бетона

The values of the coefficient *C* for the tested products, depending on the mechanism and nature of destruction, as well as the type of concrete

Механизм разрушения Failure mechanism	Характер разрушения Failure type	Значение коэффициента <i>C</i> The value of the factor <i>C</i>
От действия изгибающего момента по нормальному сечению или от внецентренного сжатия From the action of the bending moment along the normal section or from eccentric compression	Пластичный, с текучестью продольной арматуры в ормальном и наклонном сечениях до наступления раздробления сжатой зоны Ductile, with the yielding of longitudinal reinforcement in normal and oblique sections before the crushing of the concrete compressed zone	1,3
	Хрупкий, с раздроблением сжатой зоны бетона, с разрывом арматуры изделий из бетонов: • тяжелого, мелкозернистого и силикатного; • легкого Brittle, with the crushing of the concrete compressed zone, with rupture of reinforcement of concrete: • heavy, fine-aggregate and silicate concrete; • lightweight	1,6 1,8
	Пластичный, с текучестью продольной и/или поперечной арматуры в наклонном сечении Ductile, with the yielding of longitudinal and/or transverse reinforcement in an oblique section	1,3
От действия поперечных сил по наклонному сечению или между наклонными трещинами From the action of shear forces along an oblique section or between oblique cracks	Хрупкий, с раздроблением бетона или нарушением анкеровки арматуры Brittle, with concrete crushing or reinforcement anchoring failure	1,9

Нагружение конструкций согласно ГОСТ 8829–2018 допускается проводить как штучными грузами, так и гидравлическими прессами или стендами с гидравлическими домкратами и насосными станциями, а также многорычажными и пневматическими установками.

В случае необходимости осуществления испытаний существующих конструкций разрабатывается специальная программа испытаний. При этом при разработке такой программы, как правило, используется ГОСТ 8829. Однако использование указанного стандарта имеет значительные ограничения:

1) применение ограничено группой изделий заводского изготовления, что следует из наименования нормативного документа, а большой объем конструкций и несущих систем на сегодняшний день в нашей стране выполняется по технологии монолитного железобетона непосредственно на месте их дальнейшей эксплуатации;

2) стандарт подразумевает проведение испытаний до достижения контролируемого параметра предельного состояния, т.е. исчерпания несущей способности по одному из критериев (например, прочность нормального или наклонного сечения), причем также принимается во внимание ожидаемый механизм разрушения (хрупкий, пластичный). При проведении натурных испытаний на объекте указанное ключевое условие (достижение предельного состояния) часто невыполнимо и, более того, в случае достижения может повлечь за собой необратимые разрушения как самой конструкции, так и спровоцировать обрушение смежных конструкций, вплоть до прогрессирующего обрушения всей несущей конструктивной системы здания.

Таким образом, нормативная база РФ в части, касающейся экспериментальной оценки существующих и входящих в состав несущих систем конструкций, требует совершенствования и развития.

ФРГ

Историческое развитие правил стресс-тестов (натурных испытаний) в Германии подробно описано в публикациях [1, 2], ссылки на более подробную литературу по текущим основам применения указаны в работах [3–5].

С 2000 г. нагрузочные испытания на существующих конструкциях регулируются директивой Немецкого комитета по железобетону «Испытания нагружением бетонных конструкций»⁸. Эта директива позволила экспериментально доказать несущую способность многих существующих конструкций за последние 15 лет и, таким образом, внести решающий вклад в их сохранение [6]. Согласно указанной директиве, натурные испытания могут «дополнять доказательство несущей способности существующих конструкций в обоснованных слу-

чаях, когда такое доказательство не может быть получено путем расчета, несмотря на тщательное обследование конструкции».

В Германии термин «испытание нагружением» сохранился до наших дней из-за его исторического значения, но сегодня он используется как синоним для различных типов испытаний с квазистатической нагрузкой:

- испытания на уровне полезной нагрузки;
- испытания до целевой экспериментальной нагрузки⁹;
- испытания до предельной экспериментальной нагрузки;
- испытания до разрушения.

Как правило, задача натурных испытаний состоит не в том, чтобы определить фактическую несущую способность конструкции, а в том, чтобы доказать достаточную несущую способность при определенном воздействии [7]. Цель состоит в том, чтобы обеспечить максимально возможную полезную нагрузку F_k , не повреждая испытываемую конструкцию во время испытания. Величина нагрузки, которая должна быть приложена в ходе испытания, является целевой испытательной нагрузкой F_{Ziel} , она рассчитывается на основе нагрузки, подлежащей проверке (включая все коэффициенты безопасности). Максимально допустимая нагрузка при испытании — это предельная испытательная нагрузка F_{lim} , т.е. нагрузка, при которой еще не наступило критическое состояние, которое могло бы привести к разрушению.

Таким образом, для того, чтобы с высокой степенью достоверности подтвердить несущую способность испытываемого элемента на установленную полезную нагрузку, необходимо приложить максимально возможную испытательную нагрузку, и в то же время нагрузка не должна быть настолько большой, чтобы повредить конструкцию.

Однако богатый опыт проведения и оценки стресс-тестов показывает, что требования и критерии оценки, изложенные в директиве, не во всех случаях достаточно конкретизированы или пригодны для практического применения. Это касается измеряемых величин деформации, которые должны быть получены в ходе испытания, и связанных с ними критериев оценки, практическая значимость которых в некоторых случаях может быть поставлена под сомнение. Сообщалось также о некоторых опасных для жизни ошибках при проведении испытаний (например, использование балластных масс, не защищенных от падения, для создания нагрузки или применение механических измерительных приборов с ручным считыванием показаний), которые

⁹ Термин «целевая экспериментальная нагрузка», очевидно, соответствует термину «контрольная нагрузка при испытаниях» в терминологии российской научно-технической документации.

связаны с недостаточно четко сформулированными требованиями к нагрузочной и измерительной технике, а также (в отдельных случаях) с недостаточным опытом и знаниями специалистов.

Кроме того, в последнее время в ФРГ были предприняты некоторые усилия [3, 8] по расширению применения метода экспериментальной оценки несущей способности даже к тем элементам, которые ранее не подвергались испытаниям под нагрузкой из-за их низкой пластичности. Например, изложены [4] основы для экспериментальной оценки прочности на сдвиг для стальных и предварительно напряженных ЖБК, которые должны позволить в будущем с уверенностью оценивать несущую способность и механические характеристики таких несущих конструкций. Дальнейшие исследования [9] были посвящены увязке и согласованию результатов экспериментального и численного контроля. При этом численные модели проверяются и калибруются с помощью системных измерений компонентов при эксплуатационных нагрузках и таким образом обеспечивают численное определение несущей способности, что стало возможным благодаря экспериментально полученной информации [9]. Натурные испытания при помощи специализированного испытательного грузового автомобиля BELFA [10] также дали возможность во многих случаях экспериментально доказать несущую способность существующих мостов малого и среднего пролета [11]. Все эти дальнейшие разработки и выводы, основанные на практическом опыте, в сочетании с внедрением Еврокодов привели к необходимости пересмотра директивы.

Испытания на несущую способность, при которых элементы подвергаются нагрузке до разрушения, в настоящее время не подпадают под действие немецкой директивы. Чтобы исключить риск «необъявленного отказа (например, разрушения при сдвиге)», компоненты с такими формами отказа ранее не учитывались при оценке нагрузочных испытаний, поскольку для этого отсутствовали критерии оценки для безопасного определения экспериментальной предельной нагрузки.

В исследованиях G. Spaethe [12] используются вероятностные методы для наглядного объяснения влияния успешно проведенного испытания на прочность на растяжение исследуемого компонента. При этом рассматривается уровень безопасности, выраженный индексом безопасности β до, во время и после пробной нагрузки, автор исследований приходит к выводу, что «с точки зрения теории безопасности пробная нагрузка может быть полезной, бессмысленной или даже вредной». Соотношение между приложенной нагрузкой и предыдущей полезной нагрузкой, полученное в ходе испытания, имеет решающее значение для оценки безопасности, достигнутой в результате нагрузочного испытания.

Как показано на рис. 1, приложение предполагаемой целевой нагрузки приводит к снижению индекса безопасности во время испытания, после успешного завершения испытания ведет к последующему увеличению индекса безопасности, поскольку испытание улучшает знания о несущем поведении конструкции, если нагрузка была воспринята без разрушения.

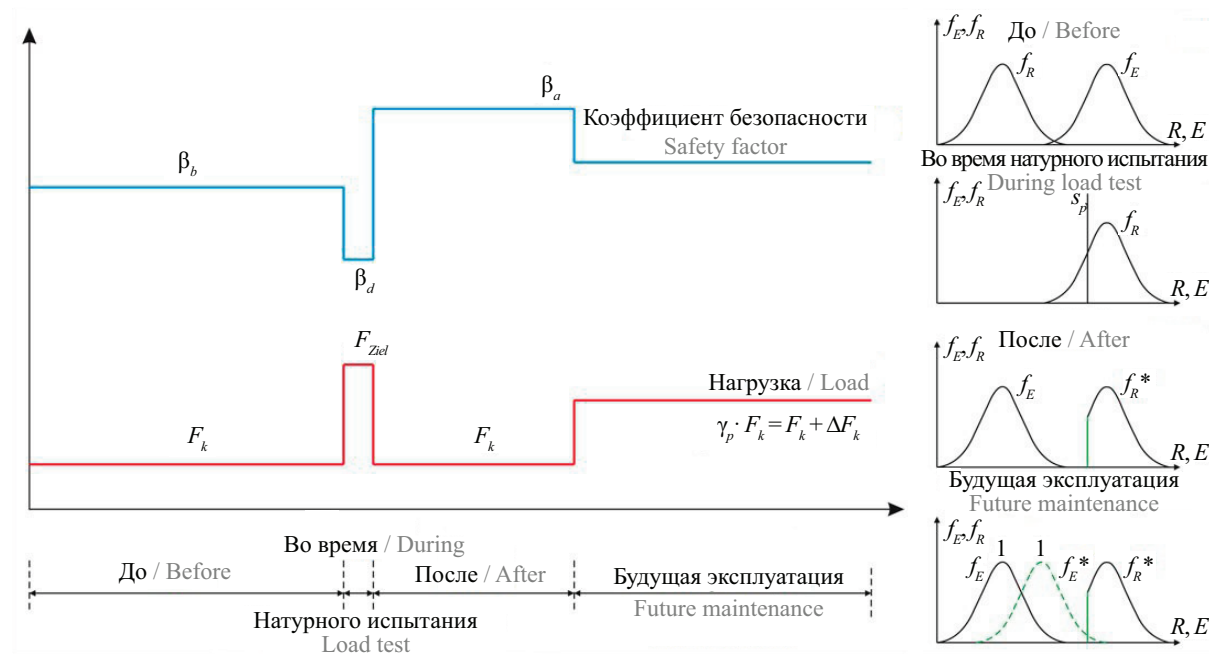


Рис. 1. Объяснение повышения безопасности и, как следствие, обнаруженных скрытых резервов прочности в результате натурных испытаний, согласно работе [12]

Fig. 1. An explanation of the increased safety and, as a result, the discovered hidden reserves of strength after load tests, according to [12]

Поскольку конструкция выдержала запланированную нагрузку без каких-либо признаков разрушения, неизвестная функция плотности распределения сопротивлений используется для расчета, а все значения несущей способности ниже выдерживаемой нагрузки исключаются. Это приводит к уменьшению функции плотности распределения (рис. 1), что означает уменьшение неопределенности сопротивления.

Полученная дополнительная безопасность может быть использована на стороне нагрузки для увеличения допустимой полезной нагрузки ΔF_k . В своих расчетах автор [12] также показывает, что испытание на уровне полезной нагрузки не дает большого повышения безопасности, а повышение безопасности увеличивается только с увеличением уровня нагрузки, поскольку только таким образом обнаруживаются и устраняются слабые участки и, следовательно, прогнозируются и устраняются неопределенности контролируемого характера [12].

По исследованию [12] общая полезная нагрузка ΔF , полученная в случае успешного установления целевой нагрузки испытания F_{Ziel} (дополнительная нагрузка G_k и транспортная нагрузка Q_k), определяется из доли нагрузки $extF_{Ziel}$, внесенной извне в испытание, с учетом соответствующих частных коэффициентов безопасности на стороне воздействия. Существующие остаточные нагрузки компонента полностью задействованы во время испытания и, соответственно, не являются составной частью $extF_{Ziel}$. Дополнительные остаточные нагрузки, неэффективные в испытании, должны учитываться при определении $extF_{Ziel}$ точно так же, как и при вычислительном обнаружении с использованием частных коэффициентов надежности. Согласно директиве, характеристика предельного состояния по несущей способности определяется следующей зависимостью между прилагаемой извне испытательной или предельной нагрузкой и проверяемыми характеристиками:

$$extF_{lim} \geq extF_{Ziel} = \sum_{j>1} \gamma_{Gj} \cdot G_{kj} + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \sum_{i>1} \gamma_{Qi} \cdot \psi_{Qi} \cdot Q_{ki} \geq 0,35 \cdot G_{k1}. \quad (1)$$

Минимальный уровень внешней целевой нагрузки $extF_{Ziel}$ указанной в уравнении (1), предназначен для обеспечения того, чтобы для конструкций с большим значением собственного веса доля внешней нагрузки была не меньше 1,00–1,35 раза, чем характеристическое значение остальных нагрузок, действующих во время испытания [13]. Согласно указанной выше директиве, нагрузка должна применяться таким образом, чтобы «максимально точно отражать воздействия в последующем периоде эксплуатации в их наихудшем сочетании».

Нагрузка, приложенная в ходе испытания, должна представлять рассчитанные нагрузки и создавать соответствующие напряжения в конструкции. Упомя-

нутая директива прямо не предписывает, как создавать нагрузку при испытании, однако в настоящее время в Германии преимущественно используется так называемая технология самоблокирующейся нагрузки.

Использование балластных масс¹⁰ для подтверждения достаточной несущей способности сопряжено с высоким риском для персонала и техники и в конечном итоге (по мнению авторов немецкой директивы) не соответствует требованиям неразрушающего контроля. При использовании самоблокирующейся системы нагружения испытательные нагрузки, возникающие при испытании, генерируются гидравлически и закрепляются непосредственно вблизи исследуемой конструкции, так что силовой контур замыкается, а прилегающие конструкции не подвергаются нагружению.

При условии наличия деформационно-жесткой несущей рамы и пластичных характеристик элементов испытание является самоблокирующимся. Эта самозащита достигается за счет того, что при сильной деформации испытываемой конструкции гидравлическое давление снижается, и вся система переходит в безопасное равновесное состояние. Кроме того, гидравлическая нагрузка позволяет быстро разгрузить конструкцию за счет снижения гидравлического давления [5].

Согласно немецкой директиве, достижение экспериментальной нагрузки целевого уровня должно осуществляться по меньшей мере за три этапа, причем после каждого этапа по меньшей мере один раз должна быть снижена до базового уровня нагрузки $0,1F_k$. Нагрузка должна поддерживаться постоянной в течение «разумного» времени при каждой загрузке и разгрузке.

Помимо этих минимальных требований, рекомендуется выполнять циклы загрузки и разгрузки на нескольких уровнях с повторением, поскольку таким образом можно с большей вероятностью обнаружить нелинейности в зависимости «нагрузка – деформации» (рис. 2). Заключительный этап испытания (продолжительностью от 15 до 30 мин) дает дополнительную информацию о возможных деформациях, зависящих от времени. Во время испытания значения выбранных компонентов записываются в режиме онлайн и отображаются в подходящей форме, чтобы инженер-испытатель мог оценивать их в режиме реального времени. Это единственный способ своевременно обнаружить и оценить начавшиеся нелинейные структурные изменения в конструкции.

В директиве определены следующие критерии деформации, указывающие на достижение предельной экспериментальной нагрузки:

- ограничение деформации бетона в области стабильного образования микротрещин;

¹⁰ Термин «балластные массы», очевидно, соответствует термину «штучные грузы» в терминологии российской научно-технической документации и, в частности, ГОСТ 8829.

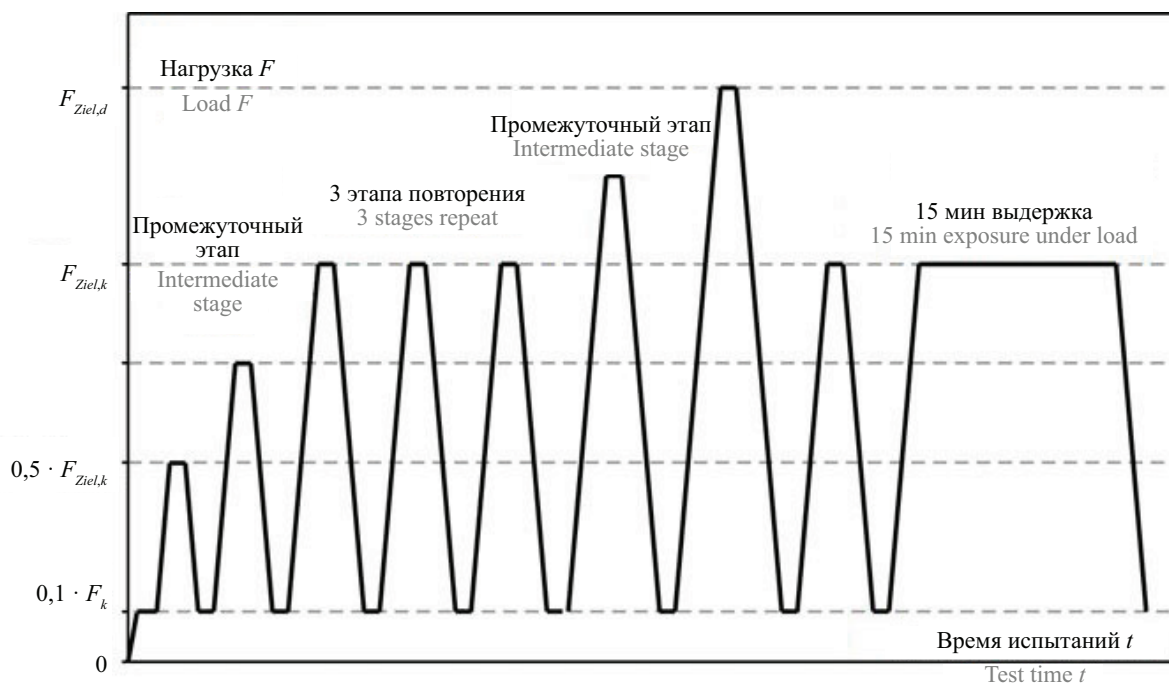


Рис. 2. Типовой режим нагрузок для натурных испытаний согласно немецкой директиве

Fig. 2. Typical load regime for load tests according to German directive

- ограничение деформации арматуры в зоне упругости;
- ограничение ширины трещин в зависимости от нагрузки и соответственно предела прочности арматуры;
- изменение ширины раскрытия трещины;
- ограничение нелинейных деформаций при нагрузке или деформации, которые остаются неизменными после разгрузки;
- ограничение деформаций в зоне наклонных сечений балок (трещины в наклонном сечении и растяжение стали в поперечной арматуре).

Экспериментальная предельная нагрузка также считается достигнутой, если:

- данные измерений, такие как деформация под нагрузкой или данные акустической эмиссии, указывают на критические изменения, которые при дальнейшем увеличении нагрузки могут привести к образованию необратимых повреждений;
- обнаружена угроза устойчивости;
- существует угроза возникновения критических перемещений опор.

Анализ предлагаемых значений предельной нагрузки, основанных на величинах деформации, показывает, что инструменты в виде оценки напряжений в арматуре вряд ли могут быть применены с практической точностью, поскольку, с одной стороны, точное местоположение максимальной деформации неизвестно (вследствие сложности прогноза трасс образования трещин), с другой — упругая предварительная деформация от собственного веса должна быть известна именно в этом месте. Корректная оценка напряжений в арматуре может быть выполне-

на только с применением датчиков, заранее установленных на арматуру, что для испытаний конструкций, входящих в состав несущей системы, является исключительным случаем.

Поэтому для оценки структурной безопасности изгибаемых элементов обычно используются диаграммы «нагрузка – прогиб». На их основе можно определить изменения жесткости, связанные с образованием трещин, зарождающимися нелинейными деформациями или компонентами упругой и пластической деформации. Благодаря непрерывному увеличению нагрузки и непрерывной регистрации параметров деформации, реакция конструкции может быть оценена одновременно в течение всего процесса нагружения и разгрузки. В частности, разгрузка обеспечивает значительный прирост информации и позволяет оценить компоненты пластической деформации, возникающие на соответствующей стадии нагружения (увеличение площади петель гистерезиса, остаточных деформаций), а также любые зарождающиеся нелинейные структурные изменения [14].

Результаты натурного испытания могут быть перенесены на другие элементы, «если их сходство может быть продемонстрировано во всех существенных деталях». Для того чтобы учесть неопределенности модели и системы при таком переносе, в целевой испытательной нагрузке должны быть учтены дополнительные коэффициенты безопасности.

CIIA

Правила проведения нагрузочных испытаний — неотъемлемая часть нормативных документов в США с первых дней стандартизации в области железобетона

и до сих пор содержатся в ACI 318M–11¹¹. Историческое развитие правил натурных испытаний в США приведено в стандарте ACI 437.1R–07¹². С точки зрения значимости и целей здесь прослеживаются параллели с развитием натурных испытаний в Германии.

В начале XX в. все еще стояла задача обеспечения окончательной проверки структурной безопасности новых конструкций, но впоследствии значимость этой задачи снизилась с ростом точности аналитических методов прогноза несущей способности конструкций и развития вычислительных методов. Тем не менее правила проведения натурных испытаний никогда не исключались из стандарта США, в отличие от стандарта ФРГ.

Сегодня усилия инженеров в США, как и во всех других промышленно развитых странах, чья обширная инфраструктура постепенно стареет, сосредоточены на реконструкции, перестройке и модернизации существующих конструкций зданий и сооружений. В качестве примера, иллюстрирующего указанную тенденцию, можно привести и сложившуюся ситуацию в других промышленно развитых странах. Например, в Бельгии уже в самом ближайшем будущем не останется места для нового строительства, что приведет к необходимости только перестройки или реконструкции уже существующих зданий. В связи с этим натурные испытания вновь приобретают особое значение, поскольку исключительно аналитическая оценка конструктивной безопасности существующего сооружения зачастую невозможна.

Ключевые положения важнейших строительных норм США, а именно главы 20 «Оценка прочности существующих конструкций» стандарта ACI 318, принципиально не изменились с 1971 г., когда проектирование на основе допускаемых напряжений было заменено проектированием на основе предельных состояний.

В стандарте с 1971 г. нагрузка, проверяемая в ходе испытания, составляла 85 % от теоретической расчетной нагрузки:

$$F_{Ziel} = 0,85 \cdot (1,4 \cdot G_k + 1,7 \cdot Q_k). \quad (2)$$

В связи с введением в 2002 г. нормативного документа по железобетону ACI 318–02¹³ из-за стандартизации концепции безопасности для различных методов строительства общие коэффициенты для нагрузок на конструкции были снижены. Однако целевая испытательная нагрузка изначально

не была адаптирована к этой новой концепции. Она по-прежнему рассчитывалась в соответствии с уравнением (2). Это означало, что определение испытательной целевой нагрузки больше не было напрямую связано с расчетным предельным состоянием конструкции, а требуемая испытательная нагрузка теперь составляла 93–98 % от расчетного значения воздействий. По этой причине правила натурных испытаний в комитете ACI 437 пересмотрены в 2007 г., а в документе ACI 437.2–13¹⁴ также введена альтернативная процедура и оценка натурных испытаний существующих конструкций. Коэффициенты были скорректированы таким образом, чтобы целевая испытательная нагрузка вновь соответствовала около 85 % от расчетной нагрузки. Пересмотренные правила ACI 437 включены в ACI 562–13¹⁵ в 2013 г., но еще не были введены в действие строительными органами. Поэтому в настоящее время испытания под нагрузкой должны проводиться в соответствии со стандартом ACI 318–11¹⁶. Более подробно положения обоих упомянутых стандартов представлены далее.

Нормы по железобетону ACI 318–11

Правила планирования, проведения и оценки натурных испытаний в стандарте ACI 318–11 более традиционны. Например, целевая испытательная нагрузка, включая уже действующие нагрузки от собственного веса элемента, не должна быть меньше, чем описано в уравнении:

$$F_{Ziel} \geq \max \begin{cases} 1,15 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_k + 0,4 \cdot (L_{rk}; S_k; R_k); \\ 1,15 \cdot G_k + 0,9 \cdot Q_k + 1,5 \cdot (L_{rk}; S_k; R_k); \\ 1,3 \cdot G_k, \end{cases} \quad (3)$$

где G_k — собственный вес; Q_k — нагрузка от транспорта; L_{rk} — нагрузка от кровли; S_k — снеговая нагрузка; R_k — нагрузка от дождя на кровлю.

Нагрузка должна прикладываться не менее чем в четырех равных интервалах (этапах). Кроме того, измеренные значения прогиба должны быть зарегистрированы для каждой ступени нагрузки. Полную нагрузку предписано оставить на 24 ч и снова измерить деформацию через 24 ч после снятия нагрузки (рис. 3).

Нагрузка обычно прикладывается в виде балластных масс (штучных грузов). Проверка считается выполненной, если конструкция выдержала приложенную нагрузку без признаков разрушения

¹¹ Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M–11). ACI Standard and Commentary, American Concrete Institute Committee 318, 2011.

¹² Load Tests of Concrete Structures: Methods, Magnitude, Protocols and Acceptance Criteria (ACI 437.1R–07). American Concrete Institute Committee 437, 2007.

¹³ Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318–02). ACI Standard and Commentary, ACI Committee 318, 2002.

¹⁴ Code Requirements for Load Testing of Existing Concrete Structures (ACI 437.2–13). ACI Standard and Commentary, ACI Committee 437, 2013.

¹⁵ Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings (ACI 562–13). ACI Standard and Commentary, ACI Committee 562, 2013.

¹⁶ Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M–11). ACI Standard and Commentary, American Concrete Institute Committee 318, 2011.

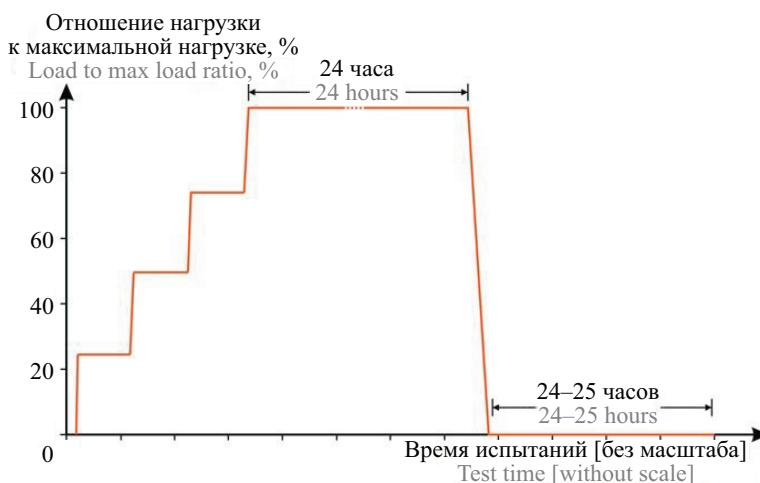


Рис. 3. Режим нагружения при испытании на монотонное нагружение, по ACI 318–11

Fig. 3. Loading mode during the monotonous loading test, according to ACI 318–11

(чрезмерных повреждений, чрезмерного раскрытия трещин, сколов или трещин в бетоне), а прогиб удовлетворяет условиям уравнения (4) или (5):

$$w_1 \leq \frac{l_t^2}{20\,000 \cdot h}; \quad (4)$$

$$w_r \leq \frac{w_1}{4}, \quad (5)$$

где w_1 — максимальный прогиб, измеренный при первом испытании; l_t — пролет; h — толщина элемента; w_r — постоянная деформация после разгрузки.

Если оба условия не соблюдены, испытания можно повторить через 72 ч. Испытания считаются успешно пройденными, если остаточная деформация при втором испытании составляет менее 1/5 от максимального прогиба этого испытания.

Испытания под нагрузкой в соответствии с ACI 437.2–13

Правила ACI 437.2–13 определяют минимальные требования к целевой испытательной нагрузке при испытаниях, режиму нагружения и критериям приемки для экспериментальной оценки несущей способности существующих несущих конструкций. Для проведения натурных испытаний предлагаются два принципиально разных варианта: монотонный и циклический.

Правила, касающиеся монотонных испытаний, в значительной степени соответствуют правилам, приведенным в ACI 318–11, поэтому в данном разделе рассмотрены только циклические испытания.

Если исследуются все рассматриваемые участки конструкции, разрушение происходит по растянутой арматуре, разрушение имеет пластичный характер, или изучаются статически определимые конструкции, то целевая испытательная нагрузка должна быть не меньше, чем в соответствии с уравнением (6). При этом существующие нагрузки от собственного веса $G_{k,1}$ учитываются без допол-

нительных коэффициентов безопасности, а эксплуатационным нагрузкам $G_{k,2}$ присваивается коэффициент безопасности 1,1:

$$F_{Ziel} \geq \max \begin{cases} 1,2 \cdot (G_{k1} + G_{k2}); \\ G_{k1} + 1,1 \cdot G_{k2} + \\ + 1,4 \cdot Q_k + 0,4 \cdot (L_{rk}; S_k; R_k); \\ G_{k1} + 1,1 \cdot G_{k2} + \\ + 0,9 \cdot Q_k + 1,4 \cdot (L_{rk}; S_k; R_k). \end{cases} \quad (6)$$

В случае, если проводится ограниченное количество испытаний, но их результаты должны быть экстраполированы на многие другие аналогичные элементы или анализируются статически неопределимые несущие конструкции, необходимо приложить несколько увеличенные целевые испытательные нагрузки согласно ACI 437.2–13 в соответствии с уравнением (7):

$$F_{Ziel} \geq \max \begin{cases} 1,3 \cdot (G_{k1} + G_{k2}); \\ G_{k1} + 1,1 \cdot G_{k2} + \\ + 1,6 \cdot Q_k + 0,5 \cdot (L_{rk}; S_k; R_k); \\ G_{k1} + 1,1 \cdot G_{k2} + \\ + 1,0 \cdot Q_k + 1,6 \cdot (L_{rk}; S_k; R_k). \end{cases} \quad (7)$$

Согласно стандарту США ACI 437.2–13, нагрузку рекомендуется прикладывать гидравлически, но возможно также использование балластных масс. При использовании балластных масс последовательность нагружения выбирается в соответствии с ACI 437.2–13 (рис. 3). При использовании гидравлического метода нагружения проводится циклическое нагрузочное испытание не менее 3×2 циклов с пятью этапами нагружения и разгрузки до заданной испытательной нагрузки (рис. 4).

Протокол циклического нагружения позволяет в режиме реального времени оценивать такие харак-

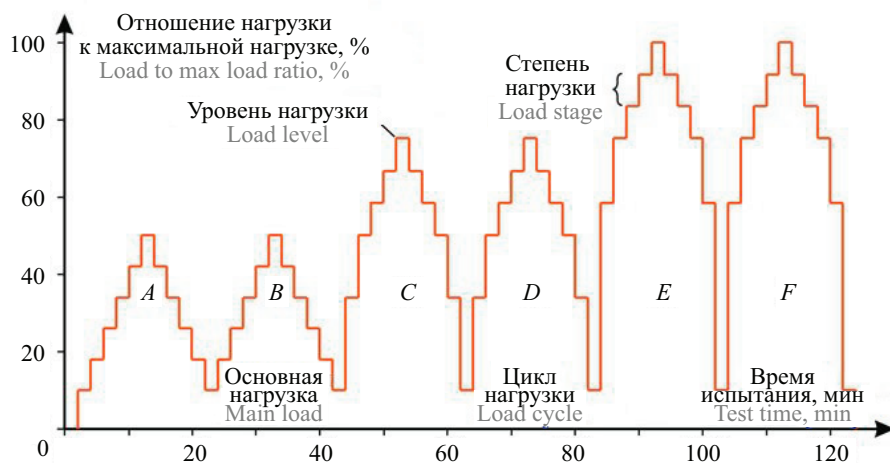


Рис. 4. Режим нагружения при циклическом испытании, согласно ACI 437.2–13

Fig. 4. Loading mode during cyclic testing, according to ACI 437.2–13

теристики элементов, как линейность и постоянство деформаций при различных уровнях нагрузки.

Как правило, измеряется прогиб, при этом оценка осуществляется в классическом виде: максимальный прогиб или остаточный прогиб после разгрузки. Кроме того, уровень несущей способности конструкции оценивается на основе трещин и различных значений отношения нагрузки к прогибу, таким как коэффициент постоянства деформаций и индекс отклонения от линейности.

Оценка несущей способности при эксплуатационной нагрузке выполняется (при необходимости) путем сравнения расчетных и фактически измеренных деформаций, ширины раскрытия трещин и расстояния между трещинами. Однако, поскольку часто наблюдается сильное отклонение фактического состояния от теоретического, в случаях, когда экспериментально определенные значения выходят за нормативные пределы, инженером может быть проведена индивидуальная оценка. Это специальное разрешение на возможную оценку инженером отклонений от теоретических стандартных значений является очень важным для оценки существующих конструкций, потому что такой принцип позволяет проводить оценку в каждом конкретном случае с учетом всех необходимых параметров эксперимента и открывает разумные варианты действий.

