

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 16. Выпуск 2
2021**

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

Сквозной номер 149

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 16. Issue 2
2021**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 23-93
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	24.02.2021.
Подписан в свет	26.02.2021.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,04. Тираж 100 экз. Заказ № 14

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

Павел Алексеевич Акимов, д-р техн. наук, проф., академик РААСН, 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

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

Анвер Идрисович Бурханов, д-р физ.-мат. наук, доц., зав. каф. физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Российская Федерация

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

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

Йозеф Вичан, д-р, проф., Университет Жилина, Словацкая Республика

Забигнев Вуйчицки, д-р, проф., Вроцлавский технологический университет, Республика Польша

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

Милан Голицки, д-р, 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

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

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

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

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

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

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

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

Светлана Васильевна Самченко, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Технологии вяжущих веществ и бетонов, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Корректор: *Любовь Владимировна Светличная*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Дизайн и верстка: *Ольга Григорьевна Горюнова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

Юрий Михайлович Баженов, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии вяжущих веществ и бетонов, 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, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р архитектуры, проф., директор, Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «ЦНИИП Минстроя России» Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ), Москва, Российская Федерация

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

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

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

Александр Витальевич Гинзбург, д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, НИУ МГСУ, 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. кафедры 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» (НИУ «МЭИ»), 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, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительной механики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Российская Федерация

Рашид Абдуллоевич Мангушев, д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Владимир Львович Мондрус, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН, 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

Екатерина Владимировна Нежникова, д-р экон. наук, доц., проректор, зав. каф. экономики и управления в строительстве, 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., зав. каф. водоснабжения и водоотведения, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Евгений Иванович Пупырев, почетный член Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., консультант каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, 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, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., проф., 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., академик и вице-президент РААСН, 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, профессор, 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

Павел Александрович Хаванов, д-р техн. наук, проф., проф. каф. теплогоснабжения и вентиляции, НИУ МГСУ, Москва, 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:	26.02.2021

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)", 2021

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

Anver I. Burkhanov, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Anna A. Dyadicheva* **Corrector:** *Lyubov' V. Svetlichnaya*

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

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

Chairman of the Editorial Board

Alexander R. Tushin, 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

Yuri M. Bazhenov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

Alexander V. Ginzburg, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Pavel A. Havanov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 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

Ekaterina V. Nezhnikova, 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

Evgeny I. Pupyrev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 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

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

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

Yas'kova N. Yur'evna, 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

- Е.А. Хорошавин*
Динамические испытания административного здания «Красноярскгражданпроект» в г. Красноярск 128
- Г.П. Тонких, Д.А. Чесноков*
Экспериментальное исследование сдвигового соединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий на угловых анкерных упорах 144
- А.А. Соловьева, С.А. Соловьев*
Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков 153
- З.Г. Тер-Мартirosян, А.С. Акулецкий*
Взаимодействие свай большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами 168

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Н.С. Ступень, А.В. Каклюгин, Л.И. Касторных, В.В. Коваленко*
Повышение воздухоустойкости прессованных композитов на основе магнезиального вяжущего 176

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

- Е.А. Сухина*
Строительство зданий из вторичного сырья с учетом требований экологических стандартов 186

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

- А.А. Подвысоцкий, М.П. Саинов, А.Ю. Кириченко*
Сравнение работоспособности типов грунтовой плотины для условий Муллалакской ГЭС 202

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

- Д.А. Власов, А.О. Габриелов*
Система ключевых индикаторов рисков изменения капитальных затрат инвестиционно-строительного проекта 220

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

- И.Л. Шубин*
Рецензия на комплекс научных трудов и методических работ, формирующих научно-методологическое и методическое обеспечение цикла образовательных программ в области технической эксплуатации зданий и инженерных систем (авторский коллектив: Король Е.А., Римшин В.И., Спицов Д.В., Король О.А., Шеина С.Г.) 242
- Требования к оформлению научной статьи 244