Коэффициент постоянства включает сравнение коэффициентов остаточного и максимального прогибов в двух последовательных циклах и описывает развитие деформации в двух последовательных циклах при одинаковом уровне нагрузки, например, в циклах A и B или E и F (в соответствии с рис. 4). Отношение постоянной деформации к максимальной деформации рассчитывается отдельно для каждого цикла согласно уравнению (8), а затем устанавливается коэффициент постоянства в соответствии с уравнением (9). Если значение коэффициента не превышает 0,5, можно считать, что при данном уровне

нагрузки не происходит дальнейших структурных изменений, и испытание считается пройденным:

$$I_{pi} = \frac{w_r^i}{w_{max}^i}; I_{p(i+1)} = \frac{w_r^{(i+1)}}{w_{max}^{(i+1)}}; \quad (8)$$

$$I_{pr} = \frac{I_{p(i+1)}}{I_{pi}}. \quad (9)$$

Нелинейность несущего поведения (отклонение от линейности I_{DL}) определяется отношением приращений кривых «нагрузка – деформация» (рис. 5):

$$I_{DL} = \left(1 - \frac{\tan(\alpha_i)}{\tan(\alpha_{ref})} \right) \cdot 100 \%. \quad (10)$$

Этот параметр измеряет нелинейный отклик и оценивается во всех циклах нагрузки. Как показано в уравнении (10), отклонение от линейности (IDL) рассчитывается как единица минус отношение между секущей линией для графика зависимости нагрузки от прогиба в конкретном цикле $\tan(\alpha_i)$ и наклоном контрольной точки от графика зависимости нагрузки от прогиба (секущая жесткость) $\tan(\alpha_{ref})$. Контрольная точка определяется в первом цикле загрузки. Отклонение от критерия линейности считается выполненным, если показатель не превышает 25 %.

Отклонения от линейности считаются допустимыми, если они не превышают 25 %, что означает снижение жесткости до 75 % от исходной жесткости первого цикла нагружения. Метод, основанный на работах [15, 16], до сих пор использовался только в нескольких натурных исследованиях. Постоянная деформация w_r должна быть измерена через 24 ч после снятия нагрузки и должна удовлетворять уравнению (5). Если критерии приемки не выполняются, то может быть проведено повторное испытание,

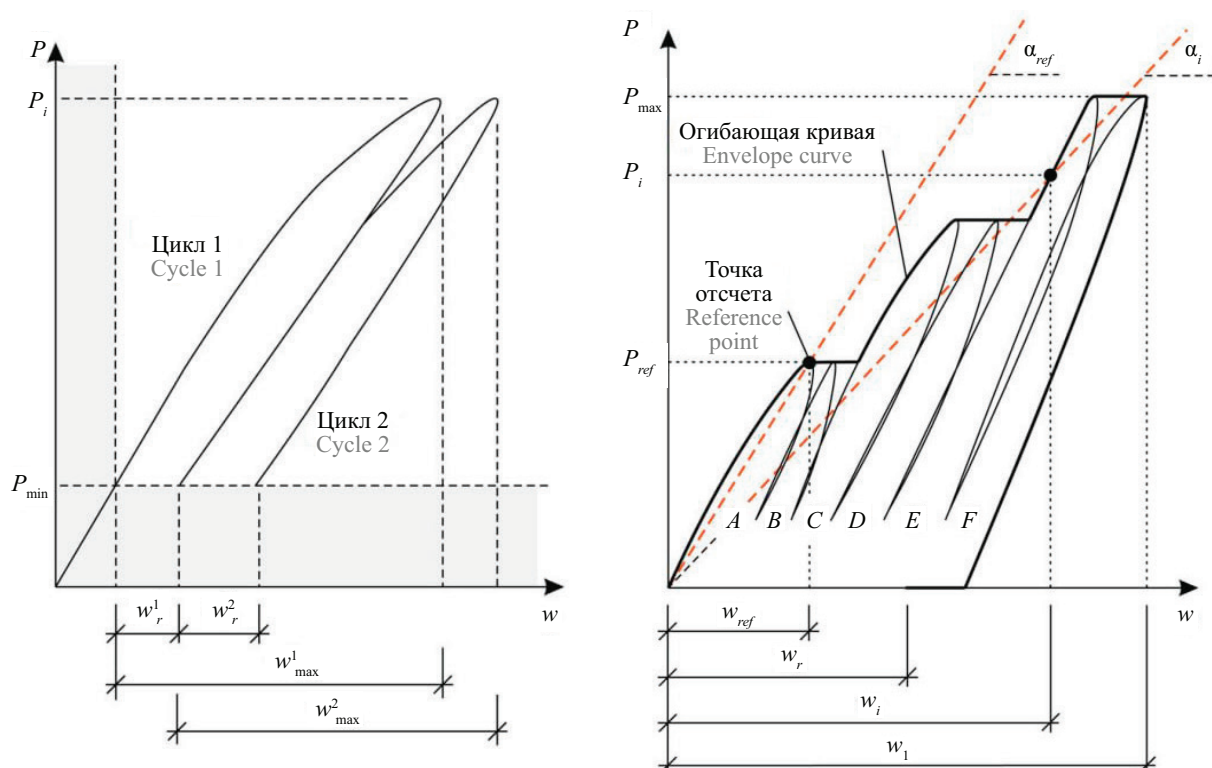


Рис. 5. Критерии оценки для испытания на циклическую нагрузку, согласно ACI 437.2–13

Fig. 5. Evaluation criteria for the cyclic load test, according to ACI 437.2–13

если максимальная деформация w_l удовлетворяет следующему уравнению:

$$w_l \leq \frac{l_t}{180}. \quad (11)$$

Повторное испытание считается пройденным, если остаточная деформация w_{rrt} , которая измеряется повторно через 24 ч после снятия нагрузки, удовлетворяет уравнению (12), где w_{l2} — максимальная деформация, измеренная во время второго испытания:

$$w_{rrt} \leq \frac{w_{l2}}{10}. \quad (12)$$

Уравнения (11) и (12) также применимы к испытанию на монотонную нагрузку с балластными массами в соответствии с ACI 437.2–13.

Великобритания

Стандарт BS 8110–II¹⁷ (до введения Еврокодов) содержал правила проведения экспериментальных испытаний армированных и предварительно напряженных ЖБК. Хотя эти правила в принципе предназначены для испытаний в период строительства или вскоре после него, они также использовались для экспериментальной оценки существующих конструкций [17, 18]. Даже в связи с заменой BS 8110 на Еврокод и отсутствием в нем обязательных требований по натурным испытаниям, рекомендации,

приведенные BS 8110–II, применяются и сегодня. В соответствии с BS 8110–II натурные испытания до расчетной нагрузки и испытания на разрушение должны осуществляться только в исключительных случаях. Цель состоит в том, чтобы продемонстрировать достаточную безопасность конструкций с помощью испытаний на уровне и немного выше эксплуатационной нагрузки, при которых измеренные деформации используются для калибровки теоретической расчетной модели и таким образом обеспечивают ее верификацию. Целевая испытательная нагрузка должна удовлетворять условиям в соответствии с уравнением:

$$G_k + Q_k \leq F_{Ziel} \leq \min \left\{ 1,0 \cdot G_k + 1,25 \cdot Q_k, 1,125 \cdot (G_k + Q_k) \right\}. \quad (13)$$

Испытательную нагрузку следует увеличивать и уменьшать постепенно. Максимальная нагрузка должна быть приложена не менее двух раз, а между испытаниями должно пройти не менее одного часа. Измеренные значения требуется считывать через 5 мин после приложения каждой нагрузки, чтобы измеренные значения успели стабилизироваться. 24-часовое испытание на выносливость при заданном уровне испытательной нагрузки не предусмотрено, но может быть выполнено при необходимости. Оценка измеренных деформаций производится путем сравнения с теоретически рассчитанными расчетными значениями. Если при испытании возникают значительные деформации, упругая остаточная деформация после второго этапа нагружения

¹⁷ British Standard: Structural Use of Concrete, Part 2 — Code of Practice for special circumstances. British Standard Institution, 1989.

должна приблизительно соответствовать упругой остаточной деформации после первого этапа нагружения и составлять не менее 75 % для железобетона и не менее 85 % от общей деформации для предварительно напряженных бетонных конструкций. Прогибы и ширина трещин при эксплуатационных нагрузках также должны соответствовать требованиям стандарта. Если измеренные прогибы остаются меньше $1/1000$ пролета, то нет необходимости оценивать остаточную деформацию.

Ж.Н. Bungey [17] приводит анализ нагрузочных испытаний, проведенных в Великобритании, и рекомендует более высокие целевые испытательные нагрузки, поскольку безопасность, достигаемая при нагрузке, согласно уравнению (13), слишком низка. Например, Институт инженеров-строителей [19] предлагает испытательную целевую нагрузку в соответствии с формулой:

$$1,25 + (G_k + Q_k). \quad (14)$$

А автор другой работы [20] предлагает определять испытательную целевую нагрузку по выражению:

$$1,5 + (G_k + Q_k). \quad (15)$$

Исследователь Ж.В. Menzies [18] также предлагает более высокую испытательную целевую нагрузку (формула (16)), чтобы продемонстрировать достаточный запас прочности по отношению к эксплуатационной нагрузке:

$$1,4...1,5 \cdot (G_k + Q_k). \quad (16)$$

Согласно Ж.Н. Bungey [17], для создания испытательных нагрузок обычно используется балласт, поскольку гидравлические системы считаются слишком дорогими, а необходимые соединительные элементы — слишком сложными.

Оценка результатов испытаний основана на диаграммах «нагрузки – деформации», регистрируемых по нарастающей, из которых можно извлечь различные признаки зарождающегося нелинейного деформационного поведения. Однако конкретные параметры или связанные с ними предельные значения в работе [17] не указаны.

Другие страны

В Канаде испытания строительных конструкций на нагрузку регламентируются главой 20 канадского стандарта¹⁸. Из стандарта исключаются испытания предварительно напряженных конструкций без сцепления арматуры с бетоном, а также исключены конструкции с предполагаемым коррозионным повреждением. Целевая испытательная нагрузка должна соответствовать как минимум 90 % расчетной нагрузки, при переносе результатов одного испытания на другие аналогичные конструкции необходимо доказать, что единовременная сумма всех нагрузок должна составлять 100 % от значения расчетной

нагрузки. Дополнительная информация о переносе результатов испытаний на элементы, не прошедшие испытание, не приводится. Полная нагрузка должна быть приложена на испытываемой конструкции на 24 ч, а после еще 24 ч следует оценить остаточную деформацию. В случае предварительно напряженных элементов прогиб должен уменьшиться не менее чем на 80 %, а для железобетонных без преднапряжения — не менее чем на 60 %. Если эти условия не выполняются, можно провести повторное испытание. Это должно произойти примерно через 72 ч после первого испытания, при этом уменьшение прогиба должно быть не менее 75 %. Необходимо отметить, что в документе не указано, какие критерии должны быть использованы в качестве оценки несущей способности: деформации, трещины или что-то иное.

Австралийский стандарт AS 3600¹⁹ содержит лишь несколько инструкций по проведению натурных испытаний обычных и предварительно напряженных железобетонных элементов. Для испытаний с целью определения предельного состояния существующих конструкций заданная испытательная нагрузка должна соответствовать проектной нагрузке, и ее требуется прикладывать к конструкции в постоянно возрастающем режиме. Во время деформации (прогиба), а также образования трещин следует внимательно наблюдать и, если есть признаки зарождающегося разрушения, испытание стоит отменить. Доказательство достаточной безопасности при нагрузке обеспечивается, если нагрузка была приложена в течение 24 ч, и конструктивный элемент не имеет признаков повреждения или чрезмерного трещинообразования. Испытания для проверки работоспособности проводятся при эксплуатационных нагрузках и оцениваются на основе критериев работоспособности, установленных в указанном стандарте.

В Швейцарии стандарт SIA 269²⁰ разрешает устанавливать несущую способность на существующих несущих конструкциях. Согласно этому стандарту, должно быть доказано, что при определенных нагрузках деформации остаются в пределах упругости и не возникает чрезмерных трещин, вибраций или смещений. Определенные реакции компонентов впоследствии интерпретируются с помощью соответствующей расчетной структурной модели. Утверждения о величине, продолжительности и типе нагрузки или деформаций, подлежащих измерению, не приводятся. Пример применения описан в труде [21], в котором используется гидравлическая генерация нагрузки, испытательная нагрузка увеличивается до 1,8 раз от эксплуатационной нагрузки в несколько этапов, и оценка состояния несущей способности выполняется на основе анализа величин деформации

¹⁹ Concrete Structures. Australian Standard: AS 3600, Standards Australia. 2009.

²⁰ Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken (SIA 269). Schweiz. Ingenieur- und Architektenverein, 2011.

¹⁸ Design of concrete Structures (A23.3–04). Canadian Standards Association, 2004.

под нагрузкой. Как именно прикладывается испытательная нагрузка, в работе [21] не указано.

В Италии стандарт на ЖБК²¹ допускает проведение натурных испытаний для новых элементов здания, но не дается конкретных указаний по их планированию, проведению и оценке [22]. Испытания должны выполняться только инженерами с опытом работы не менее десяти лет. В этом случае они несут полную ответственность за содержание испытаний и интерпретацию их результатов. В документе [22] даются только очень общие рекомендации. Так, согласно исследованию [22], нагрузка для статических испытаний должна увеличиваться небольшими шагами и оставаться постоянной для измерения деформаций. Целевая испытательная нагрузка определяется из эксплуатационных нагрузок в наихудшей комбинации. Деформации должны быть пропорциональны нагрузке, и не должно быть признаков разрушения (трещины, сколы). Постоянная деформация с учетом начальной пластической деформации не должна превышать определенную долю от максимальной деформации. Если это условие не выполняется, допускается приложение новой нагрузки до максимальной. В этом случае конструкция должна демонстрировать практически упругое поведение. Максимальные измеренные деформации не должны превышать расчетные значения [22].

Международная федерация по железобетону (fib) приводит основные инструкции²² по проведению сопроводительных нагрузочных испытаний для проверки расчетных моделей или для проверки достаточной безопасности конструкции. Для проверки работоспособности целевая испытательная нагрузка должна, по крайней мере, соответствовать эксплуатационной нагрузке и не превышать $(0,25 \times G_k + 1,25 \cdot Q_k)$, и оставаться приложенной в течение 24 ч, чтобы деформации могли стабилизироваться. При проведении испытаний для определения безопасности конструкции должно быть доказано, что существует достаточный запас до рабочей нагрузки, при этом минимальное значение запаса не устанавливается. Нагрузку следует увеличивать с шагом от пяти до десяти этапов и контролировать соответствующие деформации. Промежуточная разгрузка не предусмотрена. Если начинают возникать нелинейные деформации, нагрузку следует поддерживать постоянной, чтобы иметь возможность наблюдать за развитием деформаций. В случае прогрессирующих деформаций, необходимо немедленно разгрузить конструкцию и зарегистрировать деформацию.

Нагрузка может создаваться балластными массами, при этом вода считается авторами документа

наиболее подходящим методом нагружения. Использование гидравлических систем нагружения считается дорогостоящим из-за необходимости сложной системы их крепления. Деформации должны быть сопоставлены с ранее установленными предельными значениями, и в результате испытания не должна нарушаться работоспособность испытуемого элемента.

Во время испытания следует исключить значительное увеличение развития трещин и деформаций. Как и в итальянском стандарте, в примечании указывается, что для проведения таких испытаний требуется многолетний опыт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ разных нормативных актов показывает, что подход, используемый в различных национальных стандартах, носит, в основном, традиционный характер. Отличительной особенностью этого подхода является ориентация рекомендаций по применению балластных масс для нагружения испытываемой конструкции. Поскольку невозможно получить непрерывную линию зависимости «нагрузка – деформации» из-за пошагово увеличивающейся экспериментальной нагрузки, уровень оценки результатов испытаний довольно ограничен. Могут применяться только простые критерии оценки, такие как соотношение постоянной и максимальной деформации, но они не могут быть признаны в качестве реальных критериев предельного состояния. Кроме того, использование балласта из-за скрытой опасности обрушения сопряжено с высоким риском повреждений и материального ущерба. По указанным причинам описанный подход считался некоторыми исследователями неудовлетворительным еще 60 лет назад [23] и остается таковым по сей день. Это может быть причиной того, что натурные испытания существующих конструкций с оценкой их несущей способности в странах с традиционными или очень мягкими нормами проектирования применяются довольно редко. По крайней мере, об этом свидетельствует полное отсутствие публикаций с примерами использования таких испытаний в соответствующей специальной литературе.

В то же время известно лишь несколько зарубежных исследований, посвященных дальнейшему развитию метода экспериментальной оценки несущей способности существующих конструкций, например в Германии в 1980-х и 1990-х гг. Некоторые авторы [17] приходят к выводу о том, что испытания под нагрузкой с использованием гидравлических нагружающих технологий являются более сложными и дорогостоящими, но другие исследователи [3, 7] с этим не согласны. По мнению последних, если такая технология нагружения доступна для проведения испытаний, то испытания можно проводить значительно быстрее и безопаснее.

Технология гидравлического нагружения, особенно при нагружении нескольких однотипных эле-

²¹ Norme tecniche per le costruzioni. Decreto del Ministero dei trasporti e delle Infrastrutture, Gazzetta Ufficiale, 2005.

²² Management, maintenance and strengthening of concrete structures. Schriftenreihe der fédération internationale du béton (fib) bulletin 17, Lausanne, 2002.

ментов, по мнению исследователей [3, 7], имеет явные экономические преимущества благодаря быстрой возможности нагружения и разгрузки, а также малой массе, перемещаемой в конструкции. Дополнительным положительным фактором можно считать то, что качество оценки результатов испытаний повышается, так как технология гидравлического нагружения в сочетании с цифровой системой сбора данных может быть использована для получения непрерывно регистрируемых кривых нагрузки и разгрузки, из которых затем могут быть выведены различные расширенные критерии оценки, например, в соответствии с немецким Руководством по нагрузочным испытаниям и АСІ 437.

Однако применение технологии гидравлического нагружения связано со сравнительно высокими первоначальными капиталовложениями, а для ее использования также требуется соответствующим образом обученный персонал. В противном случае, использование гидравлических систем нагружения не имеет смысла, если натурные испытания не внедрены в инженерную практику и используются только в исключительных случаях. Стоит отметить, что в нашей стране гидравлические системы нагружения действительно не внедрены в широкую практику выполнения натурных испытаний на объектах строительства, а применяются в основном штучные грузы (балластные массы).

Еще одной важной характеристикой отдельных стандартов является величина испытательной нагрузки, которая должна быть приложена в случае, если необходимо экспериментально продемонстрировать несущую способность конструкции. Здесь реализуются разные подходы. В некоторых случаях нет выраженной связи между коэффициентами надежности, используемыми в расчете, и нормированием экспериментальной нагрузки. Такие нормативные документы, как BS 8110-II, предполагают, что уровень несущей способности, установленный при сравнительно низких испытательных нагрузках, может быть экстраполирован на расчетное предельное состояние несущей способности (при полном значении расчетной нагрузки). Однако в случае с железобетонными элементами это предположение не надежно обоснованно и может быть принято только в исключительных случаях при наличии необходимой информационной базы для существующих конструкций. Для испытания на несущую способность отдельно исследуемой конструкции

(т.е. без экстраполяции установленного уровня несущей способности) приложенные целевые испытательные нагрузки должны оцениваться как слишком низкие [12].

Утверждения по ключевому для экспериментальных исследований несущей способности существующих конструкций вопросу о возможности экстраполяции результатов испытаний единичного образца на совокупность сходных образцов отсутствуют в большинстве рассмотренных нормативных документов. Исключения — стандарт АСІ 437 и стандарт Канады. Однако в обоих случаях проблема решается с небольшим отличием путем указания общего увеличения нагрузки, а это означает, что изменения, возникающие в конкретном случае, лишь частично отражаются в соответствующих параметрах.

В статье представлен аналитический обзор международного состояния нормирования по методам экспериментальной оценки безопасности существующих ЖБК.

Во многих странах мира отдельный стандарт на проведение натурных испытаний существующих конструкций, входящих в состав несущей системы, либо отсутствует, либо не содержит полные и исчерпывающие требования к выполнению таких испытаний. В Российской Федерации стандарт на осуществление натурных испытаний существующих конструкций отсутствует.

Установлено, что большинство стандартов описывают традиционный подход, основанный на использовании балластных масс (штучных грузов) для формирования нагрузки и определяют упрощенные критерии оценки несущей способности.

Исключениями из этого правила являются руководство ФРГ по натурным испытаниям и нормы США, в которых описаны особенности, учитывающие применение технологии гидравлического нагружения испытываемой конструкции, а также критерии оценки, вытекающие из непрерывных взаимосвязей между нагрузкой и деформацией.

В РФ требуется разработка национального стандарта на проведение натурных испытаний существующих конструкций, входящих в состав несущей системы, в котором должны быть определены требования к выполнению таких испытаний, необходимые методы нагружения, а также критерии оценки несущей способности конструкции на основе экспериментальных результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Bolle G., Schacht G., Marx S. Geschichtliche Entwicklung und aktuelle Praxis der Probebelastung — Teil 1: Geschichtliche Entwicklung im 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts. *Bautechnik*. 2010; 87(11):700-707. DOI: 10.1002/bate.201010047

2. Bolle G., Schacht G., Marx S. Geschichtliche Entwicklung und aktuelle Praxis der Probebelastung — Teil 2: Entwicklung von Normen und heutige Anwendung. *Bautechnik*. 2010; 87(12):784-789. DOI: 10.1002/bate.201010052

3. Marx S., Maas H.-G., Schacht G., Koschitzki R., Bolle G. Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen. *Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben "Zukunft Bau"*. 2011.

4. Schacht G. *Experimentelle Bewertung der Schubtragsicherheit von Stahlbetonbauteilen: Dissertation*. Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, 2014.

5. Marx S., Schacht G., Bolle G. Kapitel 7 – Bewertung der Tragfähigkeit auf Grundlage von Belastungsversuchen. *Fingerloos, F.; Schnell, J.; Marx, S. (Hrsg.): Tragwerksplanung im Bestand, Betonkalender*. 2015.

6. Opitz H., Quade J. 10 Jahre Richtlinie des DAfStb "Belastungsversuche an Betonbauwerken". Erfahrungen und Ausblick. 6 *Symp.Exp. Untersuchung von Baukonstruktionen, TU Dresden, Schriftenreihe Konstr. Ingenieurbau(kid), Heft 24*. 2011; 81-94.

7. Steffens K. *Experimentelle Tragsicherheitsbewertung von Bauwerken: Grundlagen und Anwendungsbeispiele*. Berlin, Ernst & Sohn, 2002.

8. Marx S., Schacht G., Maas H.-G., Liebold F., Bolle G. Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen II. *Abschlussbericht Zukunft Bau*. IRB Verlag Fraunhofer, 2013.

9. Czentner G., Fiedler L., Kappahn G., Steffens K. Deutsches Archäologisches Institut DAI in Rom. *Bautechnik*. 2010; 87(3):127-132. DOI: 10.1002/bate.201010010

10. Gutermann M., Schröder C. 10 Jahre Belastungsfahrzeug BELFA. *Bautechnik*. 2011; 88(3):199-204. DOI: 10.1002/bate.201110020

11. Bretschneider N., Fiedler L., Kappahn G., Slowik V. Technische Möglichkeiten der Probelastung von Massivbrücken. *Bautechnik*. 2012; 89(2):102-110. DOI: 10.1002/bate.201100010

12. Spaethe G. Die Beeinflussung der Sicherheit eines Tragwerks durch Probelastung. *Bauingenieur*. 1994; 69(12):459-468.

13. Manleitner S., Opitz H., Steffens K. Belastungsversuche an Betonbauwerken — Eine neue Richtli-

nie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2001; 96(7):488-494. DOI: 10.1002/best.200100580

14. Bolle G. *Zur Bewertung des Belastungsgrades biegebeanspruchter Stahlbetonbauteile anhand von Last-Verformungs-Informationen: Dissertation*. Bauhaus Universität Weimar, 1999.

15. Mettemeyer M., Serra P., Wuerthele M., Schuster G., Nanni A. Shear Load Testing of Carbon Fiber Reinforced Polymer Strengthened Double Tee Beams in Precast Parking Garage. *SP-188: 4th Intl Symposium — Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*. 1999. DOI: 10.14359/5696

16. Casadei P., Parretti R., Nanni A., Heinze T. In Situ Load Testing of Parking Garage Reinforced Concrete Slabs: Comparison between 24 h and Cyclic Load Testing. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2005; 10(1):40-48. DOI: 10.1061/(asce)1084-0680(2005)10:1(40)

17. Bungey J.H., Millard S.G. *Testing of Concrete in Structures*. 3rd Ed. Blackie Academic, 2006.

18. Menzies J.B. Loading testing of concrete building structures. *Structural Engineer*. 1978; 56(12):347-353.

19. Report of working party on high alumina cement. *Structural Engineer*. 1976; 54(9):352-361.

20. Lee C.R. *Load testing of concrete structures, with particular reference to CP110 and experience in the HAC Investigations*. Build. Research, Dok. B507. 1977.

21. Egger G. Statische Belastungsversuche an Gebäudedecken. *Schweizer Ingenieur und Architekt*. 1998; 116(36):644-647.

22. Casadei P., Deluca A., Serafini R., Agneloni E. Assessment of Concrete Structures through In-Situ Load Testing: An Italian Prospective. *The Second FIB International Congress*. 2006.

23. Röbert S. *Kritische Einschätzung der Probelastungen an Stahlbetonbiegeträgern nach DIN 1045 § 7 unter besonderer Berücksichtigung der Verformungsberechnung : Dissertation*. TU Dresden, 1957.

Поступила в редакцию 24 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 26 июня 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Олег Васильевич Кабанцев** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 659725, Scopus: 15055871000, ResearcherID: T-3937-2017, ORCID: 0000-0001-9907-8470; ovk531@gmail.com;

Андрей Евгеньевич Лапинов — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций, заведующий лабораторией обследования зданий и сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 900733, Scopus: 57204882288, ResearcherID: AFN-5244-2022, ORCID: 0000-0002-7340-0617; la686@yandex.ru.

Вклад авторов:

Кабанцев О.В. — научное редактирование текста, концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы.

Лапинов А.Е. — идея, сбор и обработка материала, перевод зарубежных источников, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Received May 24, 2024.

Adopted in revised form on June 26, 2024.

Approved for publication on June 26, 2024.

BIONOTES: **Oleg V. Kabantsev** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of 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; ID RSCI: 659725, Scopus: 15055871000, ResearcherID: T-3937-2017, ORCID: 0000-0001-9907-8470; ovk531@gmail.com;

Andrey E. Lapshinov — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Head of the Laboratory for Surveying Buildings and Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 900733, Scopus: 57204882288, ResearcherID: AFN-5244-2022, ORCID: 0000-0002-7340-0617; la686@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Oleg V. Kabantsev — scientific editing of the text, conceptualization, supervision, final conclusions.

Andrey E. Lapshinov — idea, data gathering and processing, translation, writing of the article, final conclusions.

The authors declare that they have no conflicts of interest.

Звукопоглощающие свойства пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород

Анатолий Анатольевич Ермаков¹, Артур Ильгизарович Сафин²,
Александр Иванович Родин¹

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва); г. Саранск, Россия;

² Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет); г. Самара, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Звукопоглощающие системы широко применяются при строительстве, реконструкции, ремонте промышленных и гражданских объектов, а также в машиностроении. Наиболее доступными и массово применяемыми являются системы с использованием пористых материалов. Установлено влияние вида, размера, характера пор, а также фазового состава образцов пористой стеклокерамики, полученных из цеолитсодержащих пород, на ее звукопоглощающие свойства.

Материалы и методы. Результаты экспериментальных исследований получены импедансным методом, а также методами рентгенофазового анализа, световой микроскопии, рентгеновской микротомографии и др.

Результаты. Исследованы пористые стеклокерамические материалы маркой по средней плотности D250 и D300, классом по прочности на сжатие В3,5, с коэффициентом теплопроводности от 0,066 до 0,079 Вт/м·°С и рекомендованной максимальной температурой применения до +850 °С. Общая пористость испытанных образцов стеклокерамических материалов составила от 87,7 до 90,1 %, количество открытых пор от 5 до 18,3 %. На значения звукопоглощающих свойств образцов пористой стеклокерамики основное влияние оказывает открытая пористость материала. С увеличением данного показателя с 4,5 до 18,3 % коэффициент звукопоглощения материала увеличился в зависимости от диапазона звуковых частот в 1,5–2 раза.

Выводы. Пористая стеклокерамика, полученная из цеолитсодержащих пород, имеет хорошие физико-механические свойства и высокую температуру применения (не менее +850 °С), а при обеспечении высокого показателя открытой пористости может быть рекомендована для применения в качестве звукопоглощающих материалов в объектах строительного назначения и машиностроении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пористая стеклокерамика, звукопоглощающие свойства, коэффициент звукопоглощения, импедансная труба, рентгенофазовый анализ, рентгеновская микротомография, цеолитсодержащие породы

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-10422).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ермаков А.А., Сафин А.И., Родин А.И. Звукопоглощающие свойства пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1521–1529. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1521-1529

Автор, ответственный за переписку: Александр Иванович Родин, al_rodin@mail.ru.

Sound-absorbing properties of porous glass ceramics from zeolite-containing rocks

Anatoly A. Ermakov¹, Artur I. Safin², Alexander I. Rodin¹

¹ National Research Ogarev Mordovia State University (MRSU); Saransk, Russian Federation;

² Samara National Research University (Samara University); Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Sound-absorbing systems are widely used in construction, reconstruction, repair of industrial and civil facilities, as well as in mechanical engineering. The most affordable and widely used systems are those using porous materials. The influence of the type, size, nature of pores, as well as phase composition of porous glass-ceramic samples obtained from zeolite-containing rocks on its sound-absorbing properties was established.

Materials and methods. The results of experimental studies were obtained by the impedance method, as well as by methods of X-ray phase analysis, light microscopy, X-ray microtomography, etc.

Results. Porous glass-ceramic materials with average density grades D250 and D300, compressive strength class B3.5, thermal conductivity coefficient from 0.066 to 0.079 W/m·°C and recommended maximum application temperature up to +850 °C were investigated. The total porosity of the tested specimens of glass-ceramic materials was from 87.7 to 90.1 %, and the number of open pores from to 18.3 %. The sound-absorbing properties of porous glass-ceramic specimens are

directly dependent on the open porosity of the material. With an increase of this indicator from 4.5 to 18.3 %, the sound absorption coefficient of the material increased 1.5–2 times, depending on the range of sound frequencies.

Conclusions. Porous glass ceramics obtained from zeolite-containing rocks have good physical and mechanical properties and a high application temperature (at least +850 °C), and with a high open porosity index, it can be recommended for application as sound-absorbing materials in construction and mechanical engineering facilities.

KEYWORDS: porous glass ceramics, sound-absorbing properties, sound absorption coefficient, impedance pipe, X-ray phase analysis, X-ray microtomography, zeolite-containing rocks

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 21-79-10422).

FOR CITATION: Ermakov A.A., Safin A.I., Rodin A.I. Sound-absorbing properties of porous glass ceramics from zeolite-containing rocks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1521-1529. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1521-1529 (rus.).

Corresponding author: Alexander I. Rodin, al_rodin@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Звукопоглощающие системы широко применяются в зданиях и сооружениях гражданского и промышленного назначения, а также машиностроении [1–3]. Основной задачей таких материалов является приглушение звука, а также устранение звукового резонанса в закрытых помещениях. По механизму действия все звукопоглощающие системы делят на мембранные, резонансные и пористые. Наиболее доступные и массово применяемые — системы с использованием пористых материалов [4]. По виду пористые звукопоглощающие материалы подразделяют на волокнистые, зернистые и ячеистые [4]. В качестве волокнистых материалов часто используется минеральная вата различного состава [5, 6]. Среди зернистых звукопоглощающих материалов наибольшее распространение получили вспученный перлит, вспученный вермикулит, гранулированное пеностекло и другие [7, 8]. В качестве ячеистых звукопоглощающих материалов часто используют различные газо- и пенобетоны [9], пенопласты [10], пористую керамику [11], пеностекло [12, 13], пористую стеклокерамику и другое [14–16].

Эффективность звукопоглощающих материалов напрямую зависит от вида, размера и характера пор (закрытые или открытые поры, распределение пор по размерам, их форма), физико-механических свойств (плотность, прочность, коэффициент теплопроводности) и многих других факторов [3, 12]. Установлено, что с увеличением количества сквозных пор в материале до определенного предела его звукопоглощающие свойства улучшаются. Увеличив количество сквозных пор сверх данного предела, коэффициент звукопоглощения уменьшается. Это связано с уменьшением вязкого трения воздуха в материале [3]. С увеличением размера пор в материале коэффициент звукопоглощения (КЗП) также уменьшается за счет снижения диссипации акустической энергии по вязкостному механизму. Согласно данным многих литературных источников, наиболее эффективными звукопоглощающими свойствами обладают материалы с полидисперсной пористостью [3, 17].

Во многих предыдущих работах авторами были представлены технологические особенности получения пористых стеклокерамических материалов (ПСК) на основе цеолитсодержащих пород за один нагрев шихты [18, 19]. Материал получен полностью из отечественного сырья. Технология достаточно простая: совместный сухой помол кремнистой породы (опока, трепел, диатомит), кальцинированной соды и корректирующих добавок с последующим обжигом при температуре до +850 °C. В результате получен экологичный, легкий, химически стойкий материал в форме блока, который более чем в 2 раза прочнее газо- и пенобетона при равной плотности. А температура его применения достигает +900 °C.

Известно, что свойства любого материала напрямую зависят от его состава и структуры. Разработанные авторами пористые стеклокерамические материалы отличаются как фазовым составом, так и пористостью. В зависимости от состава используемого сырья, а также от режимов обжига разработана аноктоклазовая, диопсидовая, волластонитовая и волластонито-комбеитовая пористые стеклокерамики с закрытой и открытой до 70 % пористостью. Материалы и изделия из пористой стеклокерамики рекомендованы к использованию в качестве несущих и самонесущих конструкций стен в зданиях, а также в качестве теплоизоляции, в том числе котельного оборудования, труб и т.п. Результаты исследований звукопоглощающих свойств данных материалов в литературе отсутствуют.

Цель исследования — установить влияние структуры образцов пористой стеклокерамики, полученных на основе цеолитсодержащих пород, на ее звукопоглощающие свойства.

Задачи:

- определить пористость (открытую, закрытую, общую) образцов стеклокерамики;
- методом световой микроскопии и рентгеновской микротомографии (микро-КТ) установить особенности микроструктуры образцов;
- методом рентгенофазового анализа (РФА) определить фазовый состав пористой стеклокерамики;

- установить коэффициент звукопоглощения образцов пористой стеклокерамики импедансным методом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения звукопоглощающих свойств пористой стеклокерамики были подготовлены 4 вида образцов из блоков, полученных из шихты различного химического и минералогического состава. Методика их получения подробно представлена в предыдущих работах [18, 19]. На рис. 1 показано фото образцов.

Основные физико-механические и теплофизические характеристики образцов ПСК приведены в таблице.

Согласно данным таблицы, исследованные в работе материалы можно использовать в качестве теплоизоляции, а также несущих и самонесущих конструкций стен при малоэтажном строительстве. Высокая максимальная температура использования (до +850 °С) расширяет область применения материалов в качестве высокотемпературной теплоизоляции. Для подтверждения возможности использования пористой стеклокерамики в качестве звукопоглощающих материалов они были испытаны по указанным далее методикам.

1. Открытую, закрытую и общую пористость стеклокерамики определяли по следующей мето-

дике. На первом этапе из блоков выпиливали кубические образцы с размером грани 50 ± 5 мм. Затем устанавливали истинную плотность (ρ_0 , г/см³), объем (V , см³) и массу (m_0 , г) сухих образцов. Рассчитывали их среднюю плотность (ρ , г/см³). Образцы помещали в емкость с водой плотностью (ρ_w , г/см³) и выдерживали с погружением ниже поверхности воды на 50 мм. Через каждые 12 ч образцы переворачивали. Максимальное время выдерживания определяли по стабилизации массы образцов. После водонасыщения устанавливали массу образцов на воздухе (m_1 , г). В ходе эксперимента испытывали по три образца каждого состава и определяли среднее значение показателя.

Общую пористость (P_t , %) вычисляли по формуле:

$$P_t = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \cdot 100. \tag{1}$$

Открытую пористость (P_o , %) рассчитывали по формуле:

$$P_o = \frac{m_1 - m_0}{V \cdot \rho_w} \cdot 100. \tag{2}$$

Закрытую пористость (P_c , %) вычисляли по формуле:

$$P_c = P_t - P_o. \tag{3}$$



Рис. 1. Фото образцов ПСК (а) и образцов, подготовленных для испытания в импедансной трубе (b)

Fig. 1. Photos of PGC specimens (a) and specimens prepared for testing in an impedance pipe (b)

Характеристики образцов ПСК

Characteristics of PGC specimens

Номер состава Composition Number	Характеристики по ГОСТ 31359–2007 Specifications according to GOST 31359–2007			Характеристики по ГОСТ 5040–2015 Specifications according to GOST 5040–2015
	Марка по средней плотности Brand by average density	Класс по прочности на сжатие Compressive strength class	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/м·°С Coefficient of thermal conductivity in the dry state, W/m·°C	Рекомендованная максимальная температура применения, °С Maximum operating temperature, °C
C1	D300	B3,5	0,079	+850
C2	D250	B3,5	0,069	+800
C3	D250	B3,5	0,069	+850
C4	D250	B3,5	0,066	+800

2. Световую микроскопию образцов проводили на модульном микроскопе Zeiss Axio Scope.A1 (США).

3. Рентгеновскую микротомографию выполняли на образцах размером 10 ± 1 мм с помощью прибора SkyScan 1172 (Бельгия). Режим съемки: излучение – 67 кВ, 110 мкА, угол поворота опорной стойки — 360° , шаг поворота — $0,6^\circ$, разрешение регистрации изображения — 6,9 мкм. Изображения обрабатывали с помощью программного обеспечения CTvox (SkyScan, Бельгия).

4. Рентгенофазовый анализ выполняли на измельченных до фракции менее 80 мкм образцах ПСК с помощью дифрактометра Empyrean PANalytical PIXcel^{3D} (Нидерланды). Режим съемки: излучение — CuK_α , угол поворота $2\theta = 5\text{--}70^\circ$, скорость съемки — $0,0131^\circ/\text{мин}$, время интеграции — 150 с. Определение фазового состава образцов выполнено методом Ханавальта на основании открытой базы данных по кристаллографии.

5. Коэффициент звукопоглощения пористой стеклокерамики определили импедансным методом при установившихся акустических процессах. Исследование выполнено с помощью прибора фирмы Spectronics, модель ACUPRO Version 4 (США) на образцах длиной 46,3 и 91,3 мм. Длина трубы — 900 мм, внутренний диаметр — 35 мм. На первом этапе устанавливали величину сопротивления продуваемости. Затем рассчитывали постоянную распространения волнового процесса в пористом материале и его характеристическое сопротивление.

Подробная методика исследований представлена в публикации [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для установления влияния структуры пористой стеклокерамики на ее звукопоглощающие свойства на первом этапе определена пористость испытываемых образцов. На рис. 2 представлены результаты испытания.

Согласно данным рис. 2, общая пористость испытанных образцов стеклокерамических материалов составила от 87,7 до 90,1 %. В образцах C1 и C2 количество открытых пор не превышает 5 %. Наибольшее количество открытых пор (18,3 %) у стеклокерамических образцов состава C4.

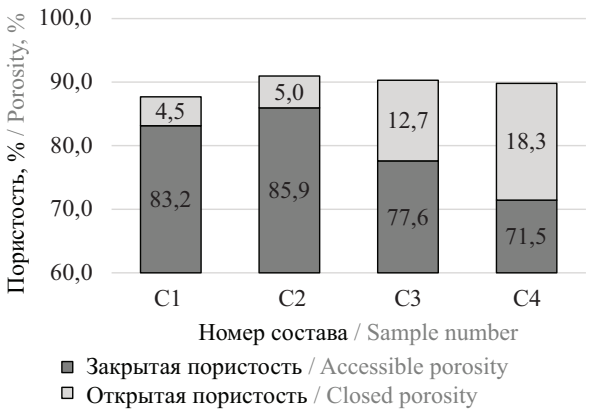


Рис. 2. Пористость образцов

Fig. 2. Porosity of specimens

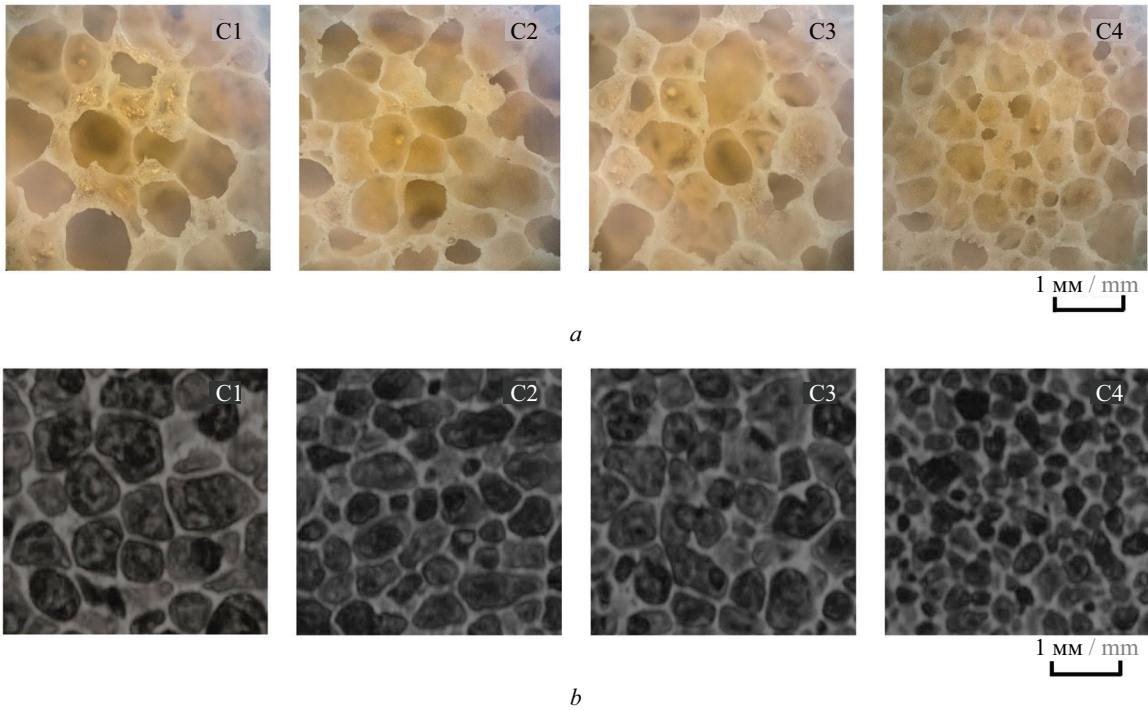


Рис. 3. Световая микроскопия (а) и микро-КТ (b) образцов ПСК

Fig. 3. Light microscopy (a) and micro-CT (b) of PGC samples

Макро- и микроструктура образцов пористой стеклокерамики, полученная методом световой микроскопии и рентгеновской микротомографии, приведена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, большинство пор на поверхности и внутри образца С1 диаметром от 0,5 до 1 мм. Поры в форме шара и сот — замкнутые. Некоторые из них соединены друг с другом. Стенки пор достаточно толстые с характерным стекляннм блеском. Поверхность стенок ровная. Диаметр пор образца С2 варьируется от 0,1 до 1 мм. Форма больших пор вытянутая, мелких в виде шара и сот. Стенки пор тонкие. Некоторые соседние поры также слиты в одну. Поры в образце С3 также имеют разный диаметр и форму. Диаметр пор <1 мм. Все поры в форме шара и сот. Между порами появились сквозные каналы в отдельных местах размером в несколько десятых миллиметра. Большинство пор в образце С4 в виде сот диаметром <0,5 мм. Между ними, как и у образца С3, видны каналы, соединяющие до 10 пор и более. На снимке С4 (рис. 3, б) в стенках пор много светлых точек, что свидетельствует о большом количестве микропор в образце. Полученные в результате анализа данные согласуются с полученными ранее [18, 19].

Результаты РФА образцов пористых стеклокерамических материалов приведены на рис. 4. Рент-

генограммы представлены в диапазоне углов сканирования $2\theta = 10\text{--}40^\circ$.

Согласно полученным данным (рис. 4), все испытываемые образцы пористой стеклокерамики состоят из аморфной и кристаллической фазы. Наличие аморфной фазы характеризуется немонотонным изменением фона на всех рентгенограммах в интервале углов от 15 до 35° (2θ).

Кристаллическая фаза образцов стеклокерамики С1 состоит из кварца и анортклаза. Наличие кварца в стеклокерамических образцах обусловлено его присутствием в цеолитсодержащей породе, из которой они получены. Анортклаз кристаллизуется, как правило, из безкарбонатных пород с повышенным содержанием глинистых минералов [19]. Основной кристаллической фазой в образце С2 является диопсид, что свидетельствует о наличии в составе шихты, из которой он изготовлен, магнийсодержащих минералов [18]. Кристаллическая фаза в образцах С3 и С4 представлена в основном минералами диветритом [21] и волластонитом.

Результаты звукопоглощающих свойств образцов пористой стеклокерамики толщиной 46,3 и 91,3 мм, полученные импедансным методом, практически идентичные. На рис. 5 представлены только результаты испытания образцов толщиной 91,3 мм.

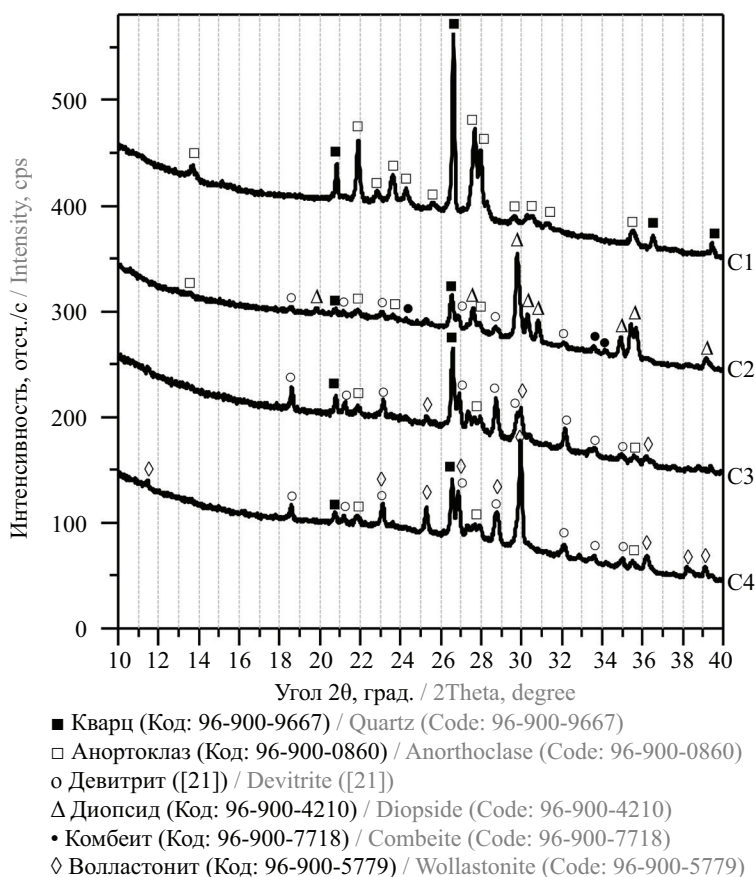


Рис. 4. РФА образцов ПСК

Fig. 4. XRD of PGC specimens

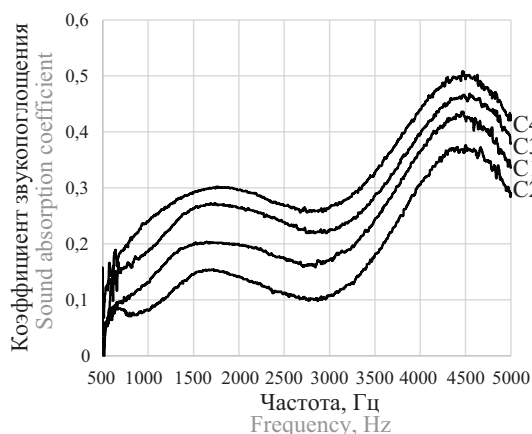


Рис. 5. Звукопоглощающие свойства образцов ПСК

Fig. 5. Sound-absorbing properties of PGC specimens

Согласно полученным данным (рис. 5), на значения звукопоглощающих свойств образцов пористой стеклокерамики основное влияние оказывает открытая пористость материала. С увеличением этого показателя с 4,5 до 18,3 % коэффициент звукопоглощения материала увеличивается в 1,5–2 раза в зависимости от длины звуковых волн. В настоящей работе исследовались образцы ПСК, наиболее отвечающие требованиям строительной отрасли, для которой очень важно, чтобы количество открытых пор в материале было минимальным. Как отмечалось выше, открытая пористость стеклокерамических материалов, полученных на основе цеолитсодержащих пород различного химического состава, может достигать 70 % [18, 19]. Звукопоглощающие свойства таких материалов должны быть гораздо выше. Кроме открытой пористости, размер и форма пор в образцах ПСК также оказывают влияние на КЗП. При практически равном количестве открытых пор в образцах C1 и C2 КЗП выше у материала с более ровной формой пор и их равномерным распределением по объему. Установить влияние фазового состава пористых стеклокерами-

ческих материалов на их звукопоглощающие свойства не удалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено влияние вида и характера пор, а также фазового состава образцов пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород на их звукопоглощающие свойства. Исследованы материалы с марками по средней плотности D250 и D300, классом по прочности на сжатие В3,5, с коэффициентом теплопроводности от 0,066 до 0,079 Вт/м·°С и рекомендованной максимальной температурой применения до +850 °С.

Пористая стеклокерамика, полученная на основе цеолитсодержащих пород, имеет ячеистую (мелкопористую) структуру. Размер пор не превышает 1 мм. Исследуемые образцы имеют разный минералогический состав и состоят из аморфной и кристаллической фазы. Основной кристаллической фазой образцов с минимальным количеством открытых пор (4,5 и 5 %) является анортотоклаз или диопсид. С увеличением в составе образцов количества минерала волластонита количество открытых пор увеличивается.

На значения звукопоглощающих свойств образцов пористой стеклокерамики основное влияние оказывает открытая пористость материала. Размер и форма пор образцов ПСК также влияют на КЗП. Наибольший КЗП (0,5) при частоте 4500 Гц у исследуемых образцов ПСК с количеством открытых пор 18,3 %. Установить влияние фазового состава пористых стеклокерамических материалов на их звукопоглощающие свойства не удалось.

Пористую стеклокерамику рекомендуется использовать не только в строительной отрасли в качестве теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов, но и при обеспечении высокого показателя открытой пористости материала в качестве звукопоглощающих материалов, в том числе в машиностроении.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Герасимов А.И. Звукоизоляционные и звукопоглощающие материалы и их применение в строительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 5. С. 209–215. EDN MTPDKF.
2. Радоуцкий В.Ю., Шульженко В.Н., Степанова М.Н. Современные звукопоглощающие материалы и конструкции // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 76–79. EDN VWZDJJ.
3. Шашкеев К.А., Шульдешиев Е.М., Попков О.В., Краев И.Д., Юрков Г.Ю. Пористые звукопоглощающие материалы : обзор // Труды ВИАМ. 2016. № 6 (42).
- С. 6. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-6-6. EDN WBFNJT.
4. Arenas J.P., Crocker M.J. Recent trends in porous sound-absorbing materials // Sound & Vibration. 2010. Vol. 44. Issue 7. Pp. 12–17.
5. Yang T., Hu L., Xiong X., Petru M., Noman M.T., Mishra R., Militký J. Sound absorption properties of natural fibers : a review // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 20. P. 8477. DOI: 10.3390/su12208477
6. Yang M., Sheng P. Sound absorption structures: from porous media to acoustic metamaterials // Annual Review of Materials Research. 2017. Vol. 47.

Issue 1. Pp. 83–114. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070616-124032

7. Khosrozadeh A., Rasuli R., Hamzeloopak H., Abedini Y. Wettability and sound absorption of graphene oxide doped polymer hydrogel // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-021-95641-z

8. Li T.T., Chuang Y.C., Huang C.H., Lou C.W., Lin J.H. Applying vermiculite and perlite fillers to sound-absorbing/thermal-insulating resilient PU foam composites // Fibers and Polymers. 2015. Vol. 16. Issue 3. Pp. 691–698. DOI: 10.1007/s12221-015-0691-8

9. Fediuk R., Amran M., Vatin N., Vasilev Y., Levsovik V., Ozbakkaloglu T. Acoustic properties of innovative concretes : a review // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 2. P. 398. DOI: 10.3390/ma14020398

10. Li Z., Yang Ch., Yan K., Xia M., Yan Z., Wang D. et al. Rational design of a polypropylene composite foam with open-cell structure via graphite conductive network for sound absorption // Soft Matter. 2024. Vol. 20. Issue 5. Pp. 1089–1099. DOI: 10.1039/d3sm01432k

11. Zhang X., Chen X., Min W., Liang G., Zhang W., Yao Sh. et al. Preparation of multifunctional ceramic foams for sound absorption, waterproofing, and antibacterial applications // RSC Advances. 2024. Vol. 14. Issue 2. Pp. 1009–1017. DOI: 10.1039/D3RA06675D

12. Бессонов И.В., Булгаков Б.И., Александрова О.В., Горбунова Э.А. Исследование эксплуатационных качеств вспененных материалов на основе жидкого стекла холодного отверждения // Нанотехнологии в строительстве : научный интернет-журнал. 2023. Т. 15. № 5. С. 424–437. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-5-424-437. EDN WMFMFZ.

13. Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С. Применение техногенного сырья в процессе синтеза пеностекла с гетерогенной микроструктурой // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 2. С. 258–269. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.258-269. EDN HISRSO.

14. Beregovoi V.A., Sorokin D.S., Beregovoi A.M. Glass-crystalline materials of a cellular structure, formed by vibration foaming technology // Defect and

Diffusion Forum. 2021. Vol. 410. Pp. 823–828. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823

15. Hisham N.A.N., Zaid M.H.M., Aziz S.H.A., Muhammad F.D. Comparison of foam glass-ceramics with different composition derived from ark clamshell (ACS) and soda lime silica (SLS) glass bottles sintered at various temperatures // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 3. P. 570. DOI: 10.3390/ma14030570

16. Ivanov K.S. Associated synthesis of microgranular foam-glass-ceramic from diatomaceous shales // Glass and Ceramics. 2022. Vol. 79. Issue 5–6. Pp. 234–238. DOI: 10.1007/s10717-022-00491-4

17. Liu Sh., Chen W., Zhang Y. Design optimization of porous fibrous material for maximizing absorption of sounds under set frequency bands // Applied Acoustics. 2014. Vol. 76. Pp. 319–328. DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.08.014

18. Rodin A.I., Ermakov A.A., Erofeeva I.V., Erofeev V.T. Structure and properties of porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of $Mg(OH)_2$ // Materials Physics and Mechanics. 2023. Vol. 51. Issue 5. Pp. 127–141. DOI: 10.18149/MPM.5152023_13. EDN CAAATB.

19. Rodin A., Ermakov A., Kyashkin V., Rodina N., Erofeev V. Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from siliceous rocks // Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 5 (121). Pp. 125–135. DOI: 10.34910/MCE.121.9. EDN ERASHS.

20. Кузнецов А.В., Иголкин А.А., Сафин А.И., Пантюшин А.О. Математическая модель акустических характеристик пенополиуретана, применяемого для звукопоглощения в ракетно-космической технике // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20. № 2. С. 53–62. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-53-62. EDN FQVVB.

21. Kahlenberg V., Girtler D., Arroyabe E., Kaindl R., Többsens D.M. Devitrite ($Na_2Ca_3Si_6O_{16}$) — structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses // Mineralogy and Petrology. 2010. Vol. 100. Issue 1–2. Pp. 1–9. DOI: 10.1007/s00710-010-0116-8

Поступила в редакцию 5 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 9 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 27 мая 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Анатолий Анатольевич Ермаков** — аспирант кафедры строительных материалов и технологий; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва** (МГУ им. Н.П. Огарёва); 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; SPIN-код: 8448-7639, Scopus: 57255879600, ResearcherID: AАН-5492-2021, ORCID: 0000-0002-2560-0948; anatology.ermakov97@mail.ru;

Артур Ильгизарович Сафин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок; **Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва** (Самарский университет); 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34; SPIN-код: 3448-5450, Scopus: 55651858200, ResearcherID: R-1785-2017, ORCID: 0000-0003-0936-4364; safin.ai@ssau.ru;

Александр Иванович Родин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им.**

Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарева); 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; SPIN-код: 9920-1797, Scopus: 57191249816, ResearcherID: M-9822-2017, ORCID: 0000-0002-8080-9808; al_rodin@mail.ru.

Вклад авторов:

Ермаков А.А. — концепция исследования, подготовка и исследование образцов на пористость, определение особенностей макроструктуры, написание исходного текста.

Сафин А.И. — определение коэффициента звукопоглощения образцов, научное редактирование текста.

Родин А.И. — научное руководство, развитие методологии, определение фазового состава образцов, обработка материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gerasimov A.I. Sound-insulating and sound-absorbing materials and their application in construction. *Academia. Architecture and Construction*. 2009; 5:209-215. EDN MTPDKF. (rus.).
2. Radoutsky V.Yu., Stepanova M.N., Shulzhenko V.N. Modern sound-absorbing materials and structures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016; 6:76-79. EDN VWZDJJ. (rus.).
3. Shashkeev K.A., Shuldeshev E.M., Popkov O.V., Kraev I.D., Yurkov G.Yu. Porous sound-absorbing materials : review. *Proceedings of VIAM*. 2016; 6(42):6. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-6-6. EDN WBFNJT. (rus.).
4. Arenas J.P., Crocker M.J. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & Vibration*. 2010; 44(7):12-17.
5. Yang T., Hu L., Xiong X., Petru M., Noman M.T., Mishra R., Militky J. Sound absorption properties of natural fibers : a review. *Sustainability*. 2020; 12(20):8477. DOI: 10.3390/su12208477
6. Yang M., Sheng P. Sound absorption structures: from porous media to acoustic metamaterials. *Annual Review of Materials Research*. 2017; 47(1):83-114. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070616-124032
7. Khosrozadeh A., Rasuli R., Hamzeloopak H., Abedini Y. Wettability and sound absorption of graphene oxide doped polymer hydrogel. *Scientific Reports*. 2021; 11(1). DOI: 10.1038/s41598-021-95641-z
8. Li T.T., Chuang Y.C., Huang C.H., Lou C.W., Lin J.H. Applying vermiculite and perlite fillers to sound-absorbing/thermal-insulating resilient PU foam composites. *Fibers and Polymers*. 2015; 16(3):691-698. DOI: 10.1007/s12221-015-0691-8
9. Fediuk R., Amran M., Vatin N., Vasilev Y., Levosovik V., Ozbakkaloglu T. Acoustic properties of innovative concretes : a review. *Materials*. 2021; 14(2):398. DOI: 10.3390/ma14020398
10. Li Z., Yang Ch., Yan K., Xia M., Yan Z., Wang D. et al. Rational design of a polypropylene composite foam with open-cell structure via graphite conductive network for sound absorption. *Soft Matter*. 2024; 20(5):1089-1099. DOI: 10.1039/d3sm01432k
11. Zhang X., Chen X., Min W., Liang G., Zhang W., Yao Sh. et al. Preparation of multifunctional ceramic foams for sound absorption, waterproofing, and antibacterial applications. *RSC Advances*. 2024; 14(2):1009-1017. DOI: 10.1039/D3RA06675D
12. Bessonov I.V., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Gorbunova E.A. Performance evaluation of foamed materials based on cold-cured liquid glass. *Nanotechnologies in Construction : a Scientific Internet-Journal*. 2023; 15(5):424-437. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-5-424-437. EDN WMFMFZ. (rus.).
13. Fedosov S.V., Bakanov M.O., Grushko I.S. Using anthropogenic raw materials in the process of synthesizing foam glass with heterogeneous microstructure. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(2):258-269. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.258-269. EDN HISRSO. (rus.).
14. Beregovoi V.A., Sorokin D.S., Beregovoi A.M. Glass-crystalline materials of a cellular structure, formed by vibration foaming technology. *Defect and Diffusion Forum*. 2021; 410:823-828. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823
15. Hisham N.A.N., Zaid M.H.M., Aziz S.H.A., Muhammad F.D. Comparison of foam glass-ceramics with different composition derived from ark clamshell (ACS) and soda lime silica (SLS) glass bottles sintered at various temperatures. *Materials*. 2021; 14(3):570. DOI: 10.3390/ma14030570
16. Ivanov K.S. Associated synthesis of microgranular foam-glass-ceramic from diatomaceous shales. *Glass and Ceramics*. 2022; 79(5-6):234-238. DOI: 10.1007/s10717-022-00491-4
17. Liu Sh., Chen W., Zhang Y. Design optimization of porous fibrous materials for maximizing absorption of sound under set frequency bands. *Applied Acoustics*. 2014; 76:319-328. DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.08.014
18. Rodin A.I., Ermakov A.A., Erofeeva I.V., Erofeev V.T. Structure and properties of porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of $Mg(OH)_2$. *Materials Physics and Mechanics*. 2023; 51(5):127-141. DOI: 10.18149/MPM.5152023_13. EDN CAAATB.
19. Rodin A., Ermakov A., Kyashkin V., Rodina N., Erofeev V. Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from

siliceous rocks. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 5(121):125-135. DOI: 10.34910/MCE.121.9. EDN ERASHS.

20. Kuznetsov A.V., Igolkin A.A., Safin A.I., Pantyushin A.O. Mathematical model of acoustic characteristics of polyurethane foam used for sound absorption in aerospace engineering. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021; 20(2):53-62.

DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-53-62. EDN FQVVBD. (rus.).

21. Kahlenberg V., Girtler D., Arroyabe E., Kaindl R., Töbrens D.M. Devitrite ($\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}$) — structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses. *Mineralogy and Petrology*. 2010; 100(1-2):1-9. DOI: 10.1007/s00710-010-0116-8

Received April 5, 2024.

Adopted in revised form on April 9, 2024.

Approved for publication on May 27, 2024.

B I O N O T E S: **Anatoly A. Ermakov** — postgraduate student of the Department of Building Materials and Technologies; **National Research Ogarev Mordovia State University (MRSU)**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; SPIN-code: 8448-7639, Scopus: 57255879600, ResearcherID: AAH-5492-2021, ORCID: 0000-0002-2560-0948; anatoly.ermakov97@mail.ru;

Artur I. Safin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automatic Systems of Power Plants; **Samara National Research University (Samara University)**; 34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; SPIN-code: 3448-5450, Scopus: 55651858200, ResearcherID: R-1785-2017, ORCID: 0000-0003-0936-4364; safin.ai@ssau.ru;

Aleksander I. Rodin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials and Technologies; **National Research Ogarev Mordovia State University (MRSU)**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; SPIN-code: 9920-1797, Scopus: 57191249816, ResearcherID: M-9822-2017, ORCID: 0000-0002-8080-9808; al_rodin@mail.ru.

Contribution of the authors:

Anatoly A. Ermakov — the concept of research, preparation and examination of samples for porosity, determination of macrostructure features, writing the source text.

Artur I. Safin — determination of the sound absorption coefficient of samples, scientific text editing.

Aleksander I. Rodin — scientific guidance, development of methodology, determination of the phase composition of samples, material processing.

The authors declare no conflict of interest.

Влияние коэффициента неравномерности расширения образца глинистого грунта на механические характеристики

Армен Завенович Тер-Мартirosян, Георгий Олегович Анжело,

Любовь Юрьевна Ермошина, Илья Алексеевич Боков

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Определение прочностных и деформационных характеристик грунтов, составляющих грунтовый массив, является ключевым в процессе расчета и проектирования сооружений всех типов. Высокая точность при выявлении механических характеристик играет огромную роль на каждом этапе разработки проекта. Установки трехосного сжатия служат одними из самых популярных и широко используемых приборов при проведении лабораторных исследований, поскольку данный вид испытаний позволяет наиболее точно воспроизвести напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтового массива и определить его механические характеристики.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования выполнены на образцах глинистого грунта (супесь, суглинок, глина) в приборе трехосного сжатия в консолидированно-дренированном режиме с целью исследования влияния коэффициента неравномерности расширения образца грунта на его механические свойства.

Результаты. Анализируя данные экспериментальных исследований, было получено, что коэффициент неравномерности расширения образца b оказывает значительное влияние на полученные значения механических характеристик глинистого грунта, а именно: значения угла внутреннего трения в среднем увеличились на 5 %; значения удельного сцепления в среднем увеличились на 4,4 %. Однако следует отметить, что, несмотря на увеличение прочностных характеристик испытанных образцов грунта, исключение из процесса обработки коэффициента b привело к снижению значений секущего модуля деформации при 50%-ной прочности E_{50} в среднем на 4,5 %.

Выводы. Полученные завышенные значения прочностных характеристик ϕ , c и заниженные значения деформационных характеристик E_{50} не являются критичными, но для повышения точности расчетов, выполняемых на основе результатов, получаемых в итоге камеральной обработки протоколов лабораторных испытаний, требуется учитывать коэффициент неравномерности расширения b образца.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лабораторные испытания, трехосное сжатие, глинистый грунт, прочностные характеристики, деформационные характеристики, коэффициент неравномерности расширения образца грунта при трехосном сжатии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян А.З., Анжело Г.О., Ермошина Л.Ю., Боков И.А. Влияние коэффициента неравномерности расширения образца глинистого грунта на механические характеристики // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1530–1540. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1530-1540

Автор, ответственный за переписку: Илья Алексеевич Боков, ilililia@yandex.ru.