CONTENTS

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

Evgeniy A. Khoroshavin
Dynamic testing of Krasnoyarskgrazhdanproekt office building in Krasnoyarsk. 128

Gennadij P. Tonkih, Denis A. Chesnokov
An experimental study of a shear connection of steel- reinforced concrete slabs with angle shear studs 144

Anastasia A. Soloveva, Sergey A. Solovev
Reliability analysis of steel planar trusses based on p-box models 153

Zaven G. Ter-Martirosyan, Aleksandr A. Akuletskii
Interaction between a long pile and multi-layer underlying soils 168

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Nonna S. Stupen, Alexandr V. Kaklyugin, Luybov I. Kastornykh, Viktor V. Kovalenko
Using a magnesia binder to improve the airproof performance of molded composites 176

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Elena A. Sukhinina
Using secondary raw materials in construction of buildings with account taken of environmental standards 186

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Aleksei A. Podvysotskii, Mikhail P. Sainov, Andrey Yu. Kirichenko
Performance comparison of various types of embankment dams in relation to the conditions of the Mullalakh HPP 202

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION.

Dmitry A. Vlasov, Alexander O. Gabrielov
A system of key indicators enabling the forecasting of changes in the capital costs of a construction project. 220

SHORT MESSAGES. DISCUSSIONS AND REVIEWS. INFORMATION

I.L. Shubin
A review of a set of research and methodological works that serve as the scientific-methodological and teaching support for a succession of education programmes in technical maintenance of buildings and utility systems 242

Requirements for research paper design 244

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:

- 05.02.22 — Организация производства (строительство) (технические науки);
- 05.23.01 — Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 05.23.02 — Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 05.23.03 — Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки);
- 05.23.04 — Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки);
- 05.23.05 — Строительные материалы и изделия (технические науки);
- 05.23.07 — Гидротехническое строительство (технические науки);
- 05.23.08 — Технология и организация строительства (технические науки);
- 05.23.16 — Гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);
- 05.23.17 — Строительная механика (технические науки);
- 05.23.19 — Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки);
- 05.23.20 — Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (технические науки, архитектура);
- 05.23.21 — Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки, архитектура);
- 05.23.22 — Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки, архитектура);
- 08.00.05 — Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (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.

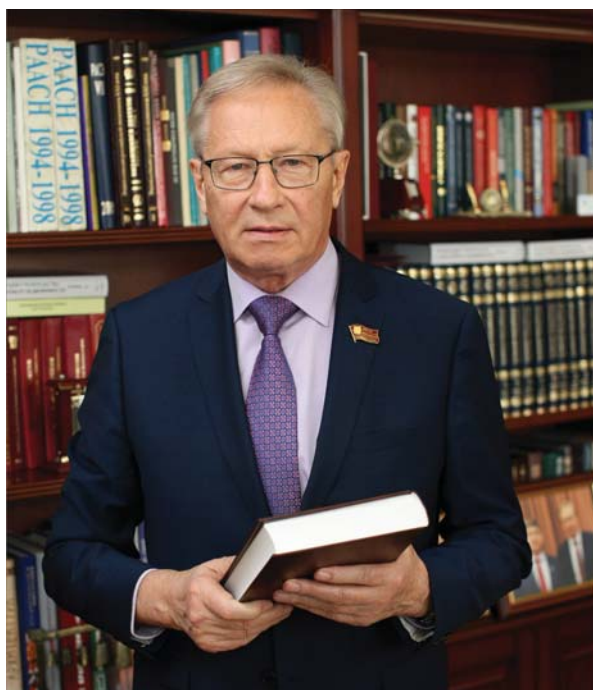
The review copies or substantiated refusals from publication are provided to the authors and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (upon request). The reviews are deposited in the editorial office for 5 years.

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).

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Дорогие друзья и коллеги! Поздравляю вас с Днем российской науки!