Influence of the coefficient of non-uniformity of expansion of clay soil specimen on mechanical characteristics

Armen Z. Ter-Martirosyan, Georgiy O. Anzhelo, Lyubov Yu. Ermoshina, Ilia A. Bokov

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

Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Determination of strength and deformation characteristics of soils composing the soil mass is the key process of calculation and design of structures of all types. High accuracy in determining mechanical characteristics plays a huge role at every stage of project development. Triaxial compression units are one of the most popular and widely used devices for laboratory research, as this type of testing allows you to reproduce the stress-strain state of the soil mass and determine its mechanical characteristics most accurately.

Materials and methods. Experimental studies were performed on clay soil specimens (sandy loam, loam, clay) in a triaxial compression device in a consolidated-drained mode in order to study the effect of the coefficient of non-uniformity of expansion of the soil specimen on its mechanical properties.

Results. Analyzing the data of experimental studies, it was found that the coefficient of non-uniformity of expansion of specimen b has a significant effect on the obtained values of the mechanical characteristics of clay soil, namely: the values

of the angle of internal friction in the medium increased by 5 %; the values of specific adhesion increased by 4.4 % on average. However, it should be noted that despite the increase in the strength characteristics of the tested soil specimens, the exclusion of the coefficient b from the treatment process led to a decrease in the values of the secant deformation modulus at 50 % strength E_{50} by an average of 4.5 %.

Conclusions. The obtained overestimated values of strength characteristics φ , c and underestimated values of deformation characteristics E_{50} are not critical, however, to increase the accuracy of calculations performed based on the results obtained as a result of in-house processing of laboratory test specimens, the coefficient of uneven expansion b of the specimen should be taken into account.

KEYWORDS: laboratory tests, triaxial compression, clay soil, strength characteristics, deformation characteristics, coefficient of non-uniformity of expansion of the soil specimen under triaxial compression

FOR CITATION: Ter-Martirosyan A.Z., Anzhelo G.O., Ermoshina L.Yu., Bokov I.A. Influence of the coefficient of non-uniformity of expansion of clay soil specimen on mechanical characteristics. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1530-1540. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1530-1540 (rus.).

Corresponding author: Ilia A. Bokov, ilililia@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Определение прочностных и деформационных характеристик грунтов, слагающих грунтовый массив, является ключевым в процессе расчета и проектирования сооружений всех типов. Высокая точность при выявлении механических характеристик играет огромную роль на каждом этапе разработки проекта.

В настоящее время на рынке существует множество лабораторного оборудования, которое позволяет устанавливать данные параметры. В частности, для определения прочностных свойств грунтов используются установки одноплоскостного среза, а для деформационных свойств — установки компрессионного сжатия. Также существуют установки трехосного сжатия, которые позволяют определять оба типа характеристик. Использование установок трехосного сжатия дает возможность наиболее точно воспроизвести напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтового массива и установить его механические характеристики. Данный тип испытаний широко применяется в различных сферах, от строительства до аграрного сектора.

Крупномасштабные установки трехосного сжатия позволяют выявить корреляционные зависимости механических характеристик от геометрических размеров образца [1], а также влияние степени окатанности частиц и неоднородности грунтового образца на прочностные и деформационные характеристики [2].

Установки трехосного сжатия стандартного размера используются для испытаний глинистых и песчаных грунтов. В случае с глинистыми грунтами испытания методом трехосного сжатия позволили исследователям установить широкий спектр зависимостей механических характеристик от физических характеристик глинистого грунта (плотность, влажность, текучесть, пластичность, гранулометрический состав) [3–5], а также от глубины залегания образца [6]. В случае с песчаным грунтом зависимость механических характеристик от физических выражалась на основе исследования

следующих показателей: дробимость частиц [7, 8], гранулометрический состав [9], влажность [10, 11].

В соответствии с современными тенденциями строительства в сфере возведения дорожных насыпей и гидротехнических сооружений все чаще становится необходимо определять прочностные характеристики усиленного грунта. Испытания грунта методом трехосного сжатия в ряде работ были выполнены на образцах песчаного грунта, армированного георешеткой [12] и отходами переработки хлопчатобумажных тканей [13]. Также актуальным методом усиления оснований в случае как глинистых, так и песчаных грунтов служит цементация. При этом трехосные испытания проводятся для определения механических характеристик грунтоцементного массива, представляющего собой систему «песок – цемент» [14], «глина – цемент» [15]. В рамках научной деятельности исследователями рассматривалась методика по укреплению глинистого грунта тонкими армирующими волокнами [16]. Для определения механических характеристик глинистых образцов трехосные испытания осуществлялись по консолидированно-дренированной схеме в крупномасштабной установке трехосного сжатия.

Установки трехосного сжатия дают возможность решать уникальные задачи, которые зачастую встают перед учеными. В публикациях [17, 18] исследовано влияние температуры и порового давления в грунтовой образце на его механические характеристики. Для составления экспериментальных зависимостей механических характеристик грунтового образца от порового давления и температуры была проведена серия трехосных испытаний по консолидированно-недренированной схеме.

В гидротехническом строительстве при возведении хвостохранилищ для последующего численного моделирования НДС системы «основание – сооружение» требуется определение механических характеристик отходов, складываемых в хвостохранилищах. Для этого в труде [19] выполнены трехосные испытания с целью установления механических

характеристик хвостов в зависимости от их химического состава.

Исходя из особенностей методик проведения испытаний, в процессе анализа результатов испытаний необходимо вносить поправки на упругие деформации силиконовой оболочки, а также учитывать коэффициент неравномерности расширения грунтового образца. Поправки оказывают влияние на значение вертикальных и горизонтальных напряжений, что в свою очередь будет воздействовать на получаемые прочностные и деформационные характеристики. Учет этих параметров в существующих нормативных документах, таких как ГОСТ 12248.3–2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия», необязателен.

В материалах научных исследований [1–19] в процессе обработки трехосных испытаний коэффициент неравномерности расширения также не получает должного внимания. Поэтому цель данной научной работы — уточнить влияние коэффициента неравномерности расширения грунтового образца в численном (процентном) эквиваленте.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе представлены результаты определения механических характеристик глинистого грунта в соответствии с двумя методами обработки результатов экспериментальных исследований.

Согласно первому методу в процессе обработки лабораторных испытаний был учтен коэффициент неравномерности расширения грунтового образца *b*. Этот метод основывается на рекомендациях Приложения Е ГОСТ 12248.3–2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия».

Второй метод базируется на исключении из процесса обработки результатов лабораторных испытаний коэффициента *b* с последующим получением механических характеристик для каждого инженерно-геологического изыскания (ИГЭ).

Основные параметры испытаний, при которых проведены лабораторные исследования образцов глинистого грунта, представлены в табл. 1.

Для проведения трехосных испытаний применялось сертифицированное и поверенное оборудование производства ООО НПП «Геотек». Об-

Табл. 1. Параметры испытаний

Table 1. Test parameters

Тип грунта Type of soil	Плотность ρ, г/см³ Density ρ, g/cm³	Величина всестороннего обжатия, кПа Value of all-round compression, kPa	Схема испытания Test scheme
ИГЭ-1 — супесь пластичная EGS-1 is a plastic sandy loam	1,81	100	КД CD
		200	
		300	
ИГЭ-2 — глина тяжелая, полутвердая EGS-2 — clay is heavy, semi-hard	1,77	120	
		320	
		520	
ИГЭ-3 — суглинок легкий EGS-3 is a light loam	2,01	130	
		230	
		330	



Рис. 1. Общий вид прибора трехосного сжатия с камерой типа А

Fig. 1. General view of a triaxial compression device with type A camera

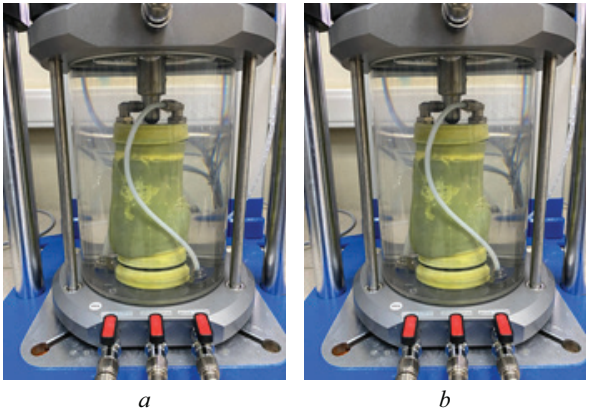


Рис. 2. Общий вид образца глинистого грунта в камере трехосного сжатия: а — до испытания; б — после испытания

Fig. 2. General view of the clay specimen in the triaxial compression chamber: a — before the test; b — after the test

Табл. 2. Результаты испытаний по двум методикам

Table 2. Test results using two methods

ИГЭ EGS	σ_3 , МПа σ_3 , MPa	С учетом коэффициента b Taking into account the b coefficient		Без учета коэффициента b Without taking into account the b coefficient	
		σ_1 , МПа σ_1 , MPa	E_{50} , кПа E_{50} , kPa	σ_1 , МПа σ_1 , MPa	E_{50} , кПа E_{50} , kPa
ИГЭ-1 EGS-1	0,100	0,299	5,73	0,316	5,47
ИГЭ-2 EGS-2	0,320	0,603	15,92	0,630	15,28
ИГЭ-3 EGS-3	0,230	0,445	11,45	0,455	10,94

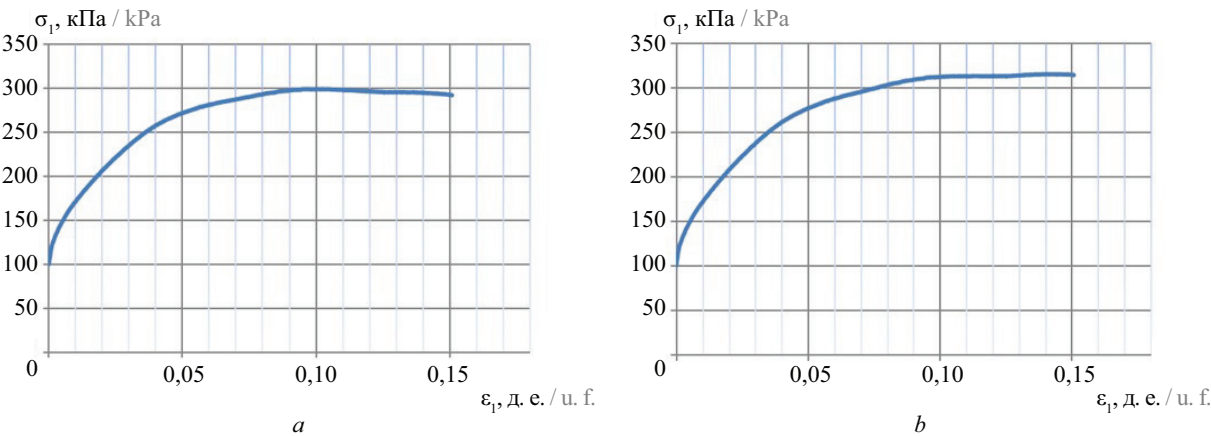


Рис. 3. Графики зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от вертикальных напряжений σ_1 для ИГЭ-1: a — с учетом коэффициента неравномерности расширения b ; b — без учета коэффициента неравномерности расширения b

Fig. 3. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on vertical stresses σ_1 for EGS-1: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

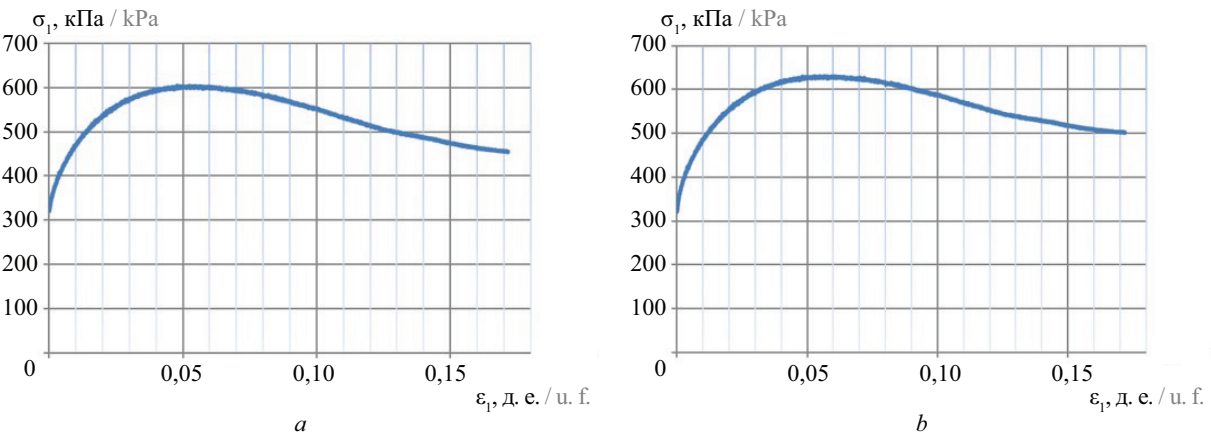


Рис. 4. Графики зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от вертикальных напряжений σ_1 для ИГЭ-2: a — с учетом коэффициента неравномерности расширения b ; b — без учета коэффициента неравномерности расширения b

Fig. 4. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on vertical stresses σ_1 for EGS-2: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

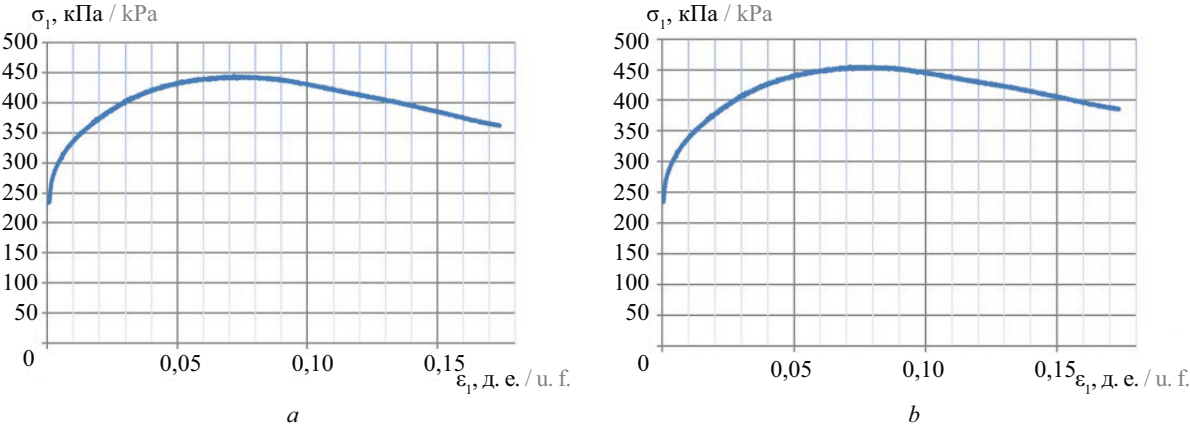


Рис. 5. Графики зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от вертикальных напряжений σ_1 для ИГЭ-3: a — с учетом коэффициента неравномерности расширения b ; b — без учета коэффициента неравномерности расширения b

Fig. 5. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on vertical stresses σ_1 for EGS-3: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

Табл. 3. Результаты испытаний по двум методикам

Table 3. Test results for EGS-1 using two methods

ИГЭ EGS	σ_3 , МПа σ_3 , МПа	С учетом коэффициента b Taking into account the b coefficient			Без учета коэффициента b Without taking into account the b coefficient		
		σ_1 , МПа σ_1 , МПа	φ , град. degree	C , кПа C , kPa	σ_1 , МПа σ_1 , МПа	φ , град. degree	C , кПа C , kPa
ИГЭ-1 EGS-1	0,100	0,299	23,9	13,9	0,316	25,3	14,6
	0,200	0,476			0,504		
	0,300	0,772			0,811		
ИГЭ-2 EGS-2	0,120	0,326	14,8	40,0	0,339	15,8	41,3
	0,320	0,603			0,630		
	0,520	1,000			1,039		
ИГЭ-3 EGS-3	0,130	0,284	15,9	19,3	0,289	16,3	20,1
	0,230	0,444			0,455		
	0,330	0,636			0,645		

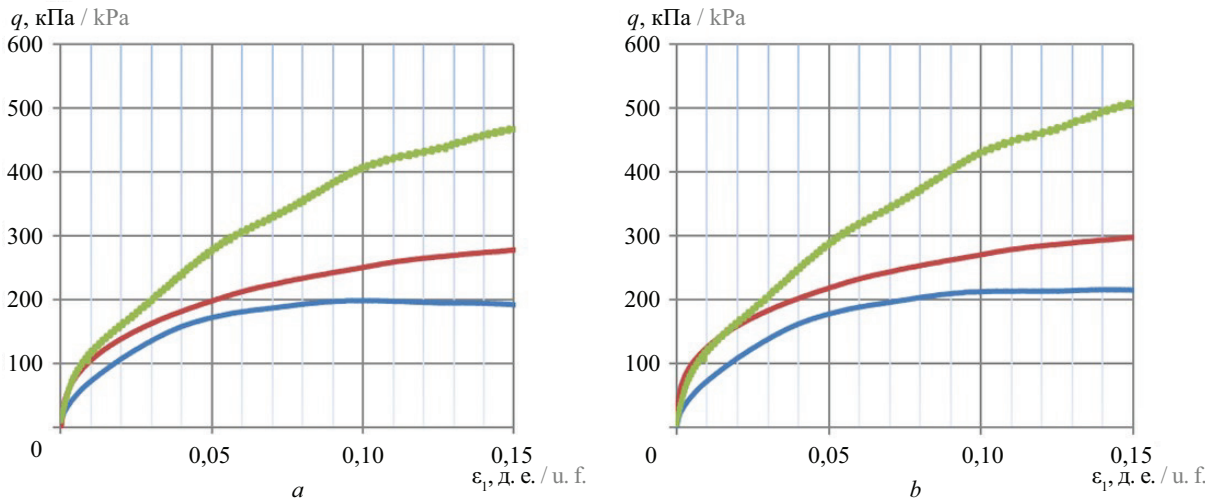


Рис. 6. Графики зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от девиатора напряжений q для ИГЭ-1: a — с учетом коэффициента неравномерности расширения b ; b — без учета коэффициента неравномерности расширения b

Fig. 6. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on the stress deviator q for EGS-1: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

ший вид прибора трехосного сжатия представлен на рис. 1.

Представлены результаты экспериментального исследования песчаного грунта с последующим установлением прочностных (удельное сцепление c , кПа, угол внутреннего трения φ , °) и деформационных (секущий модуль деформации при 50%-ной прочности E_{50} , МПа) характеристик в соответствии с методиками, описанными выше [20].

В ГОСТ 12248.3–2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия» приведена формула для определения коэффициента неравномерности расширения

образца грунта:

$$b = \frac{1 - \frac{A_c}{A_k}}{\frac{\Delta h_k}{h_c}},$$

где A_c — площадь поперечного сечения образца в конце этапа реконсолидации для НН-испытаний и этапа консолидации для КН- и КД-испытаний, см²; A_k — площадь поперечного сечения в средней части образца поле испытания, см²; Δh_k — полная деформация после испытания, см; h_c — высота образца в конце этапа реконсолидации для НН-испытаний и этапа консолидации для КН- и КД-испытаний, см.

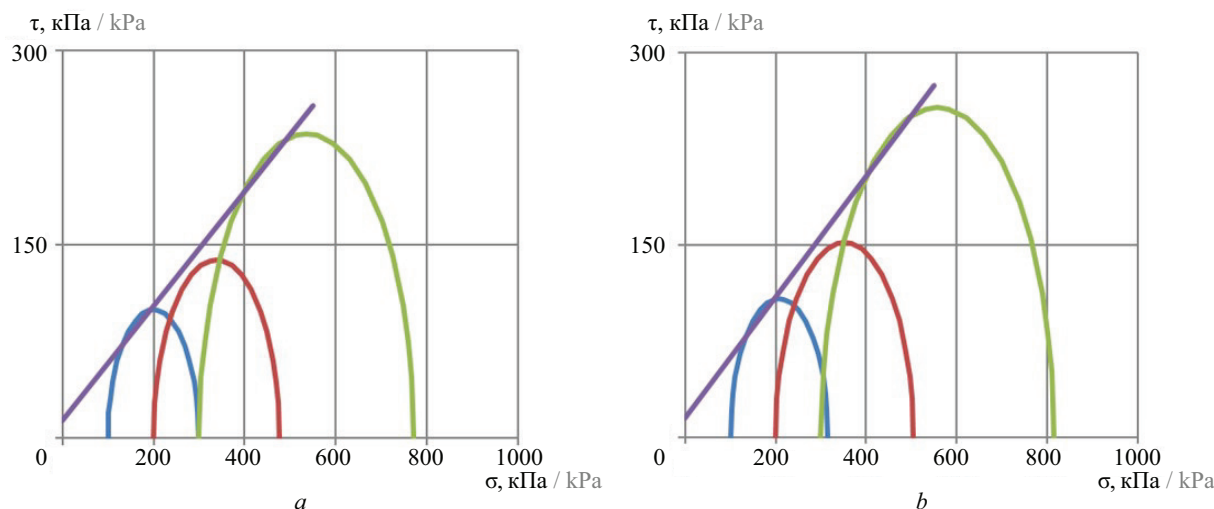


Рис. 7. Диаграмма Кулона – Мора для ИГЭ-1: a — с учетом коэффициента неравномерности расширения b ; b — без учета коэффициента неравномерности расширения b

Fig. 7. Coulomb – Mohr diagram for EGS-1: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

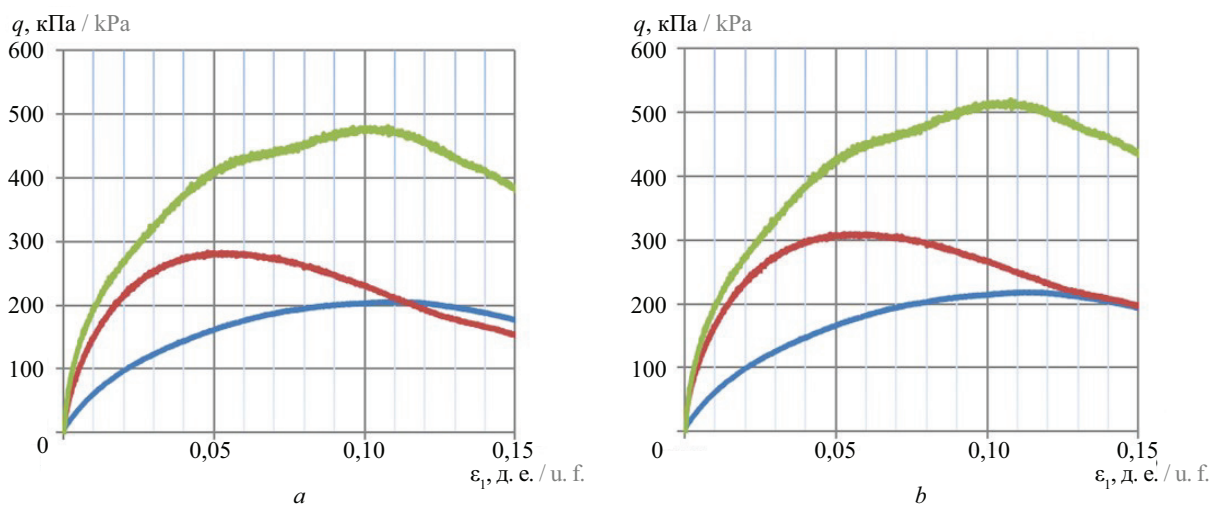


Рис. 8. Графики зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от девиатора напряжений q для ИГЭ-2: a — с учетом коэффициента неравномерности расширения b ; b — без учета коэффициента неравномерности расширения b

Fig. 8. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on the stress deviator q for EGS-2: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

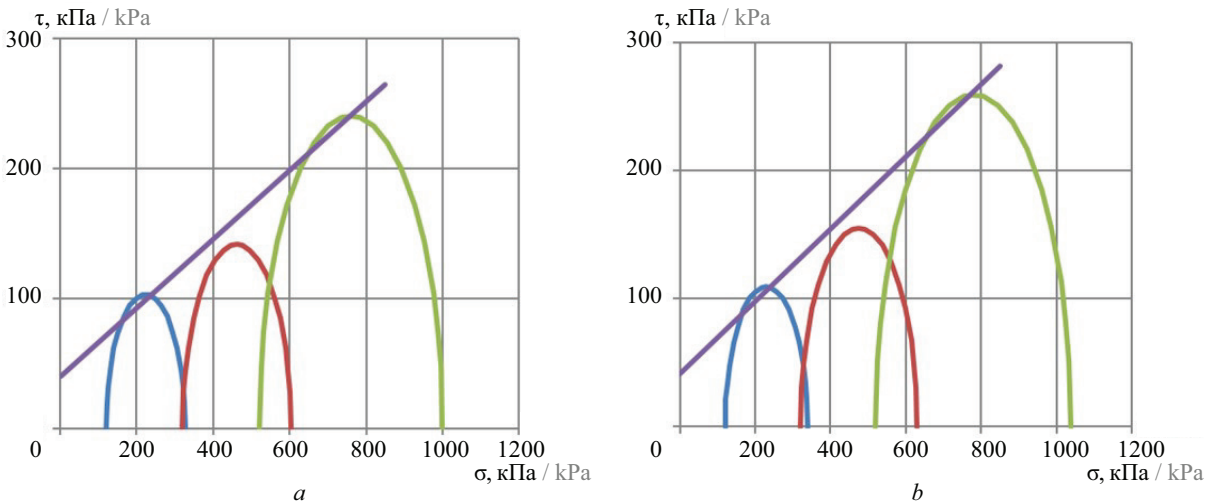


Рис. 9. Диаграмма Кулона – Мора для ИГЭ-2: *a* — с учетом коэффициента неравномерности расширения *b*; *b* — без учета коэффициента неравномерности расширения *b*
Fig. 9. Coulomb – Mohr diagram for EGS-2: *a* — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*; *b* — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*

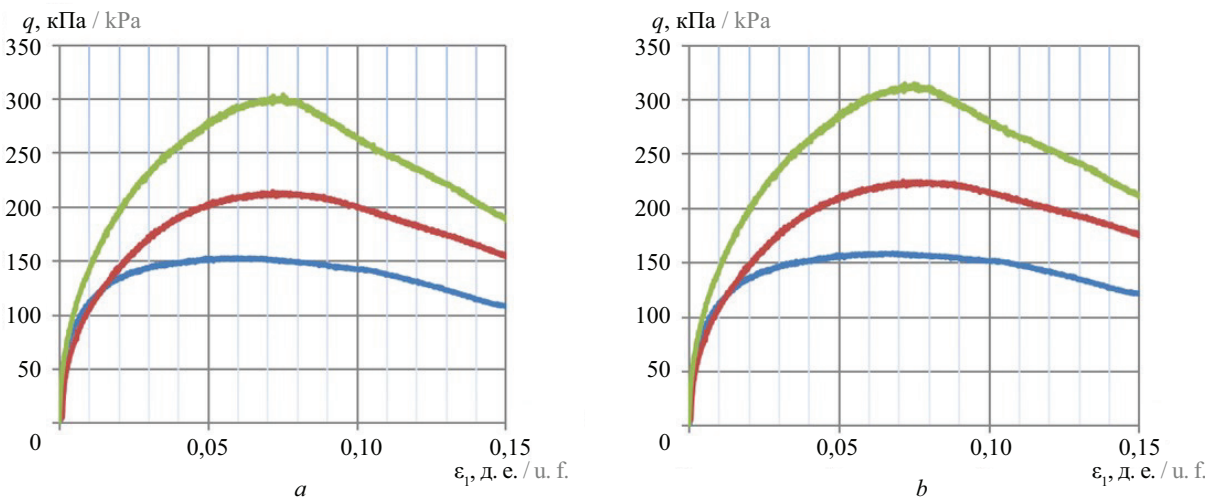


Рис. 10. Графики зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от девиатора напряжений q для ИГЭ-3: *a* — с учетом коэффициента неравномерности расширения *b*; *b* — без учета коэффициента неравномерности расширения *b*
Fig. 10. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on the stress deviator q for EGS-1: *a* — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*; *b* — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*

На рис. 2 изображен образец глинистого грунта до и после испытания в камере трехосного сжатия.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе проведенных трехосных испытаний построены графики зависимости относительных вертикальных деформаций от вертикальных напряжений ($\sigma_1 - \epsilon_1$) (рис. 3–5) с последующим определением прочностных характеристик (рис. 6–11). В табл. 2, 3 представлены результаты обработки трехосных испытаний в соответствии с двумя представленными методиками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя данные экспериментальных исследований, определено, что коэффициент неравномерности расширения образца *b* оказывает значительное влияние на полученные значения механических характеристик глинистого грунта, а именно: значения угла внутреннего трения в среднем увеличились на 5 %; значения удельного сцепления в среднем увеличились на 4,4 %. Однако необходимо отметить, что, несмотря на увеличение прочностных характеристик испытанных образцов грунта, исключение из процесса обработки коэффициента *b* привело к снижению значений секущего модуля дефор-

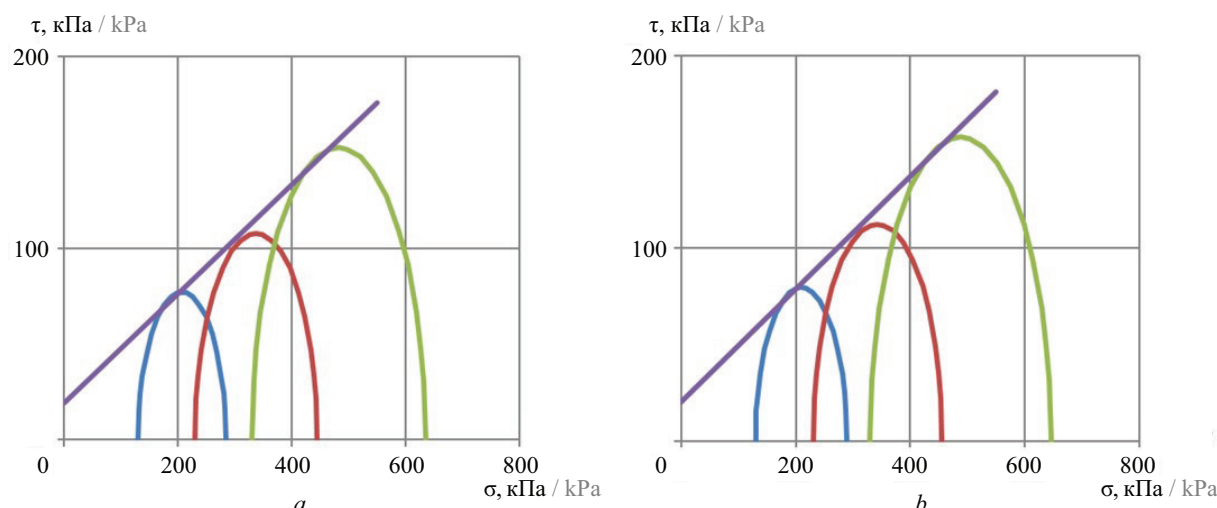


Рис. 11. Диаграмма Кулона – Мора для ИГЭ-3: *a* — с учетом коэффициента неравномерности расширения *b*; *b* — без учета коэффициента неравномерности расширения *b*

Fig. 11. Coulomb – Mohr diagrams for EGS-3: *a* — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*; *b* — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*

мации при 50%-ной прочности E_{50} в среднем на 4,5 %.

Полученные завышенные значения прочностных характеристик φ , c и заниженные значения деформационных характеристик E_{50} не являются критичными, однако для повышения точности расчетов, выполняемых на основе результатов, получаемых в результате камеральной обработки протоколов лабораторных испытаний, следует учитывать коэф-

фициент неравномерности расширения b образца.

В целях дальнейшего исследования корреляционных зависимостей по определению коэффициента b планируется проведение дополнительных экспериментальных исследований на образцах песчаного и глинистого грунта при различной степени влажности, плотности и других физико-механических характеристиках, оказывающих влияние на полученные результаты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мирный А.Ю., Тер-Мартirosян А.З. Определение механических характеристик крупнообломочных грунтов прямыми испытаниями в трехосном приборе // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат. Междунар. науч. конф. 2017. С. 937–941. EDN XSNIQV.
2. Ишмаев О.А., Филимонова Н.В. Результаты трехосных испытаний песков гравелистых в комплексе «АСИС» с диаметром образцов 100 мм // Известия Уральского государственного горного университета. 2022. № 2 (66). С. 89–95. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-2-89-95. EDN XNCBJY.
3. Jiang C., Ding X., Chen X., Fang H., Zhang Y. Laboratory study on geotechnical characteristics of marine coral clay // Journal of Central South University. 2022. Vol. 29. Issue 2. Pp. 572–581. DOI: 10.1007/s11771-022-4900-5
4. Королева И.В., Сагдатова М.Р. Экспериментальные исследования поведения серых глин в условиях трехосного сжатия при разной влажности // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4 (50). С. 228–235. EDN EUGJOR.
5. Hernández-Hernández V.A., Joya-Cárdenas D.R., Equihua-Anguiano L.N., Leal-Vaca J.C., Diosdado-De la Peña J.A., Pérez-Moreno L. et al. Experimental and numerical analysis of triaxial compression test for a clay soil // Chilean Journal of Agricultural Research. 2021. Vol. 81. Issue 3. Pp. 357–367. DOI: 10.4067/S0718-58392021000300357
6. Lan L., Zhang Q., Zhu W., Ye G., Shi Y., Zhu H. Geotechnical characterization of deep Shanghai clays // Engineering Geology. 2022. Vol. 307. P. 106794. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106794
7. Wang G., Wang Z., Ye Q., Zha J. Particle breakage evolution of coral sand using triaxial compression tests // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 13. Issue 2. Pp. 321–334. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.06.010
8. Wils L., Van Impe P.O., Haegeman W. Triaxial compression tests on a crushable sand in dry and wet conditions // Proceedings of the XVI ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. 2015. Pp. 3449–3454.
9. Hazout L., Cherif Taiba A., Mahmoudi Y., Belkhatir M. Deformation characteristics of natural river

sand under compression loading incorporating extreme particle diameters impacts // *Marine Georesources and Geotechnology*. 2022. Vol. 41. Issue 10. Pp. 1156–1174. DOI: 10.1080/1064119X.2022.2122090

10. Nandanwar M.R., Chen Y. Simulations of triaxial compression test for sandy loam soil using PFC3D // Paper presented at the American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2014. 2014. Vol. 6. Pp. 4097–4106.

11. Kozicki J., Tejchman J., Mühlhaus H. Discrete simulations of a triaxial compression test for sand by DEM // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014. Vol. 38. Issue 18. Pp. 1923–1952. DOI: 10.1002/nag.2285

12. Benessalah I., Sadek M., Villard P., Arab A. Undrained triaxial compression tests on three-dimensional reinforced sand: Effect of the geocell height // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2022. Vol. 26. Issue 5. Pp. 1694–1705. DOI: 10.1080/19648189.2020.1728581

13. Pinho-Lopes M. Sand reinforced with recycled cotton textiles from waste blue-jeans: Stress–Strain response // *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2022. Vol. 8. Issue 5. DOI: 10.1007/s40891-022-00404-z

14. Pantazopoulos I.A., Markou I.N., Atmatzidis D.K. Stress-strain-strength and hydraulic performance of microfine cement grouted sands // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022. Vol. 34. Issue 10. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004433

15. Yin Z., Zhang Q., Zhang X., Zhang J., Li X. Shear strength of grouted clay: Comparison of triaxial tests to direct shear tests // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022. Vol. 81. Issue 7. DOI: 10.1007/s10064-022-02739-3

16. Ekinç A., Vaz Ferreira P.M., Rezaeian M. The mechanical behaviour of compacted lambeth-group clays with and without fibre reinforcement // *Geotextiles and Geomembranes*. 2022. Vol. 50. Issue 1. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2021.08.003

17. Sun A., Yang G., Yang Q., Qi M., Wang N., Ren Y. Experimental investigation of thermo-mechanical behaviors of deep-sea clay from the south china sea // *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 119. P. 103015. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103015

18. Yan R., Yan M., Yu H., Yang D. Influence of temperature and pore pressure on geomechanical behavior of methane hydrate-bearing sand // *International Journal of Geomechanics*. 2022. Vol. 22. Issue 11. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002580

19. Zhang C., Pan Z., Yin H., Ma C., Ma L., Li X. Influence of clay mineral content on mechanical properties and microfabric of tailings // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-022-15063-3

20. Тер-Мартirosян А.З., Анжело Г.О., Ермошина Л.Ю., Боков И.А., Манукян А.В. Влияние коэффициента неравномерности расширения грунтового образца на механические характеристики // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 10. С. 1574–1586. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1574-1586

Поступила в редакцию 26 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 7 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 8 июня 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;

Георгий Олегович Анжело — кандидат технических наук, доцент, руководитель Научно-образовательного центра «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна (НОЦ «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна); Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 852458, Scopus: 57201551199, ResearcherID: AAC-4538-2022, ORCID: 0000-0002-0011-7095; posgeo@mail.ru;

Любовь Юрьевна Ермошина — кандидат технических наук, научный сотрудник, Научно-образовательный центр «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна (НОЦ «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна); Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 991280, Scopus: 57205215830, ResearcherID: AGV-6847-2022, ORCID: 0000-0003-1522-320X; lyubov.ermoshina1801@mail.ru;

Илья Алексеевич Боков — студент, лаборант, Научно-образовательный центр «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна (НОЦ «Геотехника» им. З.Г. Тер-Мартirosяна); Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; iliililia@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mirny A.Yu., Ter-Martirosyan A.Z. Determination of the mechanical characteristics of coarse-clastic soils by direct tests in a three-axis device. *Integration, partnership and innovation in construction science and education : collection of materials of international scientific conference*. 2017; 937-941. EDN XSNIQV. (rus.).
2. Ishmaev O.A., Filimonova N.V. Results of three-axis tests of gravel sands in the complex "ASIS pro" with a sample diameter of 100 mm. *News of the Ural State Mining University*. 2022; 2(66):89-95. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-2-89-95. EDN XNCBJY. (rus.).
3. Jiang C., Ding X., Chen X., Fang H., Zhang Y. Laboratory study on geotechnical characteristics of marine coral clay. *Journal of Central South University*. 2022; 29(2):572-581. DOI: 10.1007/s11771-022-4900-5
4. Koroleva I.V., Sagdatova M.R. Experimental studies of gray clay behavior under conditions of triaxial compression at different moisture. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019; 4(50):228-235. EDN EUGJOR.
5. Hernández-Hernández V.A., Joya-Cárdenas D.R., Equihua-Anguiano L.N., Leal-Vaca J.C., Diosdado-De la Peña J.A., Pérez-Moreno L. et al. Experimental and numerical analysis of triaxial compression test for a clay soil. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2021; 81(3):357-367. DOI: 10.4067/S0718583920210003-00357
6. Lan L., Zhang Q., Zhu W., Ye G., Shi Y., Zhu H. Geotechnical characterization of deep Shanghai clays. *Engineering Geology*. 2022; 307:106794. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106794
7. Wang G., Wang Z., Ye Q., Zha J. Particle breakage evolution of coral sand using triaxial compression tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021; 13(2):321-334. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.06.010
8. Wils L., Van Impe P.O., Haegeman W. Triaxial compression tests on a crushable sand in dry and wet conditions. *Proceedings of the XVI ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015; 3449-3454.
9. Hazout L., Cherif Taiba A., Mahmoudi Y., Belkhatir M. Deformation characteristics of natural river sand under compression loading incorporating extreme particle diameters impacts. *Marine Georesources and Geotechnology*. 2022; 41(10):1156-1174. DOI: 10.1080/1064119X.2022.2122090
10. Nandanwar M.R., Chen Y. Simulations of triaxial compression test for sandy loam soil using PFC3D. *Paper presented at the American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2014*. 2014; 6:4097-4106.
11. Kozicki J., Tejchman J., Mühlhaus H. Discrete simulations of a triaxial compression test for sand by DEM. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014; 38(18):1923-1952. DOI: 10.1002/nag.2285
12. Benessalah I., Sadek M., Villard P., Arab A. Undrained triaxial compression tests on three-dimensional reinforced sand: Effect of the geocell height. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2022; 26(5):1694-1705. DOI: 10.1080/19648189.2020.1728581
13. Pinho-Lopes M. Sand reinforced with recycled cotton textiles from waste blue-jeans: Stress–Strain response. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2022; 8(5). DOI: 10.1007/s40891-022-00404-z
14. Pantazopoulos I.A., Markou I.N., Atmatzidis D.K. Stress-strain-strength and hydraulic performance of microfine cement grouted sands. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022; 34(10). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004433
15. Yin Z., Zhang Q., Zhang X., Zhang J., Li X. Shear strength of grouted clay: Comparison of triaxial tests to direct shear tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022; 81(7). DOI: 10.1007/s10064-022-02739-3
16. Ekinici A., Vaz Ferreira P.M., Rezaeian M. The mechanical behaviour of compacted lambeth-group clays with and without fibre reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*. 2022; 50(1):1-19. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2021.08.003
17. Sun A., Yang G., Yang Q., Qi M., Wang N., Ren Y. Experimental investigation of thermo-mechanical behaviors of deep-sea clay from the south China sea. *Applied Ocean Research*. 2022; 119:103015. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103015
18. Yan R., Yan M., Yu H., Yang D. Influence of temperature and pore pressure on geomechanical behavior of methane hydrate-bearing sand. *International Journal of Geomechanics*. 2022; 22(11). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002580
19. Zhang C., Pan Z., Yin H., Ma C., Ma L., Li X. Influence of clay mineral content on mechanical properties and microfabric of tailings. *Scientific Reports*. 2022; 12(1). DOI: 10.1038/s41598-022-15063-3
20. Ter-Martirosyan A.Z., Anzhelo G.O., Ermoshina L.Yu., Bokov I.A., Manukyan A.V. Influence of the coefficient of non-uniform expansion of the soil sample on mechanical characteristics. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(10):1574-1586. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1574-1586 (rus.).

Received March 26, 2024.

Adopted in revised form on June 7, 2024.

Approved for publication on June 8, 2024.

B I O N O T E S: **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;

Georgy O. Angelo — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Scientific and Educational Center “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan (SEC “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 852458, Scopus: 57201551199, ResearcherID: AAC-4538-2022, ORCID: 0000-0002-0011-7095; nocgeo@mail.ru;

Lyubov Yu. Ermoshina — Candidate of Technical Sciences, Researcher, Scientific and Educational Center “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan (SEC “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 991280, Scopus: 57205215830, ResearcherID: AGV-6847-2022, ORCID: 0000-0003-1522-320X; lyubov.ermoshina1801@mail.ru;

Ilia A. Bokov — student, laboratory assistant, Scientific and Educational Center “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan (SEC “Geotechnics” named after Z.G. Ter-Martirosyan); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; iliililia@yandex.ru.

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

Подготовка горячей воды в автономных системах теплоснабжения с несколькими точками водоразбора

Алексей Леонидович Торопов

Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение энергетической эффективности оборудования HVAC вносит наибольший вклад в снижение техногенного воздействия на природную среду. Особенности использования газовых нагревателей для нескольких точек разбора горячей воды связаны с комфортом потребления горячего водоснабжения (ГВС). В это понятие включены два этапа: задержка времени начала подачи горячей воды с момента открытия крана и колебание температуры горячей воды при произвольном одновременном использовании нескольких точек водоразбора. Цель исследования — изучить режимы работы ГВС газовых нагревателей, определить влияние алгоритмов модуляции тепловой мощности и тепловой инерции теплообменников на изменение температуры ГВС при одновременном использовании двух точек водоразбора.

Материалы и методы. Испытания проводились на научно-исследовательском стенде завода «АРДЕРИЯ». Объекты исследования — газовый проточный водонагреватель с модуляцией тепловой мощности Ariston FAST EVO ONT C 14, газовые настенные котлы Arderia D24 и Arderia D24 Atmo.

Результаты. Определены коэффициенты тепловой инерции теплообменников исследуемых образцов, величина изменения температуры в основной точке водоразбора (душ) при периодическом подключении и отключении крана в кухне. Представлено сравнение алгоритмов модуляции тепловой мощности рассматриваемых образцов.

Выводы. Работа автономных систем ГВС с несколькими точками водоразбора приводит к колебаниям температуры воды с диапазоном изменения до 10 °C. Время выравнивания температуры воды составляет до 1,5 мин. Решение вопроса обеспечения заданного комфортного уровня температуры воды достигается организацией расходов потребления ГВС и холодного водоснабжения в соответствии с уровнем приоритета потребления воды различными точками водоразбора, применением буферных тепловых емкостей или тепловых генераторов с большим диапазоном регулирования тепловой мощности и уменьшенной тепловой инерцией теплообменников.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: проточный газовый нагреватель воды, энергетическая эффективность, автономная система теплоснабжения, газовая колонка, газовый клапан, точка водоразбора

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. Подготовка горячей воды в автономных системах теплоснабжения с несколькими точками водоразбора // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1541–1549. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1541-1549

Автор, ответственный за переписку: Алексей Леонидович Торопов, toropov@aprilgroup.ru.

Hot water treatment in autonomous heat supply systems with several water intake points

Alexey L. Toropov

Engineering Center “April”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Improving the energy efficiency of HVAC equipment makes the greatest contribution to reducing the man-made impact on the environment. The peculiarities of using gas heaters for several hot water disassembly points are related to the comfort of hot water consumption. Two points are included in this concept. The delay in the start time of hot water supply from the moment the tap is opened and the fluctuation of hot water temperature when several water intake points are used at random at the same time. The aim of the study is to investigate the operating modes of hot water of gas heaters, to determine the influence of algorithms for modulation of thermal power and thermal inertia of heat exchangers on the change in the temperature of hot water supply with the simultaneous use of two water intake points.

Materials and methods. The study was carried out on the research stand of the “ARDERIA” plant. Objects of research — Gas Instantaneous Water Heater with Thermal Power Modulation Ariston FAST EVO ONT C 14, Arderia D24 and Arderia D24 Atmo wall-mounted gas boilers.

Results. The coefficients of thermal inertia of the heat exchangers of the studied specimens, the value of temperature change at the main point of water intake (shower) during periodic connection and disconnection of the tap in the kitchen were determined. Comparisons of the thermal power modulation algorithms of the specimens under consideration are given.

Conclusions. Operation of autonomous hot water supply systems with several water intake points leads to water temperature fluctuations with a range of up to 10 °C. Water temperature equalization time is up to one and a half minutes. The solu-

tion to the issue of ensuring a given comfortable level of water temperature is achieved by organizing the consumption of hot water and cold water in accordance with the level of priority of water consumption at various water intake points, the use of buffer heat tanks or heat generators with a large range of heat power regulation and reduced thermal inertia of heat exchangers.

KEYWORDS: instantaneous gas water heater, energy efficiency, autonomous heat supply system, gas heater, gas valve, water intake point

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. Hot water treatment in autonomous heat supply systems with several water intake points. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1541-1549. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1541-1549 (rus.).

Corresponding author: Alexey L. Toropov, toropov@aprilgroup.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергетической эффективности оборудования HVAC домохозяйств вносит наибольший вклад в снижение техногенного воздействия на естественную природную среду. Это обусловлено тем, что доля общего потребления энергии на отопление и снабжение горячей водой составляет в России 78 %¹, Европейском Союзе — 79 %^{2, 3}, в США — 60 %⁴. Если рассматривать природный газ как источник энергии для тепловой генерации, то в индивидуальных системах теплоснабжения многоквартирных домов и поквартирном теплоснабжении многоквартирных домов подготовка горячей воды производится с помощью двухконтурных настенных газовых котлов, проточных газовых водонагревателей или бойлеров косвенного нагрева.

В данной статье рассмотрены вопросы нагрева воды с помощью настенных газовых комбинированных котлов и проточных газовых водонагревателей с модуляцией тепловой мощности, имеющих несколько точек водоразбора горячей воды в виде душа, раковины в ванной комнате, раковины на кухне. При снабжении домохозяйства холодной водой с помощью автономной системы водоснабжения необходимо также учитывать одновременное потребление холодной воды точками водоразбора, включая санузлы. Подготовка горячей воды в ал-

горитмах управления работой настенных газовых котлов находится в приоритете перед отоплением. При потреблении горячей воды процесс отопления помещения прекращается. Вся энергия горения направляется на подготовку горячей воды. Стандартная номинальная тепловая мощность настенных котлов в режиме подготовки горячей воды составляет 24 кВт·ч, что позволяет использовать комбинированные настенные газовые котлы для производства горячей воды с расходом около 11 л/мин с разницей температуры 25 °С. С точки зрения потребления горячей воды для одной точки разбора этого достаточно. Современное домохозяйство оснащено минимум двумя точками водоразбора горячей воды: ванная комната и кухня. В ванной комнате, как правило, отдельно установлен душ или ванная и мойка, однако одновременное использование душа и мойки в ванной применяется крайне редко. Все точки разбора воды оснащены смесителями вентильного или однорычажного типа. Расход воды при использовании душа составляет 5–13 л/мин при средней продолжительности разового пользования 5–7 мин. Пользование краном смесителя мойки в кухне происходит со средним расходом 4 л/мин и средней продолжительностью 2,25 мин^{5, 6}.

Из указанного выше следует, что одновременное пользование двумя точками разбора воды в автономной системе теплоснабжения, оснащенной типовыми настенными газовыми котлами или газовыми проточными водонагревателями с номинальной тепловой мощностью 24 кВт·ч, возможно в эконом-режиме с ограниченными расходами или при условии, что температура холодной воды для смешивания с горячим водоснабжением (ГВС) выше 20 °С. Комфортное потребление горячей воды в индивидуальной системе теплоснабжения с одновременным круглогодичным использованием двух и более точек разбора возможно при наличии ге-

¹ Государственный доклад «О состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации» // Министерство экономического развития Российской Федерации. М., 2020. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c3901dba442f8e361d68bc019d7ee83f/Energyefficiency2020.pdf>

² Directorate-General for Energy. Heating and cooling constitute around half of the EU energy consumption. URL: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling_en?redir=1

³ Energy consumption and use by households // Eurostat. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20190620-1>

⁴ Energy balances of OECD countries 2014 // International Energy Agency (IEA). URL: https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/energy_bal_oecd-2014-en

⁵ СНиП 2.04.01–85*. Строительные нормы и правила. Внутренний водопровод и канализация зданий.

⁶ Сколько литров воды в минуту расходует в душе // Строительный портал. URL: <https://stroitelniportal.ru/stati/santehnika/skolko-litrov-vody-v-minutu-rashoduetsya-v-dushe/>

нератора тепловой энергии с номинальной мощностью 28–32 кВт·ч с широким диапазоном модуляции тепловой мощности. В указанных случаях можно обеспечить расход горячей воды до 16–20 л/мин.

В настоящее время основными тепловыми генераторами для производства горячей воды в домохозяйстве площадью до 150 м² являются газовые настенные котлы с атмосферной горелкой с закрытой камерой сгорания топлива и принудительным дымоудалением. Также применяются аналогичные котлы с открытой камерой сгорания и дымоудалением с естественной тягой, газовые проточные водонагреватели с модуляцией тепловой мощности по ГВС как с закрытой, так и с открытой камерой сгорания. Коэффициент энергетической эффективности газовых тепловых генераторов в процессе подготовки горячей воды в системах с открытой камерой сгорания достаточно низок — 80–87 % по отношению к низшей теплотворной способности газа. В системах с закрытой камерой сгорания он выше и может достигать 93 % [1–3]. Повышению эффективности нагрева проточной горячей воды посвящены многие исследования. Нагрев воздуха, поступающего в камеру сгорания при использовании коаксиального дымохода, увеличивает коэффициент энергетической эффективности до 1,5 % [1, 4], снижение температуры дымовых газов на 25 °С повышает эффективность на 1 %⁷ [5]. Уменьшение избытка воздуха на 15 % повышает эффективность на 1 %⁸ [6], увеличение турбулентности газовых каналов теплообменника и каналов движения теплоносителя также увеличивают энергетическую эффективность работы газовых колонок с точки зрения оптимизации розжига описаны в трудах [10, 11]. В публикациях [12–17] рассмотрены особенности и эффективность функционирования газогорелочных устройств.

Особенности использования котлов в режиме ГВС и проточных нагревателей для нескольких точек разбора горячей воды связаны с понятием комфорта потребления ГВС. В это понятие включены два основных момента: задержка во времени начала подачи горячей воды необходимой температуры с момента открытия крана и колебание температуры горячей воды при произвольном одновременном использовании нескольких точек водоразбора в домохозяйстве. Тепловым генераторам указанных

устройств ГВС требуется время на нагрев теплообменников и выход на режим работы газогорелочного блока. Между точками потребления горячей воды и генератором тепла установлены трубы, длина которых составляет несколько метров. Время прохождения указанного расстояния достигает 10–15 с. Кроме указанного интервала времени, также следует учитывать время выхода теплообменника теплового генератора на заданную температуру, которое связано с тепловой инерцией данных устройств. Теплообменники газовых тепловых генераторов имеют массу 1,5–3 кг, выполнены из меди или нержавеющей стали, толщина стенок труб теплообменников 0,8–1 мм [18]. Суммарное время стабилизации температуры в точке потребления горячей воды может достигать 80 с.

Понятие комфортной температуры горячей воды связано с нормальной температурой тела человека 36–37 °С. Комфортная температура для принятия душа равна 38–39 °С, предельная для душа — 43 °С, для крана в мойках душа и кухни — 49 °С [19–21]. При температурах выше 52 °С могут возникнуть ожоги, а при температуре выше 65 °С ожоги возникают мгновенно. Для детей при использовании горячей воды указанные уровни значительно ниже. Относительно колебаний температуры горячей воды в процессе применения автономных систем теплоснабжения критерием комфортности служит изменение температуры в диапазоне ±1,5 °С. Резкое произвольное закрытие или открытие крана второй точки потребления при одновременном использовании первой приводит к скачкам температуры до 10 °С, что может вызвать небольшие ожоги кожи или резкое охлаждение потребляемой воды. Наиболее критичным при применении газовых проточных водонагревателей с несколькими точками разбора горячей воды с позиций комфорта является одновременное использование душа и крана мойки в кухне. При первоначальной температуре воды в душе 40 °С неожиданное изменение температуры до 45 °С воспринимается как «кипяток». Проточные газовые водонагреватели без модуляции тепловой мощности не могут использоваться в системах горячего водоснабжения домохозяйств с несколькими точками водоразбора горячей воды, поскольку регулировка параметров температуры и расхода воды требует ручного управления непосредственно на водонагревателе.

Необходимо также отметить, что в индивидуальных домах с автономной системой теплоснабжения часто применяются системы автономного водоснабжения холодной водой с ограниченным расходом. Наполнение водой смывного бачка в унитазе при одновременном пользовании душем может значительно влиять на распределение потоков холодной воды в домохозяйстве, что приводит к колебаниям температуры горячей воды ГВС. В общем виде величина изменения температуры в душе

⁷ Best Practices Steam Overview. Department of Energy (DOE). URL: <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/achieve-steam-system-excellence-steam-overview>

⁸ Canadian Industry Program for Energy Conservation (CIPEC). Boilers and Heaters, Improving Energy Efficiency; Natural Resources Canada, Office of Energy Efficiency. Canada : Ottawa, ON, 2001. URL: <https://natural-resources.canada.ca/energy/publications/efficiency/industrial/cipec/6687>

при периодическом одновременном использовании других точек разбора воды в домохозяйстве зависит от скорости изменения расхода горячей воды, тепловой инерции теплообменников генераторов тепла, алгоритмов модуляции тепловой мощности, тепловой инерции и чувствительности температурных датчиков, параметров заводских настроек газового клапана, его конструкции и гистерезиса работы исполнительных устройств.

Цель исследования — изучить режимы работы ГВС настенных газовых котлов и проточных газовых нагревателей для автономных систем теплоснабжения при нескольких точках разбора горячего водоснабжения; определить влияние алгоритмов модуляции тепловой мощности газогорелочных устройств и тепловой инерции теплообменников тепловых генераторов на изменение температуры ГВС для условий одновременного использования двух точек водоразбора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на научно-исследовательском стенде завода «АРДЕРИЯ». Объекты исследования — газовые настенные котлы, проточный водонагреватель с модуляцией тепловой мощности:

- образец № 1 — газовый настенный котел Arderia D24, мощность 24 кВт, расход ГВС 14 л/мин, с «сухой» открытой камерой сгорания, естественной тягой дымоудаления;
- образец № 2 — газовый настенный котел Arderia D24, мощность 24 кВт, расход ГВС 14 л/мин, с «сухой» закрытой камерой сгорания, принудительным дымоудалением;
- образец № 3 — газовый проточный водонагреватель Ariston FAST EVO ONT C 14 NG RU, мощность 24 кВт, расход ГВС 14 л/мин, с «мокрой» открытой камерой сгорания, естественной тягой дымоудаления.

Все исследуемые устройства оснащены многофакельными, микрофакельными атмосферными горелками.

Образец № 3 имеет одноканальный оребренный теплообменник со змеевиком из медной трубы и радиатором из листовой меди, образующими «мокрую» камеру сгорания. Образцы № 1, 2 оснащены одноканальным оребренным пластинчатым теплообменником, расположенным в верхней части камеры сгорания. Испытательный стенд снабжен системой потребления горячей воды с двумя точками разбора: душевой лейкой с производительностью до 10–12 л/мин, краном смесителем мойки с производительностью до 4–6 л/мин, при давлении 3,5 бар. Длина трубопровода от проточного водонагревателя до точек разбора 8 м, диаметр 1/2 дюйма. Холодная вода поступает в проточный водонагреватель, в смесители душа и крана мойки от автономной системы водоснабжения с постоянным давлением 3,5 бар и производительностью до 20 л/мин. Датчики темпе-

ратуры и расхода установлены на трубах при входе и выходе в проточный водонагреватель и трубах смесителей душа и мойки. Каждая магистраль оснащена регуляторами расхода воды в виде задвижек и шаровыми кранами рычажного типа для управления потоками воды. Испытания проводились по три раза. Графики представлены для средних значений. Газ природный, магистральный.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Важным техническим параметром, определяющим скорость реакции теплового генератора на команды системы управления и изменение мощности газогорелочного устройства, является тепловая инерция теплообменника газового проточного нагревателя или первичного теплообменника газового котла. На рис. 1 приведены графики перепада температур теплоносителя на выходе из теплообменников при остывании исследуемых устройств без работы газогорелочного устройства, при подаче холодной воды с температурой 20 °С с расходом 11 л/мин.

В общем виде интегральный коэффициент тепловой инерции теплообменника зависит от скорости движения теплоносителя, скорости обдува теплообменника воздухом, материала, массы, формы и размеров теплообменника, температуры воздуха, характеристик тепловой инерции датчиков температуры. Экспериментальный интегральный показатель коэффициента инерции исследуемых теплообменников определяется из графиков остывания теплообменников без процесса горения природного газа. Коэффициент тепловой инерции численно равен времени, в течение которого разность температур между началом остывания и температурой окружающей среды уменьшается в e раз. Определение коэффициентов тепловой инерции теплообменников проводилось по методикам, изложенным в работах [22, 23]. Наименьшее значение коэффициента тепловой инерции при подготовке горячей воды у образца № 2 с принудительным дымоудалением и «сухой» камерой закрытого типа $\tau_2 = 21,64$ с, у аналогичного котла с естественной тягой дымоудаления $\tau_1 = 24,53$ с, что на 13,3 % выше. Наибольшее значение коэффициента тепловой инерции у образца № 3 $\tau_3 = 28,86$ с, на 33,3 % больше, чем у образца № 2. Чем меньше коэффициент тепловой инерции, тем выше скорость реакции устройства к изменению тепловой мощности горелочного устройства. Снижение значений коэффициента тепловой инерции увеличивает способность устройств быстро реагировать на изменение суммарного расхода потребления ГВС, вызванного одновременным использованием нескольких точек разбора горячей воды в домохозяйстве.

На рис. 2 представлены графики изменения температуры горячей воды в смесителе душа при чередовании потребления в двух точках водоразбора и давления газа перед горелкой для образца № 3. Суммарный расход воды 10,5 л/мин. Водоразбо-

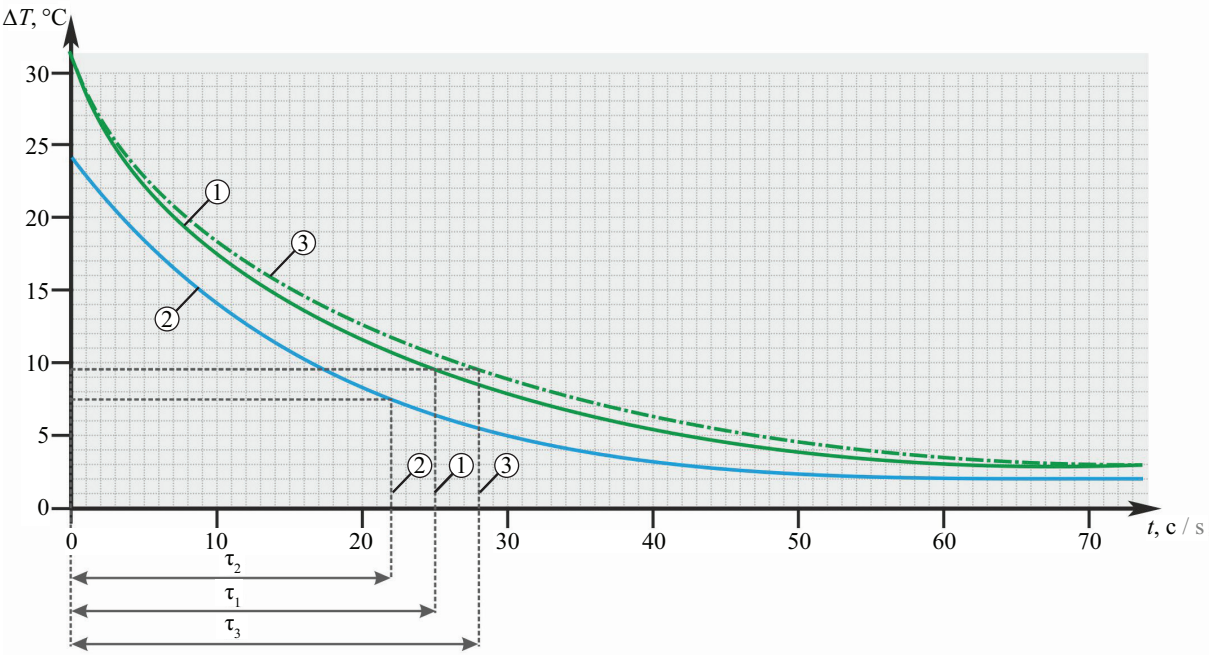


Рис. 1. Графики изменения перепада температуры воды при остывании теплообменников без работы горелки: 1 — образец № 1 с «сухой» открытой камерой и естественной тягой дымоудаления; 2 — образец № 2 с «сухой» закрытой камерой и принудительной тягой дымоудаления; 3 — образец № 3 с «мокрой» открытой камерой и естественной тягой дымоудаления

Fig. 1. Graphs of changes in water temperature drop when the heat exchangers cool down without burner operation: 1 — specimen No. 1 with a “dry” open chamber and natural smoke exhaust draft; 2 — specimen No. 2 with a “dry” closed chamber and forced smoke exhaust draft; 3 — specimen No. 3 with a “wet”, open chamber and natural smoke exhaust draft

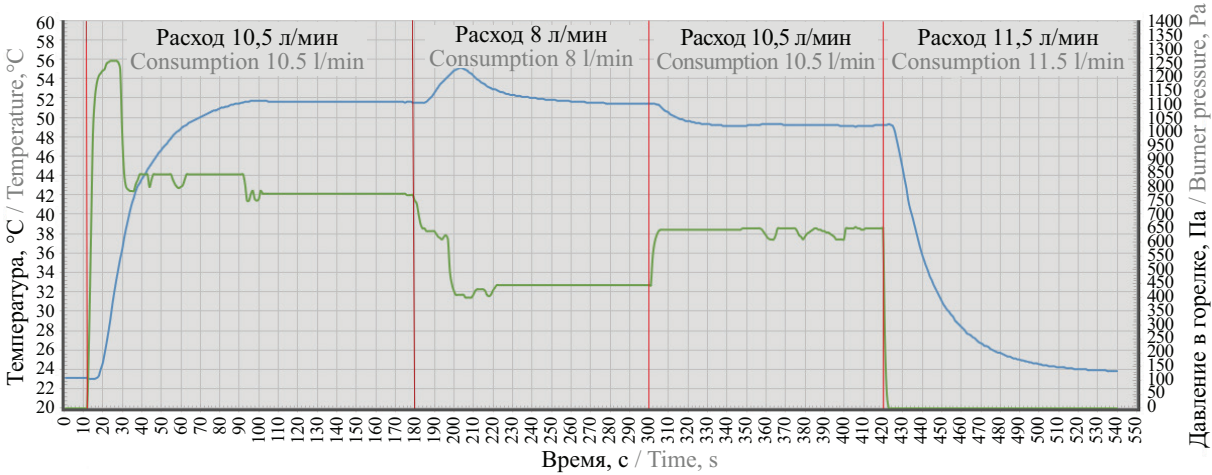


Рис. 2. Графики температуры воды в точке водоразбора и давления газа перед газогорелочным устройством, образец № 3: синий цвет — температура воды в водоразборе № 1 — душ; зеленый цвет — давление газа

Fig. 2. Graphs of water temperature at the point of water intake and gas pressure in front of the gas burner, specimen No. 3: blue colour — water temperature in tap No. 1 — shower; green colour — gas pressure

ры — по 8,0 л/мин для душа и 2,5 л/мин для крана воды в кухне. Целевая температура ГВС — 50 °С, стартовая холодного водоснабжения (ХВС) — 23 °С. Время начала изменения температуры в точке водоразбора, равное 7–8 с, соответствует времени разогрева теплообменника из «холодного» состояния (тепловая инерция теплообменника и датчиков температуры). Рост температуры с 25 до 50 °С происходит за 49 с. Установившаяся температура 51,5 °С.