**Dear colleagues and friends,
I'd like to extend my congratulations on Russian Science Day!**



Согласно Указу Президента России, 2021 год в нашей стране объявлен Годом науки и технологий. Государство не может быть сильным без сильной науки, поэтому нам так важно развивать и поддерживать различные научные направления.

Самым ярким достижением российских ученых в последнее время, безусловно, является разработка в кратчайшие сроки вакцины против коронавирусной инфекции. Это — настоящий прорыв в борьбе со страшной болезнью.

Как человек, всю жизнь посвятивший строительной науке, должен отметить, что в данной сфере также происходят существенные изменения. Совершенствуются строительное материаловедение и технологии, цифровизация, экологическое строительство, моделирование строительных систем.

Для внедрения современных технологий важно взаимодействие научного сообщества с производством, бизнесом и обществом. Результатом этого взаимодействия в строительной отрасли становятся такие знаковые объекты, как спортивные комплексы, построенные к Олимпиаде, Крымский мост, дорожное строительство в регионах, возведение высотных и сверхвысотных зданий, атомных электростанций. Много уникальных зданий строится в Московском регионе.

Сегодня в научную сферу активно идет молодежь. Это отраднo, поскольку есть кому передать свои знания, опыт, идеи. Подготовка высококвалифицированных кадров осуществляется в профильных архитектурно-строительных университетах.

Поздравляю всех с праздником! Желаю профессиональных побед и новых открытий!

*Главный редактор В.И. Теличенко,
почетный президент НИУ МГСУ,
доктор технических наук, профессор, академик РААСН*

*Editor-in-Chief Valery I. Telichenko,
Academician, Moscow State University of Civil Engineering
(National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation*

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

УДК 69.058

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.128-143

Динамические испытания административного здания «Красноярскгражданпроект» в г. Красноярск

Е.А. Хорошавин

*Красноярский институт железнодорожного транспорта —
филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС);
г. Красноярск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Экспериментальные методы исследований колебаний зданий и сооружений (динамические испытания) позволяют определять индивидуальный комплекс параметров динамических характеристик собственных колебаний, присущий каждому зданию и сооружению. Для выявления динамических характеристик выбран метод стоячих волн, предоставляющий возможность получить подробную (с требуемой степенью детальности) и, главное, достоверную картину технического состояния здания.

Материалы и методы. Регистрация микросейсмических колебаний конструкций здания осуществлялась мобильным диагностическим комплексом «Метод стоячих волн» (МСВ). Была определена схема расстановки датчиков с одной опорной точкой. Для обработки данных регистрации микросейсмических колебаний здания разработан программный комплекс, реализующий метод стоячих волн. Для выделения собственных частот здания рассчитаны спектры когерентности колебаний. Построена геоинформационная система (ГИС)-модель для представления амплитуд и фаз колебаний здания.

Результаты. Определены собственные частоты, пиковые амплитуды и фазовые характеристики волнового поля здания. Построены схемы распределения амплитуд и карты фаз колебаний. Обнаружены зоны деструктивных процессов в кирпичной кладке несущих стен здания и установлены причины их возникновения.

Выводы. По результатам динамических испытаний административного здания получены его динамические характеристики. Анализ распределения этих параметров позволил оценить техническое состояние здания и дать рекомендации по его усилению. Намечены перспективы использования мобильного диагностического комплекса на основе метода стоячих волн для решения самого широкого спектра задач.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод стоячих волн, динамические испытания зданий, динамические характеристики зданий, сейсмоприемник, регистратор аналоговых сигналов, регистрация микросейсмических колебаний

Благодарности. Автор выражает особую благодарность в проведении данных исследований кандидату технических наук, заведующему лабораторией геодинамических и экологических рисков Красноярского филиала Института вычислительных технологий СО РАН — Специального конструкторско-технологического бюро «Наука» (СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН) С.А. Перетокину.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Хорошавин Е.А. Динамические испытания административного здания «Красноярскгражданпроект» в г. Красноярск // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 128–143. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.128-143