Из графиков видно, что после закрытия одного из водоразборов с расходом 2,5 л/мин алгоритм управления работой образца № 3 резко снижает давление газа и поддерживает тепловую мощность на новом уровне. Изменение температуры ГВС в водоразборе № 1 происходит до 55 °С в течение 22 секунд с момента закрытия крана в водоразборе № 2. Алгоритм модуляции тепловой мощности водонагревателя восстанавливает установленную целевую

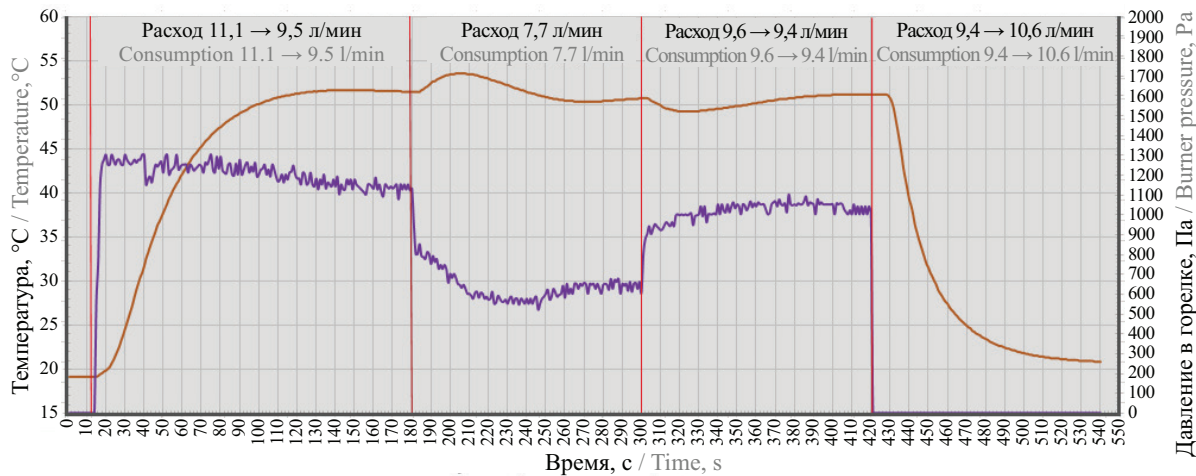


Рис. 3. Графики температуры воды в водоразборе № 1 и давления газа перед газогорелочным устройством, образец № 2: красный цвет — температура воды в водоразборе № 1; синий цвет — давление газа

Fig. 3. Graphs of water temperature in water intake No. 1 and gas pressure in front of the gas burner, specimen No. 2: red colour — water temperature in water supply No. 1; blue colour — gas pressure

температуру за 25 с после достижения максимума температуры, что соответствует 47 с после закрытия водоразбора № 2. При повторном одновременном использовании двух водоразборов температура воды снижается на 2,3 °C относительно установленного значения, время стабилизации температуры в водоразборах равно 25 с. Общий диапазон изменения температуры ГВС в душе при быстром открывании и закрывании водоразбора № 2 с расходом 2,5 л/мин при расходе ГВС в водоразборе № 1 8 л/мин составил 6,1 °C.

На рис. 3 представлены графики изменения температуры воды ГВС и давления газа перед горелкой для образца № 2 при периодическом подключении водоразбора с расходом 2,5 л/мин. Суммарный расход двух водоразборов составил в исследовании 10,5 л/мин.

Из графиков следует, что рост температуры с 25 до 50 °C происходит за 69 с. Установившаяся температура 51,5 °C.

Изменение температуры воды в водоразборе № 1 при отключении водоразбора № 2 привело к повышению температуры до 53,3 °C, время роста температуры составило 22 с. Суммарное время восстановления температуры до первоначального значения составило 50 с. При повторном включении водоразбора № 2 и потреблении воды двумя точками водоразбора произошло снижение температуры до 49 °C за период времени 20 с. Суммарное изменение температуры в точке водоразбора № 1 при периодическом включении и отключении водоразбора № 2 составило 4,3 °C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы подготовки ГВС автономных систем теплоснабжения с использованием настенных газовых двухконтурных котлов или проточных газовых

нагревателей при наличии нескольких точек водоразбора в домохозяйствах с точки зрения понятия комфорта потребления ГВС имеют ряд недостатков:

- при одновременном использовании нескольких точек водоразбора (душ, мойка в кухне, наполнение воды в унитазах санузлов) возникают колебания температуры воды в ГВС. Величина колебаний температуры может составлять до 10 °C и зависит от величины соотношения расходов и температур воды в точках потребления ГВС;
- время стабилизации температуры относительно установленных потребителем значений может составлять до 60 с;
- при нескольких точках водоразбора установление температуры воды в конкретной точке происходит путем подмеса холодной воды автономной системы холодного водоснабжения и горячей воды с расходом, ограниченным номинальной мощностью тепловой установки. Случайный характер потребления объема и температуры воды в точках водоразбора, наличие тепловой инерции исполнительных устройств ГВС приводят к вероятным значительным колебаниям температуры воды.

Для повышения комфортности потребления ГВС при проектировании систем автономного водоснабжения домохозяйств целесообразно ввести приоритеты потребления ГВС и ХВС. Приоритетный уровень — обязательное обеспечение полноценного использования душа как с точки зрения стабильности температуры, так и расхода воды. Этот уровень должен обеспечиваться при одновременном использовании остальных точек разбора горячей и холодной воды при их работе в минимальных технологических режимах. Если домохозяйство имеет автономное водоснабжение холодной водой с ограниченным расходом, то на второстепенные точки водоразбора должны быть наложены ограничения. К примеру, скорость заполнения смывного бачка

унитаза может быть снижена. Данное изменение стабилизирует температуру воды в душе при одновременном пользовании туалетом другими обитателями домохозяйства.

Целесообразно ограничить расход крана в мойке кухни величиной 4 л/мин. При исходной температуре ГВС 50–55 °С и подмесе холодной воды через смеситель потребление горячей воды снижается до 1–2,5 л/мин, что не вызовет значительных колебаний горячей воды в точках водоразбора высшего уровня.

Указанные действия обеспечивают высокий уровень комфорта потребления автономных систем ГВС, но вызывают вопросы применения конкретных типов генерации тепловой энергии при малых тепловых нагрузках, когда используется только одна точка водоразбора низшего уровня. Это обусловлено тем, что тепловые газовые генераторы конвекционного типа имеют низкий диапазон модуляции тепловой мощности и нижний предел тепловой генерации около 8 кВт·ч, что при исходной температуре холодной воды 20 °С вызывает необходимость обеспечения минимального расхода горячей воды через точку разбора более 3,5 л/мин. При использовании природного газа как источника энергии данные вопросы решаются применением тепловых генераторов с конденсационными теплообменни-

ками, имеющими большой диапазон модуляции тепловой мощности, или включением в схему работы автономной ГВС теплового демпфера в виде проточной теплоизолированной емкости объемом несколько литров. В последние годы стали применяться также газовые водонагреватели и настенные котлы конвекционного типа, оснащенные двух- или трехступенчатыми атмосферными газовыми горелками.

Работа автономных систем ГВС с несколькими точками водоразбора домохозяйств при использовании проточных газовых водонагревателей и настенных двухконтурных газовых котлов приводит к колебаниям температуры воды в точках водоразбора с диапазоном изменения температуры до 10 °С. Время выравнивания температуры воды относительно установленного пользователем уровня температуры составляет до 60 с.

Решение вопроса обеспечения заданного комфортного уровня температуры воды в точке водоразбора домохозяйства достигается организацией расходов потребления ГВС и ХВС в соответствии с уровнем приоритета потребления воды различными точкам водоразбора и применением буферных тепловых емкостей или тепловых генераторов с большим диапазоном регулирования тепловой мощности и уменьшенной тепловой инерцией теплообменников.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Czerski G., Strugala A.* The energy efficiency of hot water production by gas water heaters with a combustion chamber sealed with respect to the room // *Water*. 2014. Vol. 6. Issue 8. Pp. 2394–2411. DOI: 10.3390/w6082394
2. *Czerski G., Gebhardt Z., Strugala A., Butrymowicz C.* Gas-fired instantaneous water heaters with combustion chamber sealed with respect to the room in multi-storey residential buildings — Results of pilot plants tests // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 57. Pp. 237–244. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.052
3. *Tan Z., Yao Y., Yao C., Yang J., Ruan Y., Wang Q.* A new phase transition heat exchanger for gas water heaters // *Inventions*. 2018. Vol. 3. Issue 2. P. 37. DOI: 10.3390/inventions3020037
4. *Farias O., Jara F., Betancourt R.* Theoretical and experimental study of the natural draft in chimneys of buildings for domestic gas appliances // *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40. Issue 5. Pp. 756–762. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.05.010
5. *Aguilar C., White D.J., Ryan D.L.* Domestic water heating and water heater energy consumption in Canada. CBEEDAC : Edmonton, AB, Canada, 2005. 359 p.
6. *Galitsky C., Worrell E.* Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Vehicle Assembly Industry : an ENERGY STAR Guide

- for Energy and Plant Managers. Lawrence Berkeley National Laboratory : Berkeley, CA, USA, 2008. 81 p.
7. *Tajwar S., Saleemi A.R., Ramzan N., Naveed S.* Improving thermal and combustion efficiency of gas water heater // *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31. Issue 6–7. Pp. 1305–1312. DOI: 10.1016/j.applthermaling.2010.12.038
8. *Eiamsa-Ard S., Promvong P.* Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators // *Solar Energy*. 2005. Vol. 78. Issue 4. Pp. 483–494. DOI: 10.1016/j.solener.2004.09.021
9. *Craig S.J., McMahon J.F.* The effects of draft control on combustion // *ISA Transactions*. 1996. Vol. 35. Issue 4. Pp. 345–349. DOI: 10.1016/S0019-0578(96)00043-2
10. *Веснин В.И.* Концепция энергосбережения проточными газовыми водонагревателями // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 8–3 (50). С. 29–32. DOI: 10.18454/IRJ.2016.50.197. EDN WJBTJJ.
11. *Милова Л.* Двухконтурные настенные газовые котлы. Обзор рынка // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2012. № 9 (129). С. 38–55. EDN RHWARL.
12. *Темников А.А., Баромыченко А.А.* Горелки для сжигания газообразного топлива // *Science Time*. 2016. № 3 (27). С. 483–486. EDN VUBDXV.

13. Ионин А.А., Жила В.А., Архитихович В.В., Пио-
ник М.Г. Газоснабжение : учебник. М. : Изд-во АСВ,
2012. 472 с.

14. Плужников А.И., Жила В.А., Ушаков М.А. Га-
зоснабжение. М. : Издательский центр «Академия»,
2008. 448 с.

15. Жила В.А., Ушаков М.А., Брюханов О.Н. Га-
зовые сети и установки. М. : Издательский центр
«Академия», 2003. 272 с.

16. Торопов А.Л. Исследование работы газовых
клапанов конвекционных котлов малой мощности //
АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование
воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика.
2020. № 3. С. 58–71. EDN VZQWKW.

17. Wong L.T., Mui K.W., Chan Y-W. Showering
thermal sensation in residential bathrooms // *Water*. 2022.
Vol. 14. Issue 19. P. 2940. DOI: 10.3390/w14192940

18. Торопов А.Л. Автономные системы тепло-
снабжения малой мощности. Настенные газовые
котлы и тепловые аккумуляторы. М. : Национальный
исследовательский технологический университет
«МИСиС», 2022. 176 с. DOI: 10.22227/978-5-7264-
3110-9.2022.176. EDN CJWKLO.

19. Masuda Y., Marui S., Kato I., Fujiki M., Na-
kada M., Nagashima K. Thermal and cardiovascular
responses and thermal sensation during hot-water bath-

ing and the influence of room temperature // *Journal
of Thermal Biology*. 2019. Vol. 82. Pp. 83–89. DOI:
10.1016/j.jtherbio.2019.03.014

20. Santos T., Quinta A., Jaf F., Costa V. Improv-
ing thermal comfort and water savings in domestic gas
water heaters // *TEchMA2023 — 6th International Con-
ference on Technologies for the Wellbeing and Sustain-
able Manufacturing Solutions*. 2023. DOI: 10.13140/
RG.2.2.27685.06886

21. Quinta A., Santos T., Martins N., Jaf F., Costa V.
Enhancing user comfort and environmental perfor-
mance of domestic tankless gas water heaters: hardware
and software strategies // *Ciência 2023 — Encontro
com a Ciência e Tecnologia em Portugal*. 2023. DOI:
10.13140/RG.2.2.20480.20488

22. Григоров Н.О., Саенко А.Г., Восканян К.Л.
Методы и средства гидрометеорологических из-
мерений. Метеорологические приборы : учебник.
СПб. : Российский государственный гидрометеоро-
логический университет, 2012. 305 с. EDN YFNPGL.

23. Григоров Н.О., Восканян К.Л., Карава-
ева М.С. О соотношении чувствительности и те-
пловой инерции различных видов термометров // Ученые записки Российского государственного ги-
дрометеорологического университета. 2014. № 33.
С. 69–76. EDN SCCYNZ.

Поступила в редакцию 13 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 10 января 2024 г.

Одобрена для публикации 10 января 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: Алексей Леонидович Торопов — кандидат технических наук, генеральный директор — глав-
ный конструктор; Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); 105122, г. Москва, Щелковское шоссе, д. 13;
РИНЦ ID: 1030472, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

REFERENCES

1. Czerski G., Strugala A. The energy efficien-
cy of hot water production by gas water heaters with
a combustion chamber sealed with respect to the room.
Water. 2014; 6(8):2394–2411. DOI: 10.3390/w6082394

2. Czerski G., Gebhardt Z., Strugala A., Butry-
mowicz C. Gas-fired instantaneous water heaters with
combustion chamber sealed with respect to the room
in multi-storey residential buildings — Results of pilot
plants tests. *Energy and Buildings*. 2013; 57:237–244.
DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.052

3. Tan Z., Yao Y., Yao C., Yang J., Ruan Y.,
Wang Q. A new phase transition heat exchanger for gas
water heaters. *Inventions*. 2018; 3(2):37. DOI: 10.3390/
inventions3020037

4. Farias O., Jara F., Betancourt R. Theoretical
and experimental study of the natural draft in chimneys
of buildings for domestic gas appliances. *Energy and
Buildings*. 2008; 40(5):756–762. DOI: 10.1016/j.en-
build.2007.05.010

5. Aguilar C., White D.J., Ryan D.L. *Domestic
Water Heating and Water Heater Energy Consumption
in Canada*. CBEEDAC, Edmonton, AB, Canada, 2005;
359.

6. Galitsky C., Worrell E. *Energy Efficiency Im-
provement and Cost Saving Opportunities for the Ve-
hicle Assembly Industry : an ENERGY STAR Guide for
Energy and Plant Managers*. Lawrence Berkeley Na-
tional Laboratory, Berkeley, CA, USA, 2008; 81.

7. Tajwar S., Saleemi A.R., Ramzan N., Na-
veed S. Improving thermal and combustion efficiency
of gas water heater. *Applied Thermal Engineering*.
2011; 31(6-7):1305–1312. DOI: 10.1016/j.appltherma-
leng.2010.12.038

8. Eiamsa-Ard S., Promvonge P. Enhancement
of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical
tape swirl generators. *Solar Energy*. 2005; 78(4):483–494.
DOI: 10.1016/j.solener.2004.09.021

9. Craig S.J., McMahon J.F. The effects of draft control on combustion. *ISA Transactions*. 1996; 35(4):345-349. DOI: 10.1016/S0019-0578(96)00043-2
10. Vesnin V.I. Concept of energy saving by flowing gas water heaters. *International Research Journal*. 2016; 8-3(50):29-32. DOI: 10.18454/IRJ.2016.50.197. EDN WJBTJJ. (rus.).
11. Milova L. Double-circuit wall-mounted gas boilers. Market overview. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2012; 9(129):38-55. EDN RHWARL. (rus.).
12. Temnikov A.A., Baromychenko A.A. *Burners for burning gaseous fuels. Science Time*. 2016; 3(27):483-486. EDN VUBDXV. (rus.).
13. Ionin A.A., Zhila V.A., Arkhitikhovich V.V., Pshonik M.G. *Gas supply : textbook*. Moscow, Publishing House ASV, 2012; 472. (rus.).
14. Pluzhnikov A.I., Zhila V.A., Ushakov M.A. *Gas supply*. Moscow, Publishing Center “Academy”, 2008; 448. (rus.).
15. Zhila V.A., Ushakov M.A., Bryukhanov O.N. *Gas networks and installations*. Moscow, Publishing center “Academy”, 2003; 272. (rus.).
16. Toropov A.L. Study of the operation of gas valves of low-power convection boilers. *AVOK*. 2020; 3:58-71. EDN VZQWKW. (rus.).
17. Wong L.T., Mui K.W., Chan Y-W. Showering thermal sensation in residential bathrooms. *Water*. 2022; 14(19):2940. DOI: 10.3390/w14192940
18. 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.).
19. Masuda Y., Marui S., Kato I., Fujiki M., Nakada M., Nagashima K. Thermal and cardiovascular responses and thermal sensation during hot-water bathing and the influence of room temperature. *Journal of Thermal Biology*. 2019; 82:83-89. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2019.03.014
20. Santos T., Quinta A., Jaf F., Costa V. Improving thermal comfort and water savings in domestic gas water heaters. *TEchMA2023 — 6th International Conference on Technologies for the Wellbeing and Sustainable Manufacturing Solutions*. 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.27685.06886
21. Quinta A., Santos T., Martins N., Jaf F., Costa V. Enhancing user comfort and environmental performance of domestic tankless gas water heaters: hardware and software strategies. *Ciência 2023 — Encontro com a Ciência e Tecnologia em Portugal*. 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.20480.20488
22. Grigorov N.O., Saenko A.G., Voskanyan K.L. *Methods and means of hydrometeorological measurements. Meteorological instruments : textbook*. St. Petersburg, RGGMU, 2012; 305. EDN YFNPGL. (rus.).
23. Grigorov N.O., Voskanyan K.L., Karavaeva M.S. Sensibility and heat inertia relationship for several kinds of thermometers. *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2014; 33:69-76. EDN SCCYNZ. (rus.).

Received November 13, 2023.

Adopted in revised form on January 10, 2024.

Approved for publication on January 10, 2024.

B I O N O T E S : **Alexey L. Toropov** — Candidate of Technical Sciences, General Director — Chief Designer; **Engineering Center “April”**; 13 Schelkovskoe shosse, Moscow, 105122, Russian Federation; ID RSCI: 1030472, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 338.001.36

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1550-1561

Оценка экономической эффективности применения искусственного интеллекта в строительстве: выбор оптимального метода

Дарья Николаевна Шишкина
Цифровая Артель; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведен обзор существующих идей внедрения искусственного интеллекта (ИИ) в строительной отрасли. Выполнен анализ применимости технологий и оценена их экономическая эффективность, обоснована целесообразность применения вложений инвестиций в потенциальные проекты. Строительство — это фундаментальная сфера жизни человека, в которой использование нововведений информационных технологий, в особенности ИИ, должно быть сопряжено с взвешенным решением и тщательным тестированием. По этой причине требуется выбрать наиболее подходящий под эти задачи метод оценки целесообразности внедрения. Применяв выбранный метод, можно раскрыть возможности нового проекта и соотнести его со всеми затратами и рисками.

Материалы и методы. Проанализированы российские и зарубежные исследования, интернет-ресурсы и материалы конференций, в ходе которых найдены актуальные тенденции применения ИИ в строительстве. Комплексный метод позволил осветить технологии с точки зрения идейности, реальности воплощения, практического использования и экономической целесообразности. Применен метод балльной оценки проектов и составлен перечень технологий, выгодных к использованию и перспективных к разработке. Осуществлено многоуровневое изучение выбранных проектов согласно системному подходу моделирования.

Результаты. Сделаны выводы о наиболее перспективном методе оценки экономической эффективности инновационных проектов на основе ИИ, применимых к строительной индустрии. Теоретическая модель направлена на рассмотрение проекта как процесса причинно-следственных связей, благодаря которому видна цепочка необходимых действий, а также их последовательность.

Выводы. Данное исследование об эффективности внедрения ИИ в строительство и некоторых идейных замыслов выявило оптимальный и достаточно информационный метод оценки экономической эффективности проектов, степень актуальности и соответствия интересам и потребностям строительной сферы. Представлен перечень рекомендаций для процесса внедрения нового проекта с помощью ИИ. Предложен вектор дальнейших исследований в области практических расчетов эффективности и прогнозирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: искусственный интеллект, инновации, информационные технологии, машинное обучение, строительство, инвестиционный проект, методы оценки инвестиций, экономический эффект, экономическая эффективность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шишкина Д.Н. Оценка экономической эффективности применения искусственного интеллекта в строительстве: выбор оптимального метода // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1550–1561. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1550-1561

Автор, ответственный за переписку: Дарья Николаевна Шишкина, fin.control.id@gmail.com.

Assessment of economic efficiency of artificial intelligence application in construction: the choice of the optimal method

Darya N. Shishkina
Digital Artel; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The review of existing ideas of artificial intelligence implementation in the construction industry is carried out. On the basis of the studied data the applicability of the technologies was analyzed and their economic efficiency was evaluated, as well as the feasibility of investment in potential projects was substantiated. Construction is a fundamental area of human life, in which the use of information technology innovations, especially artificial intelligence should be associated with a balanced decision and thorough testing. For this reason, it is required to choose the most appropriate method to evaluate the feasibility of implementation. By the chosen method it is possible to reveal the possibilities of a new project and to correlate it with all costs and risks.

Materials and methods. Russian and foreign studies, Internet resources and conference materials were studied. As a result, the current trends of technologies of artificial intelligence application in construction were found. The integrated method allowed to consider technologies from the point of view of ideology, reality of embodiment, practical application and economic feasibility. The method of scoring of projects was applied and the list of technologies was compiled. This list includes technologies that are favourable for application and promising for development. Multilevel study of the selected projects was carried out according to the system modelling approach.

Results. Based on the results of the study, conclusions are made about the best method for assessing the economic efficiency of innovative projects based on artificial intelligence, which are applicable to the construction industry. The theoretical model is aimed at considering the project as a process of cause-and-effect relationships. This project reveals the list of necessary steps and their sequence.

Conclusions. This study on the effectiveness of the implementation of AI in construction of some ideas revealed an optimal and sufficiently informative method of assessing the economic efficiency of projects, as well as the degree of relevance and compliance with the interests and needs of the construction industry. A list of recommendations for the process of implementation of a new project with the use of artificial intelligence is presented. A vector for further research in the field of practical calculations of efficiency and forecasting is proposed.

KEYWORDS: artificial intelligence, innovation, information technology, machine learning, construction, investment project, investment evaluation methods, economic effect, economic efficiency

FOR CITATION: Shishkina D.N. Assessment of economic efficiency of artificial intelligence application in construction: the choice of the optimal method. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1550-1561. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1550-1561 (rus.).

Corresponding author: Darya N. Shishkina, fin.control.id@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие искусственного интеллекта (ИИ) во всех сферах экономики, в частности строительстве, обусловило необходимость изучения данной информационной технологии (ИТ). Внедрение ИИ еще не столь распространено, однако те, кто его применяют, имеют выгоду. Снижение затрат, оптимизация процессов, значительное сокращение рисков на всех этапах [1], повышение конкурентоспособности — лишь часть преимуществ. Несмотря на это, существуют ограничения, в первую очередь стоимостные, так как на разработку и внедрение всех технологий с использованием ИИ нужны большие средства. Вложения в ИТ, в том числе в ИИ, следует рассматривать как стратегический инвестиционный проект, который может принести инвесторам или компании доход, следовательно, для принятия управленческого решения требуется выяснить эффективность проекта.

Как правило, применение инновационных технологий в строительной отрасли направлено на извлечение положительного экономического эффекта, включая минимизацию рисков возникновения перерасхода целевых средств и срыв сроков строительства, что является частыми проблемами. Кроме того, эти негативные факторы влияют на общую финансовую эффективность работы компаний (строительных, девелоперских и т.п.), на их деловую репутацию, что отражается на прибыльности и производительности, приводит к подрыву доверия, сокращению привлечения субсидий и инвестиций.

Возможный перерасход средств приводит и к увеличению риска убыточности, а значит, недовольству участников-выгодоприобретателей проекта [2]. Достаточно обширно вопрос инновационных проектов представлен в списке поручений Президента Российской Федерации от 31.12.2020 № Пр-2242

по итогам конференции по искусственному интеллекту.

Необходимость обоснования экономической эффективности использования технологий ИИ, в частности при создании объектов недвижимости, обоснована включением настоящего вопроса в перечень проектов цифровой трансформации строительной отрасли, городского и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2030 года¹. В инициативах обозначена направленность на «сокращение уровня травматизма и несчастных случаев со смертельным исходом за счет применения средств объективного контроля и искусственного интеллекта, а так же обеспечение проведения государственной экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий с применением предиктивной аналитики, основанной на алгоритмах искусственного интеллекта»¹.

Помимо государственных программ, подтверждается интерес к данной теме в работах, опубликованных в журналах. Они указывают на увеличение спектра использования во всех сферах экономики и говорят о значительном увеличении перспективы дальнейшего развития.

В.Н. Колчин рассматривает применение технологий ИИ в строительстве [3]. Приведены примеры внедрения цифровых технологий, в том числе ИИ, на стадии продаж и прогнозирования ре-концепции И.Ф. Гареевым, Н.Н. Мухаметовой [4]. О важном значении инновационных проектов в строительстве пишет Н.Е. Симионова, раскрывая нюансы управ-

¹ О стратегическом направлении в области цифровой трансформации строительной отрасли, городского и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2030 г. : Распоряжение Правительства РФ от 27.12.2021 № 3883-р.

ления инновационными проектами в строительстве и возможность оценки эффективности [5].

Цель данной статьи — проанализировать каждый вид возможного применения ИИ в строительной отрасли в отдельности и в целом, чтобы выявить наиболее привлекательные из них для дальнейшего изучения, практического использования и оценить экономическую целесообразность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для принятия взвешенного решения и возможности избежать ошибок в управленческих решениях на практике необходимо использовать несколько наиболее подходящих методов, т.е. подойти комплексно. На этом же принципе основано это исследование, где применены следующие методы: контент-анализ, сравнительный анализ, системный анализ, качественный экспертный анализ, метод балльного ранжирования, моделирование.

Проанализированы публикации из научных журналов (на ресурсах e-LIBRARY и Молодой ученый, а также иностранные публикации), начиная с 2018 г., так как материалы по выбранной теме достаточно динамично развиваются и более ранние работы могут предоставлять устаревшую информацию. Также изучены сведения из интернет-источников, они актуально отражают передовые тенденции. Среди интернет-публикаций были отобраны только те материалы, которые применимы к сфере строительства и являются достоверными, это «Строительная газета», «ЦУС в строительстве», информационный портал «Сбербанк», сайт Министерства экономического развития РФ. Благодаря такому контент-анализу собраны текстовые массивы для дальнейшей систематизации.

Использованный на следующем шаге системный метод позволил из многообразия идей реализации ИИ в строительстве построить четкую структурированную базу для последующего детального анализа. Необходимость системного подхода обоснована и автором статьи О. Лавриченко [6]. Выполнены выборка наиболее интересных и вероятных идей применения ИИ в строительной индустрии и дальнейшее упорядочение этих идей по логике использования согласно этапам строительных процессов от проектирования до управления готовым объектом.

На основе систематизации проведен сравнительный анализ идей по степени готовности к внедрению. Поэтапное сопоставление формирует 4 группы от идеи до широкого практического применения, таким образом, формируется представление о степени развития идей. Балльное ранжирование и группировка подсвечивает возможные сферы роста и развития в тех областях, которые в данный момент не проработаны полноценно, что открывает потенциальные возможности для новых разработчиков и инвесторов.

Выборочное построение теоретических моделей (метод моделирования) дало в качестве результата возможность оценить процессы внедрения ИИ в строительной индустрии и выстроить цепочку последовательных действий для ее внедрения. На основе словесно-описательной части, преобразованной в графическую модель, можно сделать выводы о возможности применения внедряемого процесса. При углубленном анализе открывается возможность разобрать риски, сложности использования и последствия, что может стать материалом для дальнейших исследований.

Большинство применяемых методов являются качественными в связи с тем, что объекты исследования — новаторские и технически сложные.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка экономической эффективности любого проекта осуществляется в большинстве случаев количественными методами, проекты в сфере строительства требуют точных расчетов. Однако сочетание новшества технологии ИИ и фундаментальной сферы строительства не позволяет это сделать традиционными вычислениями. Новизна данной работы состоит в применении качественного метода при оценке экономической эффективности.

Для финансово-экономического анализа эффективности важно иметь хорошее представление о новейших технологиях ИИ и машинного обучения, поэтому рассмотрены основные идеи применения в строительстве. Проведен обширный контент-анализ всевозможных технологий и рассмотрена каждая из них, принимая во внимание важные факторы повышения экономической эффективности замысла: соответствие требованиям безопасности и качества, сроков производства, ресурсосбережение в процессе строительства и т.д. [5, с. 60].

Использование *предиктивной аналитики (предиктивного планирования)* при помощи ИИ помогает решить множество проблем, связанных с несвоевременной поставкой материалов и оборудования, которые часто срываются из-за неучтенных климатических, экономических, политических и других факторов. Из-за этого компании несут большое количество дополнительных издержек (например, срочная покупка и доставка, дополнительный кредит или перекредитование и т.д.). Используя накопленный опыт и исторические данные, система обрабатывает сведения и способна обучаться с последующей выдачей ориентировочного прогноза, в котором учтено множество факторов². Этот инструмент дает возможность составлять прогнозы с учетом вероятных отклонений от определенных сроков и подготовить необходимые меры по их предотвращению или минимизации их негативного влияния. Эконо-

² Искусственный интеллект на стройке: возможности и перспективы // Строительная газета. 2023.

мический эффект отражается в предотвращении незапланированных затрат и своевременности окончания строительства.

В схожем векторе планирования существуют сервисы *предсказательной аналитики* на основе ИИ, которые позволяют спрогнозировать цены на строительные материалы (по словам управляющего партнера «Самолет» Андрея Иваненко, эксперт попадает в 20 % случаев, а в базе ИИ — 92 % [7]). В этом случае можно более точно рассчитать необходимый объем резервных фондов для закупки дополнительных материалов.

Подобное направление, связанное с *предиктивным моделированием*, — это расчет оптимальной *квартирографии*. Данные программы уже используют девелоперы при планировании создания жилого комплекса для наилучшего определения количества квартир, комнат в них и площади. Еще одна полезная функция такого планирования заключается в определении стоимости квадратного метра на каждом этапе строительства, что очень важно для продажи части площадей в конкретный период времени (стадии строительства). При анализе используются накопленные сведения о спросе и предложении; наличии аналогичных жилых объектов, инфраструктуры и транспортной доступности. Примером такого введения ИИ на практике служит сервис «Девелопер», который уже тестируется крупными застройщиками [7]. Грамотный расчет *квартирографии* дает возможность наиболее рационального использования площади, что особенно актуально в крупных городах.

Ответвление этого направления — *автоматизированное генеративное проектирование зданий и сооружений*. Проектируются конструкции под определенные сложные климатические и геодезические параметры, например строительство в сейсмически опасных зонах. В процессе такого архитектурного проектирования с помощью алгоритмов ИИ как результат формируются варианты наилучшего расположения здания, его конструктивных особенностей, применяемых материалов, необходимое оборудование для дальнейшей эксплуатации и отслеживания состояния здания. Экономическая выгода в таком случае обоснована непосредственно возможностью такого строительства и его безопасностью [8].

Внедрение ИИ не обошло стороной и дизайн в сфере строительства. Существует понятие «*генеративный дизайн*» — это процесс поиска формы, который может заимствовать эволюционный метод дизайна в природе. На сегодняшний день в проектировании уже продумано огромное количество моделей, однако многие компании тратят много времени на то, чтобы сделать что-то необычное и интересное [3, с. 251]. С помощью ИИ указанная программа учится сопоставлять вводимые параметры запроса и использовать алгоритм для создания множества

вариантов, при этом каждая итерация учит ИИ создавать идеальную модель. Такое эффективное применение площадей даст прирост дополнительной прибыли.

Существуют программы *мониторинга хода строительства*: при помощи ИИ обрабатываются фото- и видеоданные со строительной площадки, собранные с помощью дронов или других специальных устройств. На основе анализа выявляются действия, которые не соответствуют установленным правилам безопасности, с указанием местоположения. Так же система анализирует модель, созданную при проектировании, с информацией по текущему ходу возведения сооружения и выявляет задержки и нарушения. Подобные технологии уже нашли свое отражение на практике, например, компания Ersi предоставляет такую разработку в рамках оптимизации управления строительными проектами. Таким образом, оптимизируется процесс координации строительства и, как следствие, увеличение производительности, а также предотвращение аварийных ситуаций и отсутствие финансовых потерь.