Dynamic testing of Krasnoyarskgrazhdanproekt office building in Krasnoyarsk

Evgeny A. Khoroshavin

*Krasnoyarsk Institute of Railway Transport — branch Irkutsk State Transport University;
Krasnoyarsk, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Experimental methods for studying vibrations of buildings and structures (dynamic tests) make it possible to determine an individual set of parameters of dynamic characteristics of natural vibrations inherent in each building and structure. The method of standing waves was chosen to determine dynamic characteristics; it allows to obtain detailed (with the required degree of detail) and, most importantly, reliable data on the technical condition of the building.

Materials and methods. Mobile diagnostic unit “Standing Wave Method” (MSW) recorded the micro-seismic vibrations of building constructions. The layout of sensors with a single reference point was chosen. The standing wave method was

applied to develop the software package in order to process the micro-seismic vibrations of the building. Vibration coherence spectra were analyzed to identify the natural frequencies of the building. A GIS model was developed to demonstrate the amplitudes and phases of vibrations in the building.

Results. Eigenfrequencies, peak amplitudes, and phase characteristics of the building's wave field were determined. Patterns of distribution of amplitudes and maps of vibration phases were constructed. Areas, accommodating destructive processes in the brickwork of the building's bearing walls, were identified and the reasons for their occurrence were established.

Conclusions. The dynamic characteristics of the building were obtained in reliance upon the results of dynamic tests of the office building. The analysis of the distribution of these parameters allowed to assess the technical condition of the building and to make recommendations towards its strengthening. The author suggests that the mobile diagnostic system, employing the standing wave method, can be used to resolve a wide range of problems.

KEYWORDS: method of standing waves, dynamic testing of buildings, dynamic characteristics of buildings, geophone, analog signal recorder, recording of micro-seismic vibrations

Acknowledgments: The author expresses his special gratitude to S.A. Peretokin, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Geodynamic and Environmental Risks of the Krasnoyarsk Branch of the Institute of Computational Technologies SB RAS — Special Design and Technology Bureau "Science" for his assistance in this research.

FOR CITATION: Khoroshavin E.A. Dynamic testing of Krasnoyarskgrazhdanproekt office building in Krasnoyarsk. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(2):128-143. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.128-143 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Механическая безопасность и надежность строительных объектов определена требованиями Федерального закона¹ и обеспечивается рядом стандартов^{2, 3} и нормативных⁴ документов. Оценка технического состояния зданий и сооружений на основании стандарта² производится инструментальными методами обследования неразрушающего контроля и диагностики состояния строительных конструкций⁵ [1–6]. В этом случае физико-механические свойства материалов конструкций и фундаментов здания, а также их состояние оцениваются по ограниченной зоне проведения измерений. Для установления интегральных прочностных характеристик зданий и сооружений используют экспериментальные методы исследований колебаний зда-

ний и сооружений (динамические испытания)^{6, 7, 8, 9} [7–15], позволяющие выявлять индивидуальный комплекс параметров динамических характеристик собственных колебаний, присущий каждому зданию и сооружению. Именно эти параметры определяют структуру и состояние конструкций здания и дают возможность оценить его техническое состояние [16–24].

Методы исследования собственных колебаний зданий можно разделить на испытания зданий:

- ударом (внешней импульсной нагрузкой);
- быстрым освобождением нагрузки (оттягиванием угла здания);
- вибромашинами;
- вибраторами, размещенными за пределами здания;
- промышленными взрывами;
- на воздействие землетрясений;
- на воздействие микросейсмических колебаний.

Все эти методы, разработанные для установления динамических характеристик зданий, имеют свои достоинства и недостатки и различаются

⁶ Савин С.Н. Техническая диагностика прочностных характеристик зданий и сооружений на основе анализа форм их собственных колебаний // МО РФ. 2006. 141 с.

⁷ Bol'shakov V.I., Chaika A.L., Sushchev S.P., Suslonov A.A., Yur'yev A.B., Bugaev S.F., Panchokha G.V., Borodulin A.V. New methods for monitoring the technical state of blast furnace enclosure without stopping the technological process // Refractories and industrial ceramics. 2007. Vol. 48. No. 3. Pp. 178–182. DOI: 10.1007/s11148-007-0055-z

⁸ Динамические испытания строительных материалов конструкций и сооружений / под ред. А.И. Звягинцева // Труды ЦНИИС. М., 2000. Вып. 202. 156 с.

⁹ Коробко В.И., Коробко А.В. Контроль качества строительных конструкций: виброакустические технологии: учебное пособие. М.: Изд-во АСВ, 2003. 288 с.

¹ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384. Ст. 16 : Требования к обеспечению механической безопасности здания или сооружения.

² ГОСТ 31937-2011. «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» (введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27.12.2012 № 1984-ст).

³ ГОСТ 34081-2017. Здания и сооружения. Определенные параметры основного тона собственных колебаний (введен в действие с 01.11.2017 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19.10.2017 № 1449-ст).

⁴ СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. 2003. 60 с.

⁵ Золотков А.С. Диагностика физического состояния зданий по их динамическим характеристикам // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010. № 6. С. 32–34.

по точности и детальности получаемых результатов^{9, 10, 11, 12} [25–29].

Преимущество испытаний зданий с использованием микросейсмических шумов заключается в том, что нет затрат на возбуждение колебаний. Это — самый дешевый метод, однако, принято было считать, что результаты, полученные на микросейсмических шумах, уступают по точности всем остальным методам. Когда появились трехкомпонентные акселерометры высокой чувствительности (от 100 мВ/(м/с²)) и стали развиваться технологии цифровой обработки сигнала, получил развитие метод свободных колебаний. Во Всероссийском научно-исследовательском институте по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России были разработаны мобильные диагностические комплексы «Струна» и «Стрела» для оценки сейсмостойкости и диагностики зданий и сооружений^{13, 14, 15, 16} [30–33].

Идея метода заключается в определении динамических параметров свободных колебаний от воздействия внешней импульсной нагрузки на конструкцию. Анализируются спектры Фурье для выделения собственных форм колебаний. Дан-

ный метод является измерением реакции линейной системы на широкополосное воздействие, широко применяется в практике [1, 2, 8, 9, 18, 34–37]. Однако имеет невысокую точность и детальность получаемых результатов.

Другой способ, получивший название метод стоячих волн, разработан Геофизической службой Сибирского отделения Российской академии наук (ГС СО РАН, доктор технических наук А.Ф. Еманов)^{17, 18, 19, 20, 21} [38–44]. Метод предназначен для детального изучения состояния зданий и сооружений на уровне элементов конструкций. Он позволяет выявлять динамические параметры множества собственных волн здания, а не одной, как в других методах. Это — единственный метод, который определяет фазовые параметры поля стоячих (собственных) волн. Он дает возможность получать информацию о скрытых дефектах здания.

Идея метода стоячих волн состоит в том, что ограниченное количество датчиков, регистрирующих микросейсмические колебания, перемещается по конструкциям для определения собственных (стоячих) волн в зданиях и сооружениях любой сложности. Количество точек регистрации зависит от поставленной задачи и может быть выбрано любое. Другими словами, малоканальной аппаратурой (используя десять датчиков) можно обследовать гидроэлектростанции, мосты, высотные здания и т.д. [30, 31, 45–49].

Следует отметить, что в этом методе принята линейная модель связи волновых полей в двух точках объекта на основании свойства когерентности стоячих волн, позволяющей выявить любые нелинейности в рассматриваемом объекте (деструктивные изменения в свойствах грунта основания и де-

¹⁰ Еманов А.Ф. Восстановление когерентных составляющих волновых полей в сейсмике : дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2004. 280 с.

¹¹ Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. № 3. С. 20–24.