Выше уже упоминалось применение специализированного оборудования для обследования территории в рамках программы анализа, однако *сбор информации* тоже может быть осуществлен с применением ИИ на основе компьютерного зрения [9]. Компании разрабатывают и производят автономно передвигающихся по местности роботов, оснащенных специализированными системами трехмерного сканирования и фото- видеofиксации. По итогу работы робота создается полная цифровая модель, которая обрабатывается нейронной сетью. Так получают самые актуальные сведения о строящемся объекте. Эти роботы способны выполнять узкоспециальный спектр задач и принимают форму, которая максимально приспособлена для выполнения [10]. В России среди таких компаний Droxel применяет роботов [3, с. 251], Trase Air использует дроны, группа «Самолет» начала тестирование роботов-собак³. Подобные разработки помогают оперативно и достоверно собрать информацию, которая в дальнейшем применяется в широком спектре аналитической работы, описанной выше.

Еще одна идея, вытекающая из необходимости контроля на строительной площадке, — *экзоскелеты*, которые применяются непосредственно на строительной площадке. Эта система фиксирует через камеры окружающую среду и анализирует ситуацию. После чего специальные алгоритмы ИИ определяют наилучшие движения для окружающей местности и состояние человека. Так, например, платформа Newmetrix за счет машинного обучения прогнозирует потенциальные опасности на основе фото- и видеисточников [10]. Использование такого

³ Как ИИ помогает в строительстве и ЖКХ // Информационный портал «Сбер ПРО». 2023.

рода оптимизации обосновывается потенциальным увеличением производительности, точности и скорости выполнения работ. Сопреженная с предыдущей технологией, направленной на безопасность, это идея *интеллектуальных датчиков* на теле рабочих-строителей для контроля их физического состояния. Активно обсуждается введение в практику смарт-жилетов, которые также отвечают за безопасность рабочих и помогают отслеживать нахождение строителей в опасных зонах [11].

В раздел безопасности отнесен и проект, в котором *распознается небезопасное поведение людей*, пересекающих структурные опоры, используемые при создании глубоких котлованов. В разработке использовалось компьютерное зрение для обнаружения людей и модуль обнаружения перекрытия для определения соответствующего расположения и взаимоотношений между людьми и структурными опорами [12]. Таким образом, около 80 % несчастных случаев можно будет избежать. Эффективность введения разработок, связанных с безопасностью, обоснована не только экономическими потерями. Смерть работника и причиненные травмы оказывают большое побочное влияние на компании и, в том числе, на экономику в целом. Они включают прямые физические потери для пострадавшего, эмоциональный стресс для его семьи, а также урон моральному облику компании. Есть практика оценки таких компенсаций в судебной практике и, как итог, они находят отражение в снижении общей прибыльности проекта. Но немаловажным в данном контексте является тот факт, что цифры не могут отразить урон, который невозможно восполнить деньгами.

Самый большой эффект от использования ИИ уже виден в маркетинге и продажах. В этой области нужно коммуницировать с клиентами, таким примером служат применяемые повсеместно *чат-боты* и *голосовые боты*. Они выполняют первичное общение и консультируют клиента. Для выявления потребности клиента и перевода на необходимого специалиста система ИИ использует лингвистическую обработку, чтобы анализировать вопросы покупателей и предоставлять ответы и информацию [13].

В продаже недвижимости эффект этой идеи занял прочное место. Экономический эффект этой идеи заключается в снижении затрат на персонал на первичной стадии привлечения клиента. Таким образом, силы квалифицированного персонала по продажам направлены на целевого клиента, что увеличивает объем продаж.

Перспективное направление — создание специализированных *ИИ-ассистентов* для разных специалистов, от инженера до генерального директора. Подтверждение перспективности и целесообразности этого нововведения активно обсуждается на конференциях [14]. Системы основаны на знаниях огромного количества информации и вариативности, однако сложность и многогранность

склада ума человека на сегодняшний день достигнуты не в полной мере [10].

Контроль оборудования вносит важную информацию в ходе строительства. Такие решения при помощи телеметрии на основе ИИ определяют необходимость ремонта, в том числе профилактического, а также местоположение и расход топлива или заряд аккумулятора, сопоставляя его с плановыми показателями. Экономическая эффективность обоснована, как и в большинстве случаев, возможностью предотвратить выход из строя оборудования, что экономит значительное количество времени и финансовые ресурсы строительной компании.

Идеи применения ИИ не обошли и строительные работы: существуют системы ИИ для управления машинами и оборудованием, но под контролем человека, которые применяют для демонтажа зданий, 3D-печати. В перспективе создание *автономной роботизированной спецтехники* (краны, бульдозеры, бетономешалки и самосвалы). Целесообразность заключается в увеличении мощностей и скорости производимых работ, а также повышении безопасности сотрудников при выполнении бизнес-процессов (включая прогнозирование рисков и неблагоприятных событий, снижение уровня непосредственного участия человека в процессах, связанных с повышенным риском для его жизни и здоровья)⁴.

Системы умного дома, которые часто применяются в жилом фонде, активно входят в обычную жизнь. Они основаны на возможности распознавания лиц. На этом же принципе основана идея *системы безопасности на строительной площадке* [15]. ИИ может выявлять незнакомцев и распознавать подозрительное поведение работников. Таким образом, будет обеспечен контроль за площадкой, предотвращены хищения и нерегламентированное поведение рабочих. Стоит отметить, что хищение является довольно распространенной статьей затрат. Эта мера дает возможность сохранить резервные фонды от затрат.

Тема *возможности повторного использования строительных материалов* в конце жизненного цикла здания очень актуальна для строительства. Огромное количество пригодных для вторичного использования материалов и частей конструкций выбрасывается. ИИ был призван продвинуть эту проблему вперед. Существуют различные модели ИИ, способные смоделировать и оптимизировать цикличность использования строительных материалов и отходов в процессе строительства [16]. Экономический эффект заключается в большой экономии бюджета, но на сегодняшний день переработка строительных материалов происходит без применения ИИ. По мнению автора, это нововведение —

⁴ О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490.

перспективное направление в условиях мировой тенденции разумного потребления.

Все вышеуказанные идеи разработок на основе ИИ являются перспективными, но важными и необходимыми, для первоочередного внедрения служат немногие, так как высокая стоимость и потребность в квалифицированном персонале накладывают финансовые и управленческие ограничения на введение таких технологий.

Потенциал ИИ велик для построения работы, но строительные компании не решаются использовать ИИ повсеместно не по причине того, что они против его внедрения, а потому что его автономные решения и действия ИИ могут быть необъяснимы и требуют тщательного контроля и алгоритмизации. Решения ИИ ставятся под сомнение, поскольку предсказание необъяснимо [17].

По итогу контент-анализа сформировано представление об использовании ИИ в строительстве, что дает возможность группировки технологий по степени их реализуемости. Такое структурирование позволяет понять, в какой степени адаптируется ИИ в сфере создания недвижимости, и увидеть необходимый вектор доработки. Основная направленность всех идей в конечном итоге сводится к увеличению производительности, уровень роста которой заметно ниже, чем в остальных отраслях.

На основе указанных источников и вышеперечисленных сведений о программных продуктах с использованием ИИ и их возможности практического применения составлена табл. 1 с балльной системой оценки применимости, где 0 — не применимо, 1 — применимо.

Для наглядного представления о том, какие разработки активно внедрены, автором построен гра-

Табл. 1. Сравнительный анализ видов применения ИИ в строительстве (составлено автором)

Направления Directions	Идея Idea	Технологическая разработка Technological development	Тестирование и единичное применение Testing and one-off application	Активное практическое применение Active application
Предиктивное проектирование Predictive design	1	1	1	1
Предиктивное ценообразование Predictive pricing	1	1	1	0
Предиктивное моделирование Predictive modelling	1	1	1	1
Генеративный дизайн Generative design	1	1	1	0
Мониторинг хода строительства Monitoring of construction progress	1	1	1	1
Датчики безопасности Safety sensors	1	1	1	0
Экзоскелеты Exoskeletons	1	1	1	0
Чат-боты Chatbots	1	1	1	1
ИИ-ассистенты AI assistants	1	0	0	0
Дроны и роботы (роботы-собаки) Drones and robots	1	1	1	1
Контроль оборудования Equipment control	1	1	1	0
Автономная строительная техника Autonomous construction equipment	1	1	1	0
Система охранной безопасности Security system	1	1	0	0
Цикличность применения материалов Cyclical application of materials	1	1	0	0

фик (рис. 1). Здесь видно, что идей, которые достигли высокого уровня внедрения, достаточно, однако существуют и те, что не нашли широкого применения на сегодняшний день и даже не тестируются строительными компаниями.

Исходя из данных, собранных в табл. 1, автором построена табл. 2 с расчетом относительных величин.

Как показывают данные табл. 1 и сравнительной табл. 2, лишь 36 % идей являются применимыми на практике. Но, принимая во внимание, что строительство — это консервативная сфера экономики, что здесь не допустимы ошибки и скоропалительные решения, такой процент внедрения достаточно весом. При этом 93 % идей уже технологически разработаны и 79 % тестируются, это

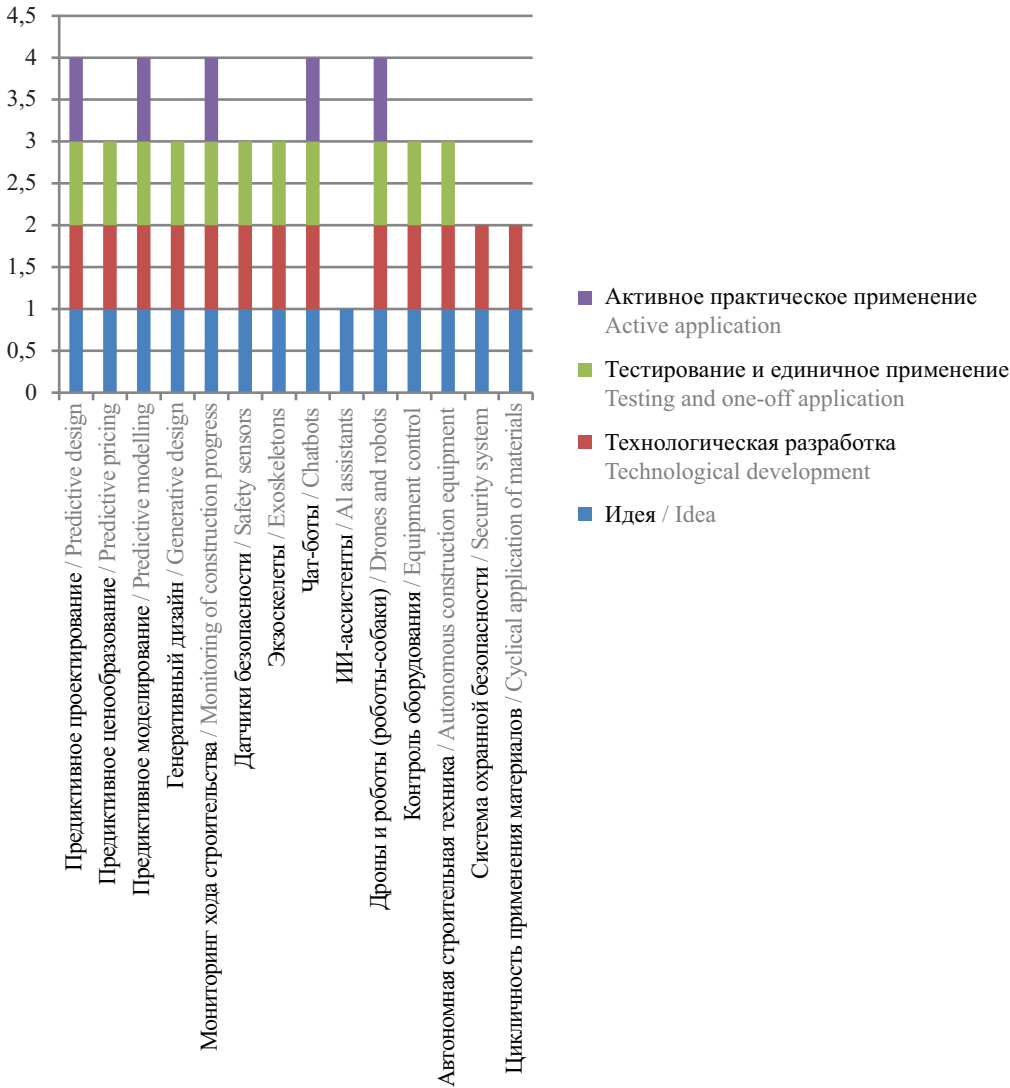


Рис. 1. График сравнительного анализа видов применения ИИ в строительстве

Fig. 1. Graph of comparative analysis of types of AI applications in construction

Табл. 2. Относительные показатели степени внедрения в строительство разработок на основе ИИ (составлено автором)

Table 2. Relative indicators of the degree of implementation of AI-based developments in construction (compiled by the author)

Показатели Indicators	Идея Idea	Технологическая разработка Technological development	Тестирование и единичное применение Testing and one-off application	Активное практическое применение Active application
Относительные показатели развития идей Relative indicators of development of ideas	100 %	93 %	79 %	36 %

свидетельствует об активном желании компаний строительной отрасли внедрять технологии ИИ. Также из анализа видно, что на сегодняшний момент внедрение происходит только в тех сферах, где не требуется большая работа по перепрофилированию персонала, технологий и оборудования. Крупные компании уже внедряют инструменты на основе ИИ для увеличения эффективности работы.

В ситуации, когда в свободном доступе нет точных отчетных данных от компаний, внедривших продукты с использованием ИИ, невозможно применить классические методы оценки экономической эффективности проекта (норма доходности, рентабельность различных показателей, срок окупаемости, совокупная стоимость владения и т.д. [18]). Следует отметить, что, если оценивать экономический эффект от внедрения ИИ, основываясь только на затратах, не принимая во внимание качественные

факторы, это может привести к суждению о невыгодности внедрения [19, с. 195]. Многие проекты ИИ, как часть ИТ-проектов, работают на перспективу, поэтому необходим метод оценки эффективности на основе теоретического знания, один из таких методов — построение моделей.

Для проведения анализа необходимая информация о каждом из потенциальных проектов была собрана в данной статье выше. Также был подготовлен график сравнения проектов (рис. 1), на основе которого выбраны наиболее интересные и актуальные идеи. Таким образом, благодаря изученному массиву информации и выбранному методу выполнена экономическая оценка эффективности трех разработок.

Оценку экономической эффективности предиктивного проектирования можно представить следующим образом (рис. 2).

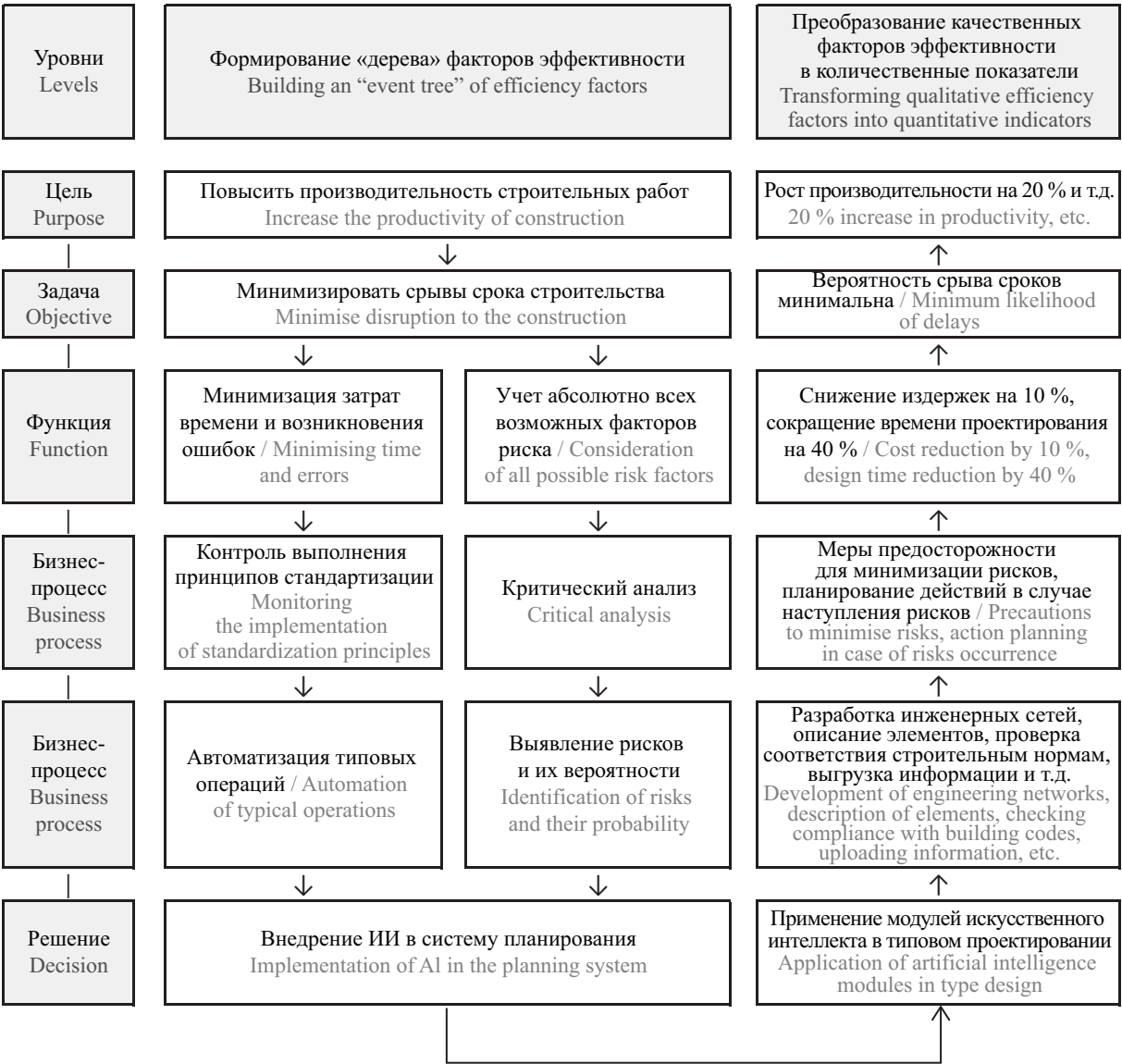


Рис. 2. Теоретическая модель оценки экономической эффективности предиктивного проектирования (составлено автором)

Fig. 2. Theoretical model for assessing the economic efficiency of predictive design (compiled by the author)

Следующая теоретическая модель оценки экономической эффективности мониторинга хода строительства при помощи ИИ представлена на рис. 3.

Далее автором составлена теоретическая модель оценки экономической эффективности внедрения автономной техники (рис. 4).

Экономическая эффективность каждой из перечисленных моделей достигается благодаря последовательному анализу и выражается в относительных показателях по экспертной оценке. Однако на практике данные относительные показатели можно вычислить более точно и применимо к конкретной организации при наличии соответствующих данных.

На основе построения таких многоуровневых детальных моделей связываются разные характеристики и появляется возможность оценить новую систему внедрения. Максимально развернутая структура позволяет связать приоритеты и задачи компании с факторами эффективности, а затем качественные улучшения можно преобразовать в количественное выражение финансовой выгоды. Благо-

даря построению цепочки причинно-следственных связей и разбивке на составляющие процесса необходимо также оценить каждое «звено» на предмет рисков и затратной части.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показал анализ, каждая из идей несет определенную экономическую выгоду. Но перед введением той или иной разработки, которую можно назвать полноценным инвестиционным проектом, требуется тщательный анализ для принятия решения.

В основном разработки с применением ИИ не приносят мгновенного эффекта, а работают на перспективу, так как ИИ должен обучаться и иметь большие данные для эффективной работы. ИТ-проекты оказывают влияние на финансово-экономические показатели деятельности предприятия опосредованно, т.е. через управленческие решения и внедренные бизнес-процессы.

Стоит отметить, что часть идей внедрения мало влияет на экономическую эффективность напрямую,

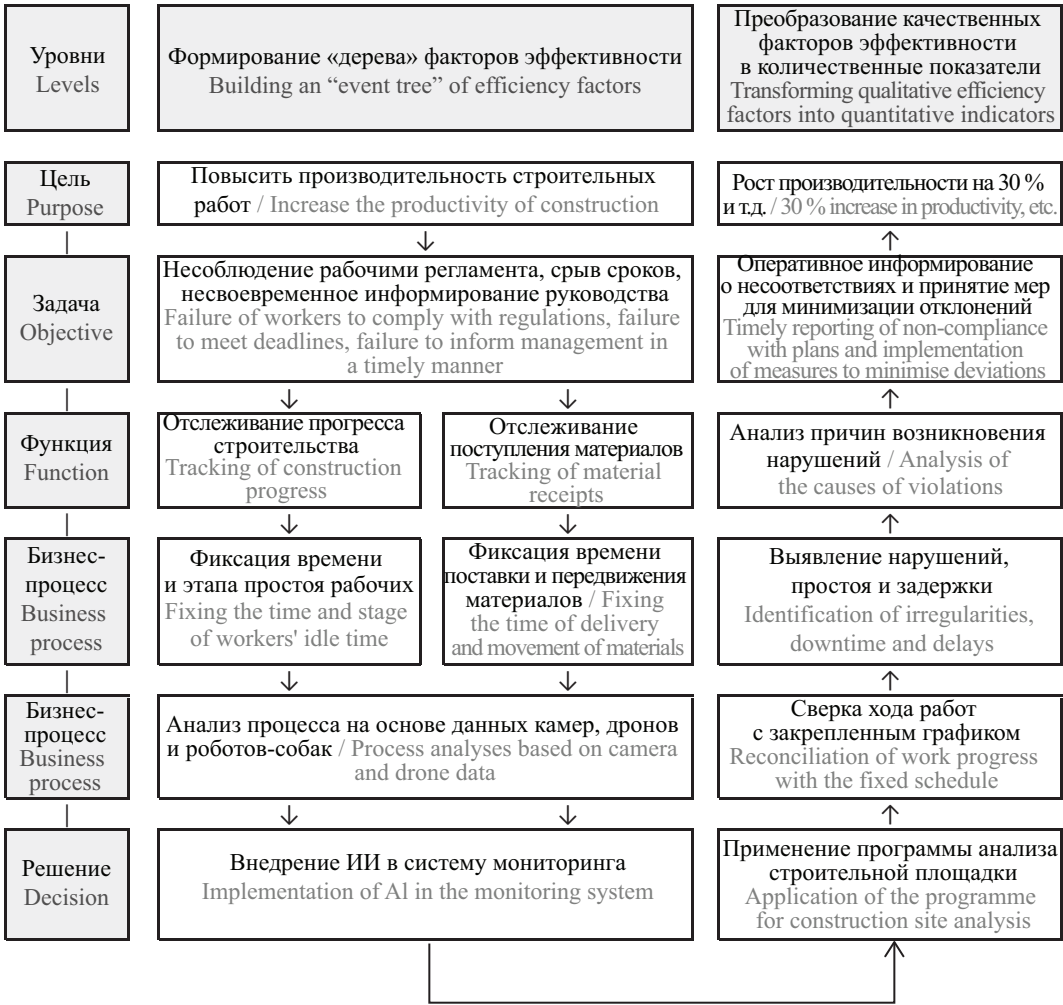


Рис. 3. Теоретическая модель оценки экономической эффективности мониторинга хода строительства при помощи ИИ (составлено автором)

Fig. 3. Theoretical model for assessing the economic efficiency of construction progress monitoring using AI (compiled by the author)



Рис. 4. Теоретическая модель оценки экономической эффективности внедрения автономной техники (составлено автором)
Fig. 4. Theoretical model for assessing the economic efficiency of the introduction of autonomous vehicles (compiled by the author)

а порой отвечает за деловую репутацию или показывает степень вовлеченности компании в новые технологии, что в свою очередь служит показателем финансовой обеспеченности и готовности компании шагать в ногу со временем.

В любом случае потенциальный экономический эффект нужно соотносить с затратами, так как для любого проекта затраты не должны быть больше, чем положительный результат проекта.

Дополнительным выводом статьи является то, что для извлечения максимальной экономической эффективности от применения ИИ в строительстве необходимо использовать не только потенциал собственных разработок, но применять возможность кооперации с лидерами рынка. Это обосновано не только необходимостью больших вложений в интеллектуальные технологии, но и наличием данных для обучения и пополнения базы знаний ИИ, так как все из упомянутых в статье разработок для корректной и полноценной работы требуют массив накопленных данных. Вероятным выходом в такой ситуации будет синергия крупных компаний, которая объединит ресурсы и усилия каждого из участников. Конференции и различные мероприятия могут стать точкой соприкосновения и источником таких объединений.

По результатам анализа, принимая во внимание все условия для получения наибольшей финансовой выгоды, составлен ряд рекомендаций для практического внедрения технологий на основе ИИ в строительной индустрии:

- применять ИИ в направлениях, которые позволяют извлекать дополнительную прибыль или уменьшать расходы в текущий момент или в ближайшем будущем. Подход со ставкой на длительную перспективу подойдет крупным компаниям и объединениям, которые располагают свободными финансовыми средствами на целевые разработки;
- использовать ИИ не для того, чтобы уменьшить штат работников, а увеличить производительность и квалификацию сотрудников;
- начинать внедрение новых разработок с одного этапа строительства и одного вида работ, что позволит контролировать успешность внедрения и отследить динамику финансово-экономических показателей от определенного нововведения;
- рассмотреть возможность кооперации с другими участниками рынка.

Практическая значимость исследования заключается в возможности разработчиков программ с использованием ИИ видеть идеи, которые еще не про-

работаны и являются перспективными, в том числе их проработка может дать большие шансы на патенты. Девелоперы, инвесторы и другие заинтересованные лица благодаря статье получают систематизированную информацию об актуальном направлении в области использования ИИ в строительстве, сведения о возможности выверенного и корректного метода оценки эффективности.

Из полученных результатов следует вывод о выборочной возможности и целесообразности примене-

ния ИИ. Важно отметить, что развитие ИТ не стоит на месте и темп роста вовлеченности предприятий увеличивается, увеличивается и число компаний-разработчиков. При росте конкуренции среди производителей программного обеспечения на основе ИИ возникает необходимость сравнения проектов для выбора того или иного. Каким методом определить лучший проект? На какие основные показатели стоит обратить внимание? Все эти рассуждения могут стать темами для будущих изучений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гинзбург А.В., Рыжкова А.И. Возможности искусственного интеллекта по повышению организационно-технологической надежности строительного производства // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 1 (112). С. 7–13. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.7-13. EDN XCIOMJ.
2. Egwim C.N., Alaka H., Toriola-Coker L.O., Balogun H., Sunmola F. Applied artificial intelligence for predicting construction projects delay // Machine Learning with Applications. 2021. Vol. 6. P. 100166. DOI: 10.1016/j.mlwa.2021.100166
3. Колчин В.Н. Специфика применения технологий «искусственного интеллекта» в строительстве // Инновации и инвестиции. 2022. № 3. С. 250–253. EDN JLECU.
4. Гареев И.Ф., Мухаметова Н.Н. Внедрение цифровых технологий на этапах жизненного цикла объектов жилой недвижимости // Жилищные стратегии. 2018. Т. 5. № 3. С. 305–322. DOI: 10.18334/zhs.5.3.39692. EDN YRLKJV.
5. Симионова Н.Е. Инновационные проекты в строительстве: управление и оценка эффективности // Экономика строительства. 2020. № 2 (62). С. 59–65. EDN UVSSWJ.
6. Лавриченко О.В. Системный подход к определению экономической эффективности инновационных проектов // Креативная экономика. 2013. № 11 (83). С. 36–40. EDN RSHVAV.
7. Маляревский А. ИИ в российских условиях: драйверы, ингибиторы и важность кейсов // Интернет-издание о высоких технологиях — CNews. 2023.
8. Baduge S.K., Thilakarathna S., Perera J.S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio B. et al. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications // Automation in Construction. 2022. Vol. 141. P. 104440. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104440
9. Brilakis I., Haas C.T.M. Infrastructure computer vision. Butterworth-Heinemann, 2019.
10. Abioye S.O., Oyedele L.O., Akanbi L., Ajayi A., Delgado J.M.D., Bilal M. et al. Artificial intelligence in the construction industry : a review of present status, opportunities and future challenges // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 44. P. 103299. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103299
11. Гурина Е.О., Лусин И.П. Будущие инновации в строительстве // Технические науки: теория и практика : мат. IV Междунар. науч. конф. 2018. С. 43–44. EDN YNCKZN.
12. Fang W., Zhong B., Zhao N., Love P.E.D., Luo H., Xue J. et al. A deep learning-based approach for mitigating falls from height with computer vision: Convolutional neural network // Advanced Engineering Informatics. 2019. Vol. 39. Pp. 170–177. DOI: 10.1016/j.aei.2018.12.005
13. Agarwal S. 4 Artificial intelligence use cases that don't require a data scientist // Forbes. 2018.
14. Федорцов Р.А. Искусственный интеллект будущее менеджмента // Студенческий научный форум 2021 : мат. Междунар. студ. науч. конф. 2021. Т. VIII. С. 130.
15. Ненастьев А. Проблемы и преимущества искусственного интеллекта в строительстве // Цифровое управление в строительстве. 2023.
16. Oluleye B.I., Chan D.W.M., Antwi-Afari P. Adopting Artificial Intelligence for enhancing the implementation of systemic circularity in the construction industry : a critical review // Sustainable Production and Consumption. 2023. Vol. 35. Pp. 509–524. DOI: 10.1016/j.spc.2022.12.002
17. Love P.E.D., Fang W., Matthews J., Porter S., Luo H., Ding L. Explainable artificial intelligence (XAI): Precepts, models, and opportunities for research in construction // Advanced Engineering Informatics. 2023. Vol. 57. P. 102024. DOI: 10.1016/j.aei.2023.102024
18. Анисифоров А.Б., Анисифорова Л.О. Методики оценки эффективности информационных систем и информационных технологий в бизнесе : учебное пособие. СПб., 2014.
19. Торохова К.Е., Матвеева М.В. Оценка экономической эффективности и перспектив внедрения технологий информационного моделирования на этапе проектирования в строительной отрасли региона // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2 (45). С. 192–201. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-2-192-201. EDN LMGVfy.

Поступила в редакцию 4 января 2024 г.

Принята в доработанном виде 4 июля 2024 г.

Одобрена для публикации 4 июля 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: Дарья Николаевна Шишкина — финансист; Цифровая Артель; 127566, г. Москва, ул. Римского-Корсакова, д. 4; SPIN-код: 8857-3305, ORCID: 0009-0008-4648-7869; fin.control.id@gmail.com.

REFERENCES

1. Ginzburg A.V., Ryzhkova A.I. Artificial intelligence capabilities for increasing organizational-technological reliability of construction. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(1):7-13. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.1.7-13. EDN XCIOMJ. (rus.).
2. Egwim C.N., Alaka H., Toriola-Coker L.O., Balogun H., Sunmola F. Applied artificial intelligence for predicting construction projects delay. *Machine Learning with Applications*. 2021; 6:100166. DOI: 10.1016/j.mlwa.2021.100166
3. Kolchin V.N. The specifics of the use of “Artificial intelligence” technology in construction. *Innovations and Investments*. 2022; 3:250-253. EDN JJLECU. (rus.).
4. Gareev I.F., Mukhametova N.N. The introduction of digital technologies at the stages of the life cycle of residential real estate. *Russian Journal of Housing Research*. 2018; 5(3):305-322. DOI: 10.18334/zhs.5.3.39692. EDN YRLKJV. (rus.).
5. Simionova N.E. Innovative projects in construction: management and performance evaluation. *Construction Economics*. 2020; 2(62):59-65. EDN UVSSWJ. (rus.).
6. Lavrichenko O.V. Systematic approach to determination of economic effectiveness of innovative projects. *Creative Economy*. 2013; 11(83):36-40. EDN RSHVAV. (rus.).
7. AI in Russian conditions: divers, inhibitors and the importance of cases. *Internet Edition About High Technologies — CNews*. 2023. (rus.).
8. Baduge S.K., Thilakarathna S., Perera J.S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio B. et al. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*. 2022; 141:104440. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104440
9. Brilakis I., Haas C.T.M. *Infrastructure computer vision*. Butterworth-Heinemann, 2019.
10. Abioye S.O., Oyedele L.O., Akanbi L., Ajayi A., Delgado J.M.D., Bilal M. et al. Artificial intelligence in the construction industry : a review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*. 2021; 44:103299. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103299
11. Gurina E.O., Lisin I.P. Future innovations in construction. *Technical Sciences: theory and practice : materials of the IV International Scientific Conference*. 2018; 43-44. EDN YNCKZN. (rus.).
12. Fang W., Zhong B., Zhao N., Love P.E.D., Luo H., Xue J. et al. A deep learning-based approach for mitigating falls from height with computer vision: Convolutional neural network. *Advanced Engineering Informatics*. 2019; 39:170-177. DOI: 10.1016/j.aei.2018.12.005
13. Agarwal S. 4 Artificial intelligence use cases that don't require a data scientist. *Forbes*. 2018.
14. Fedortsov R.A. Artificial intelligence is the future of management. *Student Scientific Forum 2021: materials of the International Student Scientific Conference*. 2021; VIII:130. (rus.).
15. Nenastev A. Problems and advantages of artificial intelligence in construction. *Digital Management in Construction*. 2023. (rus.).
16. Oluleye B.I., Chan D.W.M., Antwi-Afari P. Adopting Artificial Intelligence for enhancing the implementation of systemic circularity in the construction industry : a critical review. *Sustainable Production and Consumption*. 2023; 35:509-524. DOI: 10.1016/j.spc.2022.12.002
17. Love P.E.D., Fang W., Matthews J., Porter S., Luo H., Ding L. Explainable artificial intelligence (XAI): Precepts, models, and opportunities for research in construction. *Advanced Engineering Informatics*. 2023; 57:102024. DOI: 10.1016/j.aei.2023.102024
18. Anisiforov A.B., Anisiforova L.O. *Methods of evaluating the effectiveness of information systems and information technologies in business*. St. Petersburg, 2014. (rus.).
19. Torokhova K.E., Matveeva M.V. Economic efficiency and prospects for introducing information modelling technologies during the design stage in the building sector of a region. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023; 13(2):(45):192-201. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-2-192-201. EDN LMGVFF. (rus.).