¹² Леви К.Г., Бержинский Ю.А. Экспериментальные исследования сейсмостойкости зданий и сооружений в Прибайкалье // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. № 1. С. 13–16.

¹³ Бержинский Ю.А., Чернов Н.Б., Павленов В.А. Использование сейсмозрывных и вибрационных испытаний опытных объектов для оценки повреждаемости зданий в Восточной Сибири // Вопросы инженерной сейсмологии. 2008. Т. 35. № 2. С. 68–75.

¹⁴ Ларионов В.И., Нигметов Г.М., Сотин В.Н., Суццев С.П., Шахраманьян М.А. Мобильные диагностические комплексы для оценки сейсмостойкости зданий и сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 1999. № 2. С. 41–43.

¹⁵ Гордеева О.Г., Суццев С.П. Современные средства диагностики технического состояния зданий и сооружений // Комплексная безопасность России — исследования, управление, опыт : Международный симпозиум, сборник материалов. М. : ВНИИ ГОЧС. 2002. С. 98–99.

¹⁶ Котляревский В.А., Суццев С.П., Ларионов В.И., Перепелицын А.И. Применение мобильных диагностических комплексов для оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса зданий и сооружений // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 3. С. 42–45.

¹⁷ Emanov A.F. On application of vibrators for determination of seismic stability of buildings and in microseismic regionalization // Russian Geology and Geophysics. 1995. Vol. 36. No. 7. Pp. 84–90.

¹⁸ Seleznev V.S., Emanov A.F. Conversion of head-wave fields by the wiener filters // Russian geology and geophysics. 1998. Vol. 39. No. 4. Pp. 548–559.

¹⁹ Emanov A.F., Seleznev V.S., Bach A.A., Gritsenko S.A., Danilov I.A., Kuzmenko A.P., Saburov V.S., Tatkov G.I. Standing waves in engineering seismology // Russian geology and geophysics. 2002. Vol. 43. No. 2. Pp. 181–196.

²⁰ Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчет стоячих волн при детальных инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 2. С. 192–207.

²¹ Emanov A.F., Krasnikov A.A., Bakh A.A., Seleznev V.S. Standing waves in buildings and engineering constructions // European conference on earthquake engineering. Ohrid : Macedonia Association for Earthquake Engineering, 2010. P. 900.

фекты, трещины в конструкциях здания), используя для этого анализ изменений в частотных, амплитудных и фазовых характеристиках поля стоячих волн исследуемого объекта.

Особенностью поля собственных (стоячих) волн конструкций здания служит то, что именно эти колебания определяют внутреннюю структуру здания и состояние его конструкций. Собственные колебания здания — это набор стоячих волн, динамические характеристики которых индивидуальны для каждого здания и не зависят ни от времени, ни от внешних воздействий. Они являются реакцией объекта на любые внешние воздействия, которые приходят на него через фундамент (микросейсмы) или стены (ветровая нагрузка). Динамические параметры здания зависят от свойств основания и фундаментов, от массы и жесткостных характеристик конструкций, от вида и качества узловых соединений элементов конструкций. Изменение этих свойств в процессе эксплуатации приводит к соответствующим изменениям динамических параметров здания. Анализ полученных частотных, амплитудных и фазовых характеристик волнового поля позволяет установить наличие изменений в свойствах грунта основания и дефектов в конструкциях здания, возникающих в процессе его эксплуатации, а также дать оценку его технического состояния. Данная технология уникальна и не имеет аналогов за рубежом.

Цели данного исследования в результате проведения динамических испытаний здания на основе метода стоячих волн:

- определение основных динамических характеристик здания (частот и форм собственных колебаний, амплитуд и фаз, характеристик затухания колебаний) на плотной системе измерений;
- получение распределения динамических характеристик собственных колебаний по конструктивным элементам здания;
- выявление опасных зон и слабых мест (дефектов и трещин) в здании;

- получение подробной (с требуемой степенью детальности) достоверной картины технического состояния здания.

Технология проведения динамических испытаний здания на основе метода стоячих волн требует решения следующих задач:

- определения схемы расстановки регистрирующих датчиков;
- проведения последовательной регистрации сейсмических микрошумов малоканальной аппаратурой на всех несущих элементах конструкций здания. Регистрация ведется в непрерывном режиме с одной или несколькими опорными точками;
- обработки данных регистрации микросейсмических колебаний конструкций здания;
- построения 3D геоинформационной системы (ГИС) — модели для представления амплитуд и фаз полей собственных колебаний здания и его конструктивных элементов;
- построения спектров когерентности и спектров погрешности для выделения собственных частот параметров поля стоячих (собственных) волн и их форм колебаний, позволяющих выявить дефекты и слабые места в конструкциях здания;
- анализа распределения динамических параметров волнового поля по конструктивным элементам здания для оценки технического состояния здания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Динамические испытания проводились на административном здании «Красноярскгражданпроект». Конструктивная система здания стеновая. Несущие стены кирпичные, перекрытия железобетонные. В здании пять этажей. Верхний этаж не типовый с высотой этажа 4 м, на нем расположены три большие проектные мастерские зального типа. В процессе эксплуатации на верхних этажах здания появились трещины в кирпичной кладке простенков (рис. 1).



Рис. 1. Разрушение кирпичной кладки по оси 5 в уровне 2-го этажа

Fig. 1. Brickwork destruction along axis 5 at the level of the 2nd floor

Регистрация микросейсмических колебаний конструкций здания осуществлялась мобильным диагностическим комплексом «Метод стоячих волн» (МСВ) (рис. 2) [12, 20, 21]. Аппаратная часть комплекса была построена на базе мобильного диагностического комплекса «Струна-3 Эксперт», который разрабатывался для диагностики зданий методом свободных колебаний, поэтому было разработано новое программное обеспечение под задачи метода стоячих волн.



Рис. 2. Мобильный диагностический комплекс «Метод стоячих волн» (МСВ)

Fig. 2. Mobile diagnostic unit “Standing Wave Method” (MSW)

В состав комплекса входят:

- трехкомпонентный сейсмоприемник А1638 — 5 шт.;
- блок с 14-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и аккумуляторами для питания датчиков — 1 шт.;
- катушка со 100-метровым кабелем для соединения датчиков с АЦП — 5 шт.;
- мобильный компьютер с программным обеспечением — 1 шт.;
- зарядное устройство для аккумуляторов, питающих датчики, — 1 шт.;
- кабель USB для соединения АЦП и компьютера — 1 шт.

Сейсмоприемник А1638 (рис. 3) преобразует ускорение, действующее вдоль его измерительной оси, в пропорциональный электрический сигнал. Трехкомпонентный сейсмоприемник осуществляет преобразование ускорений оси, действующих вдоль трех взаимно ортогональных направлений (измери-

тельных осей), в пропорциональные электрические сигналы соответствующих каналов. Область применения сейсмоприемника А1638: сейсморазведка, контроль колебаний зданий и сооружений, а также вибраций турбин и валов энергетических установок.



Рис. 3. Общий вид сейсмоприемника А1638

Fig. 3. General view of A1638 geophone

Нормальные условия применения сейсмоприемника:

- температура окружающего воздуха от 18 до 25 °С;
- относительная влажность воздуха от 45 до 80 %;
- атмосферное давление от 84 до 106,7 кПа;
- уровень звукового давления акустических полей не более 60 дБ;
- напряжение питания сейсмоприемника $\pm(12 + 0,5)$ В;
- нестабильность напряжения питания не более 0,5 %;
- пульсации напряжения не более 1 мВ.

Рабочие условия применения:

- температура окружающего воздуха от -40 до +50 °С;
- относительная влажность воздуха до 90 % при 30 °С;
- атмосферное давление от 84 до 106,7 кПа;
- напряжение питания сейсмоприемника $+(12 \pm 2)$ В;
- нестабильность напряжения питания не более 0,5 %;
- пульсации напряжения не более 1 мВ.