Received January 4, 2024.

Adopted in revised form on July 4, 2024.

Approved for publication on July 4, 2024.

BIONOTES: Darya N. Shishkina — financier; Digital Artel; 4 Rimsky-Korsakov st., Moscow, 127566, Russian Federation; SPIN-code: 8857-3305, ORCID: 0009-0008-4648-7869; fin.control.id@gmail.com.

Методика оценки факторов, влияющих на эффективность реализации строительного проекта генподрядной организацией в направлении Fit-out

Тембот Хасанбиевич Бидов, Алан Олегович Хубаев,
Егор Александрович Помытко, Алина Дмитриевна Котельникова
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Спрос на услуги по организации внутреннего оформления помещений (Fit-out) в России в настоящий момент находится в стадии активного роста, поэтому исследования в данной области, направленные на повышение эффективности реализации проектов, являются актуальными. Несмотря на важность данного направления в нашей стране, в научном сообществе эта тема затронута лишь в области BIM-моделирования. Представлены этапы проведения исследования по выявлению зависимости выбора организационно-технологических решений генподрядной организацией на сроки реализации строительного проекта в области Fit-out.

Материалы и методы. Изучены литературные источники, научные публикации, интернет-ресурсы. Выполнен анализ проектно-сметной, производственной, организационно-технологической, исполнительной, тендерной, финансово-отчетной и иной документации, с которой связаны исследуемые факторы, влияющие на эффективность реализации строительного проекта генподрядной организацией в направлении Fit-out.

Результаты. Определена зависимость выявленных факторов и анализируемой документации. Установлен критерий результативности — срок реализации строительного проекта Fit-out. В качестве инструмента для оценки эффективности реализации строительного проекта принят комплексный показатель эффективности реализации строительного проекта Fit-out. Сформированная система станет основой для разработки методики определения эффективности реализации строительного проекта генподрядной организацией в направлении Fit-out.

Выводы. Завершенные проекты требуется оценить на достижение поставленных целей и качества работы компании. Данные оценки могут служить обратной связью для будущих проектов и улучшения процессов. Кроме того, с помощью этих оценок можно в процессе строительства вносить корректировки в организационно-технологические и управленческие решения для достижения поставленных целей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительный проект Fit-out, эффективность строительного проекта Fit-out, комплексный показатель эффективности реализации строительного проекта Fit-out, производственно-техническая документация, факторный анализ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бидов Т.Х., Хубаев А.О., Помытко Е.А., Котельникова А.Д. Методика оценки факторов, влияющих на эффективность реализации строительного проекта генподрядной организацией в направлении Fit-out // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1562–1569. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1562-1569

Автор, ответственный за переписку: Алан Олегович Хубаев, khubaevao@mgso.ru.

Methodology of evaluating of factors affecting the efficiency of construction project implementation by general contracting organization in Fit-out direction

Tembot Kh. Bidov, Alan O. Khubaev, Egor A. Pomytko, Alina D. Kotelnikova
*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The demand for interior design services (Fit-out) in Russia began to grow actively in recent years, so the research in this area, aimed at improving the efficiency of project implementation, is relevant. Despite the relevance of this direction in our country, in the scientific community the topic of interior design (Fit-out) is touched upon only in the field of BIM modelling. The stages of research on revealing the dependence of the choice of organizational and technological solutions by general contracting organization on the terms of construction project implementation in the direction of Fit-out are presented.

Materials and methods. Literary sources, scientific publications, Internet resources were studied. The analysis of design and estimate, production, organizational and technological, executive, tender, financial and reporting and other documen-

tation, with which the studied factors affecting the efficiency of construction project implementation by general contracting organization in the direction of Fit-out are connected, is carried out.

Results. The dependence of the identified factors and the analyzed documentation is determined. The performance criterion — the period of realization of the construction project Fit-out is established. As a tool for assessing the efficiency of construction project realization “Complex indicator of efficiency of construction project Fit-out” is accepted. The formed system will be the basis for the development of a methodology for determining the efficiency of construction project implementation by the general contracting organization in the direction of Fit-out.

Conclusions. Completed projects are required to be evaluated for achievement of the company's objectives and quality of work. These evaluations can serve as feedback for future projects and for process improvement. In addition, these evaluations can be used to make adjustments to organizational, technological and management decisions during the construction process to achieve goals.

KEYWORDS: Fit-out construction project, Fit-out construction project efficiency, Integrated performance indicator of Fit-out construction project implementation, production and technical documentation, factor analysis

FOR CITATION: Bidov T.Kh., Khubaev A.O., Pomytko E.A., Kotelnikova A.D. Methodology of evaluating of factors affecting the efficiency of construction project implementation by general contracting organization in Fit-out direction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1562-1569. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1562-1569 (rus.).

Corresponding author: Alan O. Khubaev, khubaevao@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Спрос на услуги по организации внутреннего оформления помещений (Fit-out) в России начал активно возрастать в 2000-х годах параллельно с появлением качественных офисных зданий на рынке. Изначально эта услуга пользовалась популярностью главным образом среди иностранных клиентов, открывающих свои представительства в России. С течением времени Fit-out стал востребован и ведущими российскими компаниями, которые в процессе строительства офисных помещений начали придавать большее значение качественным индивидуальным решениям. В настоящий момент рынок Fit-out стремительно развивается, в основном это связано с постоянным ростом числа участников, обладающих высокими профессиональными компетенциями, улучшением материалов, прогрессом в применяемых технологиях. Заказчики в свою очередь поднимают требования к получаемому продукту с учетом индивидуальных потребностей в адаптивности пространства офиса, в связи с чем повышаются требования, предъявляемые к качеству отделочных материалов, технологичности пространств и реализуемых генподрядчиком работ. В большинстве своем компании, находящиеся в рынке Fit-out, предоставляют следующий комплекс услуг: проектирование, строительство объекта, инженерно-техническое оснащение, внутреннюю чистовую отделку помещений. В данный момент наиболее значимые и большие проекты в данной сфере реализованы или находятся на стадии реализации в крупных городах с большим сосредоточением административно-деловой деятельности, таких как Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург и Казань¹.

В настоящее время актуальной темой для исследования в строительной отрасли является оценка эффективности реализации строительных проектов генподрядной организацией. Определение уровня эффективности поможет генподрядным организа-

циям достигать поставленных целей при реализации строительных проектов. Завершенные проекты необходимо оценить на достижение поставленных целей и качество работы компании. Данные оценки могут служить обратной связью для будущих проектов и улучшения процессов. Кроме того, с помощью этих оценок можно в процессе строительства вносить корректировки в организационно-технологические и управленческие решения для достижения поставленных целей. Несмотря на интерес в строительной сфере к проектам Fit-out, научных исследований в этой области в Российской Федерации мало [1–3]. Также зарубежное научное сообщество рассматривает указанную тематику лишь в рамках BIM-моделирования [4–6]. В связи с этим проводимое исследование по выявлению зависимости выбора организационно-технологических решений генподрядной организацией на сроки реализации строительного проекта в направлении Fit-out является в какой-то мере первопроходческим.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ранее опубликована работа, в которой были описаны факторы, оказывающие влияние на эффективность реализации строительного проекта генподрядной организацией в направлении Fit-out [7] (таблица).

Ввиду отсутствия единого комплексного подхода по организации работ генподрядной организации в направлении Fit-out был введен инструмент комплексной оценки эффективности реализации «Комплексный показатель эффективности строительного проекта Fit-out». В научном сообществе понятие комплексного подхода к решению поставленных задач применяется относительно недавно. Но этот подход активно используется в научных исследованиях [8–15]. Для определения качественных значений применен критерий срока производства работ [16, 17].

С целью решения поставленных задач по выявлению зависимости выбора организационно-техно-

¹ 10 фактов о Fit-out. URL: <https://cre.ru/analytics/32573>

Факторы, влияющие на эффективность реализации проекта Fit-out
Factors affecting the effectiveness of the Fit-out project

Прямые факторы Direct factors	Косвенные факторы Indirect factors
1. Квалификация сотрудников Staff qualifications	1. Наличие дополнительных работ Availability of additional work
2. Финансирование Financing	2. Условия обеспечения строительства материальными ресурсами Conditions of providing construction with material resources
3. Наличие собственных средств компании Availability of company's own funds	3. Наличие смежных подрядных организаций Availability of adjacent contracting organizations
4. Своевременная поставка материалов Timely delivery of materials	4. Проработка рабочей документации Development of working documentation
5. Использование средств механизации и автоматизации при производстве работ Use of mechanization and automation means in the production of works	5. Новое строительство или реконструкция New construction or reconstruction

логических решений на сроки реализации проекта в направлении Fit-out требуется проведение исследования, которое состоит в сборе необходимой информации по реализованным Fit-out генподрядными организациями для оценки согласно выявленным факторам [18–23].

Натурные исследования включают следующие этапы:

- 1. Разработка проекта программы и методики исследования.
- 2. Подготовка к исследованию.
- 3. Проведение исследования.
- 4. Обработка полученных результатов исследования.

Безусловно, исследуемые строительные объекты различны, поэтому для оценки эффективности следует выделить единый для всех параметр. Различия объектов обусловлены такими критериями, как *класс офиса, условия производства работ и формат реализации*. В России классификация офисных помещений сформулирована в 2006 г., она создавалась, полагаясь на западные тенденции, и подразумевает деление всех объектов офисного назначения на три категории: А (элит-класс), В (бизнес-класс) и С (эконом-класс). Касательно условий производства работ услуги Fit-out — это не обязательно работы в новом строительстве, такие работы часто реализуются в уже существующих

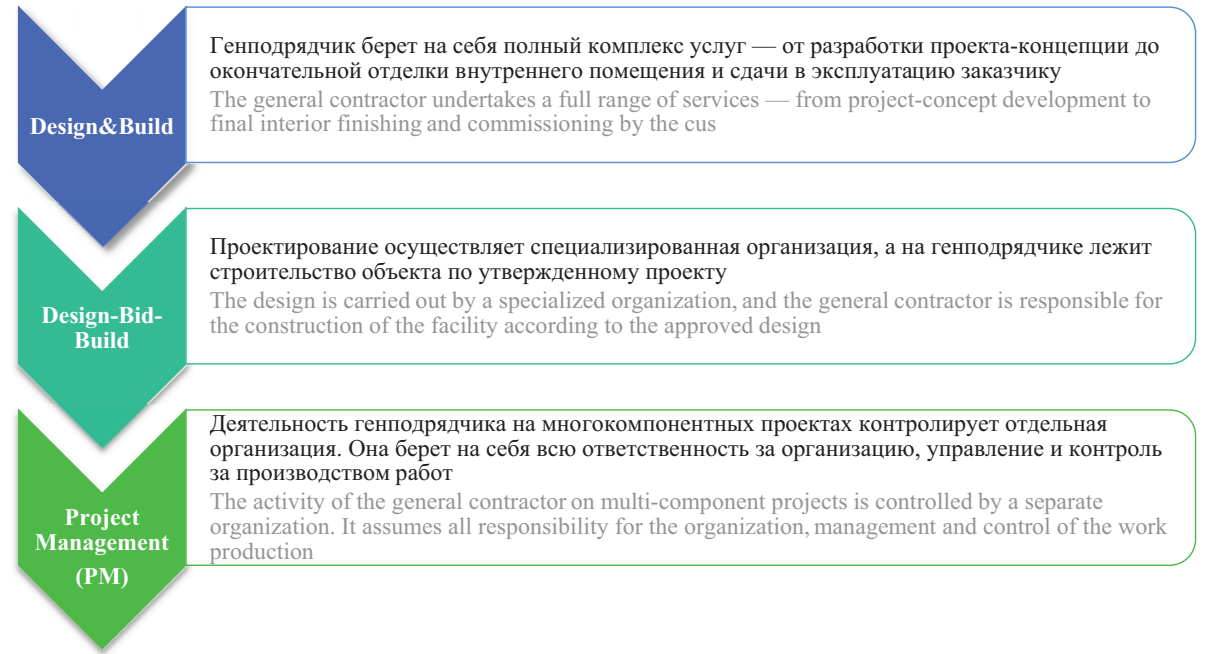


Рис. 1. Форматы реализации строительных проектов Fit-out
Fig. 1. Formats for the implementation of Fit-out construction projects

объектах недвижимости, что может значительно повлиять на сроки и сложность проекта. Современная услуга Fit-out предполагает три формата реализации услуги¹ (рис. 1):

1. Design&Build.
2. Design-Bid-Build.
3. Project Management (PM).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В создании единого параметра поможет ранее введенное понятие «комплексный показатель эффективности строительного проекта Fit-out», показывающий отношение планируемого срока производства работ к фактическому. За единицу измерения комплексного показателя эффективности строительного проекта Fit-out принимаются проценты. Применение данного метода позволяет организовать основу для проведения качественной и количественной оценки комплексного показателя эффективности строительного проекта Fit-out:

$$KP_{e.ct} = \frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{ф}}} \cdot 100 \%,$$

где $KP_{e.ct}$ — комплексный показатель эффективности строительного проекта Fit-out; $T_{\text{п}}$ — планируемый срок производства работ генподрядной организацией; $T_{\text{ф}}$ — фактический срок производства работ генподрядной организацией.

Далее подготовка к исследованию. Для этого необходимо обозначить критерии, которые нужно детально изучить:

- организационно-технологическая документация;
- проектно-сметная документация;
- исполнительная документация;
- производственная документация;
- список инженерно-технических работников (ИТР) и рабочих;
- договор подряда.

1. Организационно-технологическая документация:

- проект организации строительства (ПОС);
- проект производства работ (ППР) на основополагающие и трудозатратные процессы (конструктив, стяжка, устройство перегородок и т.д.). Анализируется степень проработанности, фирма-разработчик и сведения о ней, должности сотрудников, утвердивших в работу и согласовавших документ, инновационность технологий, автоматизация;
- контроль качества: существует входной, операционный и контроль качества готовой продукции, а также контроль за проектной и технологической документацией, который определяет целостность и полноту, наличие всех необходимых расчетов и сведений для производства работ, наличие исходных данных о конструкциях и их качестве;

- материально-техническое обеспечение (МТО). Наличие сведений об используемых механизмах и материалах;

- календарный график производства работ. Порядок производства и совмещение процессов, отставания или опережения;

- график поставки материалов. Отслеживание сроков поставки материалов в назначенный срок;

- график движения рабочей силы.

2. Проектно-сметная документация.

Проектно-сметная документация делится на 3 части:

- текстовая включает общие сведения об объекте, таблицы, пояснительную записку и отсылки к актуальным градостроительным стандартам, СП и действующему законодательству;

- графическая включает чертежи, макеты, схемы, модели, планы, отражающие инженерные решения;

- расчетная включает сметные расчеты на каждый блок проекта, которые в дальнейшем объединяются в сводный сметный расчет.

Следует оценить наполненность и проработку, достаточно ли сведений и расчетов для производства работ, фирму-разработчик и сведения о ней, опыт аналогичных реализованных проектов, должности сотрудников, утвердивших в работу и согласовавших документ.

3. Исполнительная документация.

Необходимо проанализировать протоколы испытаний, исполнительные схемы, акты освидетельствования скрытых работ, к которым приложены паспорта и сертификаты на материалы, подтверждающие качество и соответствие используемых материалов.

4. Производственная документация.

Для сбора данных проверке и анализу подвергались следующие документы:

- общий журнал работ. Применяется для отслеживания процесса производства работ, технологической последовательности, а также качества и условий производства строительных работ. Является основным первичным документом;

- журнал авторского надзора за строительством. Его оформляют для отображения нарушений или, наоборот, соответствия производства работ основным правилам и нормам;

- журнал входного учета и контроля материалов. Ведется для отслеживания поступающего на строительную площадку материала, его количества и качества, согласно документации на данные материалы.

5. Список ИТР и рабочих.

При составлении списков сотрудников происходит сбор сведений: ФИО, дата рождения, должность, полученное или получаемое образование, стаж работы, членство в национальных реестрах специалистов, наличие удостоверений о присвоении

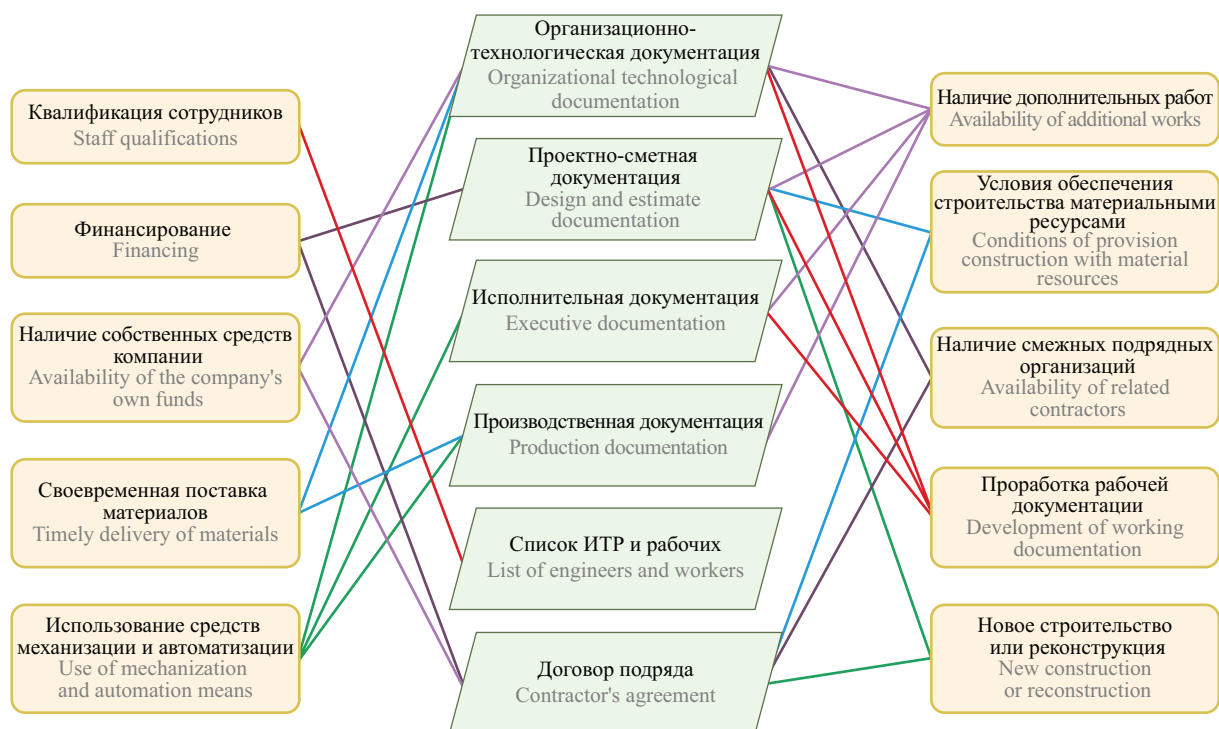


Рис. 2. Взаимосвязь производственно-технической документации и исследуемых факторов

Fig. 2. The relationship of production and technical documentation and the factors studied

ных квалификациях, наличие допусков на ведение работ, сертификаты повышения квалификации, дополнительное образование.

Для сбора данных об ИТР и рабочих рассматривалась следующая информация: ФИО, год рождения, должность, образование, опыт работы (стаж), членство в национальных реестрах специалистов, наличие квалификационных удостоверений и допусков, повышение квалификации, дополнительное образование.

6. Договор подряда.

Договором называется соглашение двух сторон, в котором одна обязуется выполнить работы по заданию, а другая сторона принять и оплатить данные работы. Необходимо проанализировать сроки производства, финансирование, сдачи работ, условия обеспечения материальными ресурсами, наличие номинированных и смежных подрядных организаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результатом стало описание методики оценки выявленных факторов по каждому проекту для дальнейшего определения комплексного показателя эффективности реализации строительного проекта Fit-out. Взаимосвязь производственно-технической документации и исследуемых факторов отражена на рис. 2.

Проведенный анализ позволил сформировать список документации для оценки каждого исследуемого фактора. В дальнейшем изучение этих документов поможет генподрядным организациям определить эффективность строительного проекта и даст возможность заранее предусмотреть исходы и достичь поставленных целей. Сформированная система будет основой для разработки методики определения комплексного показателя эффективности реализации строительного проекта Fit-out.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возгомент Н.В. Проблемы применения цифровых технологий в сфере Fit-out при организации бизнес-процессов предприятия // Анализ социально-экономического состояния и перспектив развития Российской Федерации : мат. 9-й Междунар. студ. науч.-практ. конф. 2023. С. 184–188. EDN RBPSEM.
2. Жеругов Р.А. Организационно-управленческие решения девелоперских проектов Fit-out офисной не-

движимости // Синергия Наук. 2020. № 54. С. 874–880. EDN PVSUUU.

3. Возгомент Н.В. Перспективы использования BIM-технологий в сфере Fit-out при моделировании бизнес-процессов организации предприятия // Актуальные проблемы управления — 2022 : мат. 27-й Междунар. науч.-практ. конференции. 2023. С. 19–23. EDN ZAHMOY.

4. Mota P., Machado F., Biotto C., Mota R., Mota B. BIM for production: Benefits and challenges for its application in a design-bid-build project // Annual Conference of the International Group for Lean Construction. 2019. DOI: 10.24928/2019/0243
5. Habib U., Nasir A., Ullah F., Qayyum S., Thahheem M. BIM Roles and responsibilities in developing countries: a dedicated matrix for design-bid-build projects // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 10. P. 1752. DOI: 10.3390/buildings12101752
6. Abou Chakra H., Ashi A. Comparative analysis of design/build and design/bid/build project delivery systems in Lebanon // Journal of Industrial Engineering International. 2019. Vol. 15. Issue S1. Pp. 147–152. DOI: 10.1007/s40092-019-00323-1
7. Бидов Т.Х., Котельникова А.Д. Систематизация факторов, влияющих на эффективность реализации строительного проекта генподрядной организацией в направлении Fit-out // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 1. С. 270–274. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-270-274. EDN MKHFGR.
8. Макаров А.Н. Организационно-технологический потенциал строительного производства кровельных конструкций жилых многоэтажных зданий : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 180 с. EDN KYFYKO.
9. Муря В.А. Оптимизация организации процесса возведения конструктивных элементов монолитных зданий на основе комплексного показателя качества организационно-технических решений : дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 192 с. EDN WYTCYJ.
10. Фатуллаев Р.С. Организационно-технологическое моделирование комплексной оценки потенциала проведения внеплановых ремонтных работ : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 103 с. EDN DHVANY.
11. Ланидус А.А. Потенциал эффективности организационно-технологических решений строительного объекта // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 175–180. EDN RTUKMV.
12. Бидов Т.Х. Повышение эффективности системы контроля качества монолитных конструкций неразрушающими методами при организации строительства жилых зданий : дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 145 с. EDN CDZBRF.
13. Хубаев А.О. Совершенствование производственного процесса зимнего бетонирования на основе потенциала организационно-технических решений : дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 178 с. EDN UUSXIE.
14. Ланидус А.А., Тончий Д.В., Фатуллаев Р.С., Шестерикова Я.В., Бидов Т.Х. Организационно-технологическое моделирование комплексной оценки потенциала проведения внеплановых ремонтных работ. М. : Изд-во АСВ, 2023. 89 с. EDN EHCBCN.
15. Ланидус А.А., Муря В.А. Комплексный показатель качества организационно-технологических решений при возведении конструктивных элементов железобетонных зданий // Строительное производство. 2020. № 2. С. 3–9. DOI: 10.54950/26585340_2020_2_3. EDN QMABHQ.
16. Lapidus A., Khubaev A., Bidov T. Development of a three-tier system of parameters in the formation of the organizational and technological potential of using non-destructive testing methods // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 06037. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706037
17. Khubaev A.O. Determination of the effectiveness of the production process of winter concreting based on field studies // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 389. P. 06012. DOI: 10.1051/e3sconf/202338906012
18. Fatullaev R. Organizational-technological modeling of a multi-apartment residential house where overhaul is planned // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 06035. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706035
19. Fatullaev R. Modeling and assessment of a multi-apartment residential house with a planned overhaul // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 110. P. 02157. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002157
20. Topchiy D., Shatrova A., Yurgaytis A. Integrated construction supervision as a tool to reduce the developer's risks when implementing new and redevelopment projects // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. P. 05032. DOI: 10.1051/matecconf/201819305032
21. Topchiy D., Bolotova A. Systematization of factors affecting the organizational processes in the conversion of buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Issue 3. P. 032042. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032042
22. Oleinik P., Kuzmina T. Modelling the reduction of project making duration // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 117. P. 00129. DOI: 10.1051/matecconf/201711700129
23. Lapidus A., Topchiy D., Kuzmina T., Bolshakova P. Modelling the stages of pre-project preparation and design development in the life-cycle of an investment and construction project // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 23. P. 12401. DOI: 10.3390/app122312401

Поступила в редакцию 22 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 14 августа 2024 г.

Одобрена для публикации 14 августа 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Тембот Хасанбиевич Бидов — кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и организации строительного производства; директор Научно-образовательного центра «Конструкции, техно-

логии и организация строительства»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1021788, Scopus: 57195235334, ResearchID: НКО-9186-2023; bidovth@mgsu.ru;

Алан Олегович Хубаев — кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и организации строительного производства, ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра «Конструкции, технологии и организация строительства»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 811024, Scopus: 57195226934, ResearcherID: НКО-9157-2023; ORCID: 0000-0003-0117-1541; khubaevao@mgsu.ru;

Егор Александрович Помытко — аспирант кафедры испытаний сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; 2282039@mail.ru;

Алина Дмитриевна Котельникова — студентка; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kotelnikovaad@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vozgoment N.V. Problems of using digital technologies in the field of Fit-out when organizing business processes of an enterprise. *Analysis of the socio-economic state and development prospects of the Russian Federation : materials of the 9th International Student Scientific-practical conference*. 2023; 184-188. EDN RBPSEM. (rus.).
2. Zherugov R.A. Organizational and management solutions for Fit-out office real estate development projects. *Synergy Sciences*. 2020; 54:874-880. EDN PVSUUU. (rus.).
3. Vozgoment N.V. Prospects for the use of BIM technologies in the field of Fit-out when modeling business processes of enterprise organization. *Actual problems of management — 2022 : proceedings of the 27th International Scientific and Practical Conference*. 2023; 19-23. EDN ZAHMOY. (rus.).
4. Mota P., Machado F., Biotto C., Mota R., Mota B. BIM for production: Benefits and challenges for its application in a design-bid-build project. *Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 2019. DOI: 10.24928/2019/0243
5. Habib U., Nasir A., Ullah F., Qayyum S., Thaeem M. BIM roles and responsibilities in developing countries: a dedicated matrix for design-bid-build projects. *Buildings*. 2022; 12(10):1752. DOI: 10.3390/buildings12101752
6. Abou Chakra H., Ashi A. Comparative analysis of design/build and design/bid/build project delivery systems in Lebanon. *Journal of Industrial Engineering International*. 2019; 15(S1):147-152. DOI: 10.1007/s40092-019-00323-1
7. Bidov T.Kh., Kotelnikova A.D. Systematization of factors affecting the efficiency of the implementation of a construction project by a general contractor in the direction of Fit-out. *Izvestiya Tula State University*. 2023; 1:270-274. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-270-274. EDN MKHFGR. (rus.).
8. Makarov A.N. *Organizational and technological potential of the construction production of roofing structures of residential multi-storey buildings : dis. ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2018; 180. EDN KYFYKO. (rus.).
9. Murya V.A. *Optimization of the organization of the process of erecting structural elements of monolithic buildings based on a complex indicator of the quality of organizational and technical solutions : dis. ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2022; 192. EDN WYTCYJ. (rus.).
10. Fatullaev R.S. *Organizational and technological modeling of a comprehensive assessment of the potential for carrying out unscheduled repair work : dis. ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2017; 103. EDN DHVAHY. (rus.).
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. EDN RTUKMV. (rus.).
12. Bidov T.Kh. *Increasing the efficiency of the quality control system for monolithic structures using non-destructive methods when organizing the construction of residential buildings : dis. ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2020; 145. EDN CDZBRF. (rus.).
13. Khubaev A.O. *Improving the production process of winter concreting based on the potential of organizational and technical solutions : dis. ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2022; 178. EDN UUSXIE. (rus.).
14. Lapidus A.A., Topchiy D.V., Fatullaev R.S., Shesterikova Ya.V., Bidov T.Kh. *Organizational and technological modeling of a comprehensive assessment of the potential for unscheduled repair work*. Moscow,

ASV Publishing House, 2023; 89. EDN EHCBCN. (rus.).

15. Lapidus A.A., Muria V.A. Comprehensive indicator of quality of organizational-technological decisions in the construction of construction elements of reinforced concrete buildings. *Construction Production*. 2020; 2:3-9. DOI: 10.54950/26585340_2020_2_3. EDN QMABHQ. (rus.).

16. Lapidus A., Khubaev A., Bidov T. Development of a three-tier system of parameters in the formation of the organizational and technological potential of using non-destructive testing methods. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:06037. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706037

17. Khubaev A.O. Determination of the effectiveness of the production process of winter concreting based on field studies. *E3S Web of Conferences*. 2023; 389:06012. DOI: 10.1051/e3sconf/202338906012

18. Fatullaev R. Organizational-technological modeling of a multi-apartment residential house where overhaul is planned. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:06035. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706035

19. Fatullaev R. Modeling and assessment of a multi-apartment residential house with a planned overhaul. *E3S Web of Conferences*. 2019; 110:02157. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002157

20. Topchiy D., Shatrova A., Yurgaytis A. Integrated construction supervision as a tool to reduce the developer's risks when implementing new and redevelopment projects. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:05032. DOI: 10.1051/matecconf/201819305032

21. Topchiy D., Bolotova A. Systematization of factors affecting the organizational processes in the conversion of buildings. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 753(3):032042. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032042

22. Oleinik P., Kuzmina T. Modelling the reduction of project making duration. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00129. DOI: 10.1051/matecconf/201711700129

23. Lapidus A., Topchiy D., Kuzmina T., Bolshakova P. Modelling the stages of pre-project preparation and design development in the life-cycle of an investment and construction project. *Applied Sciences*. 2022; 12(23):12401. DOI: 10.3390/app122312401

Received February 22, 2024.

Adopted in revised form on August 14, 2024.

Approved for publication on August 14, 2024.

B I O N O T E S : **Tembot Kh. Bidov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, Director of the Scientific and Educational Center “Structures, Technologies and Construction Organization”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1021788, Scopus: 57195235334, ResearcherID: HKO-9186-2023; bidovth@mgsu.ru;

Alan O. Khubaev — Associate Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, leading researcher of the Scientific and Educational Center “Structures, Technologies and Organization of Construction”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 811024, Scopus: 57195226934, ResearcherID: HKO-9157-2023; ORCID: 0000-0003-0117-1541; khubaevao@mgsu.ru;

Egor A. Pomytko — postgraduate student of the Department of Testing of Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; 2282039@mail.ru;

Alina D. Kotelnikova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kotelnikovaad@mail.ru.

Contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. 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 источников 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 инициал*

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.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже

известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

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 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотаций.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы 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, указы-

вают, 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.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

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

И з в е щ е н и е

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

 БИК

004525988

КБК

0000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2024 г.

(наименование платежа)

Вестник МГСУ

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О
плательщика _____

Адрес
плательщика _____

Сумма
платежа

3 822

 руб.

00

 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги
банка, ознакомлен и согласен.

Подпись
плательщика _____

Квитанция

Кассир

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в

ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

 БИК

004525988

КБК

0000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель,
май, июнь 2024 г.

(наименование платежа)

Вестник МГСУ

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О
плательщика _____

Адрес
плательщика _____

Сумма
платежа

3 822

 руб.

00

 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги
банка, ознакомлен и согласен.

Подпись
плательщика _____

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