На рис. 4 показана координатная сетка, принятая для проведения исследований.

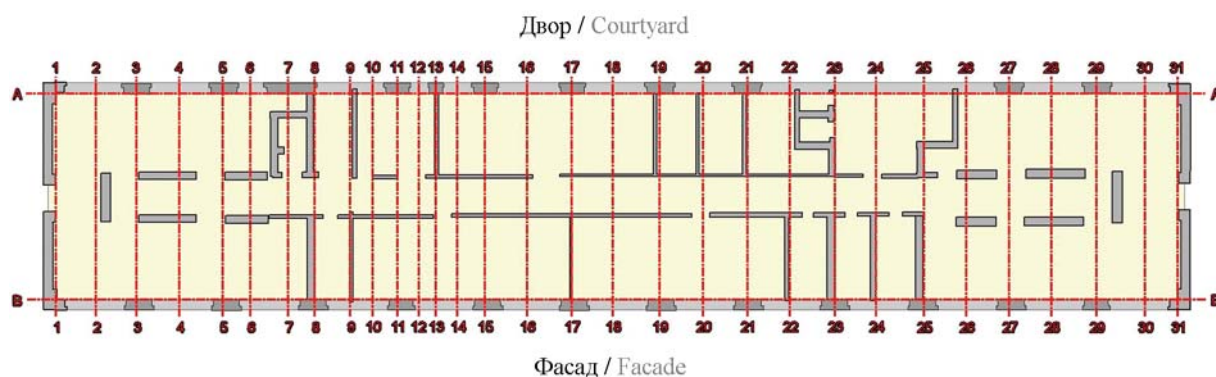


Рис. 4. Координатная сетка

Fig. 4. Coordinate grid

Места установки регистрирующей аппаратуры приведены на рис. 5.

Регистрация микросейсмических колебаний проводилась в 140 точке. Для этого регистрирующая аппаратура устанавливалась на стенах примерно через 6 м. Для приведения разновременных записей к единому времени регистрации установлена опорная точка в осях В/19 пятого этажа.

Согласно методике, датчики, расположенные в точках регистрации, после записи микроколебаний перемещаются в другие точки. Во время всего цикла регистрации микрошумов датчик из опорной точки не перемещается и остается на своем месте.

Так как аппаратура МСВ имеет 5 датчиков, из которых один постоянно закреплен в качестве опорной точки, переносились группы по 4 датчика. На рис. 5 каждая точка обозначена двойным номером: первая часть — номер группы (расстановки), вторая часть — номер датчика в группе.

Согласно методологии пересчета стоячих волн А.Ф. Еманова^{9, 10, 19, 20} [38–41], для обработки записей микрошумов необходимы:

- расчет функции связи между точками наблюдений;

- расчет функции связи в опорной точке со всеми точками наблюдений;
- пересчет стоячих волн из опорной точки во все точки здания.

Одновременные записи разбиваются на отдельные интервалы (реализации) с длиной записи ~ 16 с. Оценку частотных характеристик одноканального фильтра Винера получаем по формуле:

$$L_{1,i}(\omega) = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{F}_{1,j}(\omega) \bar{F}_{i,j}^*(\omega)}{\sum_{j=1}^n |\bar{F}_{1,j}(\omega)|^2}. \quad (1)$$

Данная формула позволяет связать опорную точку со всеми точками регистрации наблюдений в здании. Таким образом, для каждой точки наблюдений получаем функции связи L_1 , позволяющие определить параметры волнового поля в ней из одновременной записи в опорной точке.

Выбрав любую реализацию F в опорной точке, пересчитываем ее в одновременное волновое поле во все точки наблюдения по формуле:

$$F'i(\omega) = L_{1,i}(\omega)F(\omega). \quad (2)$$

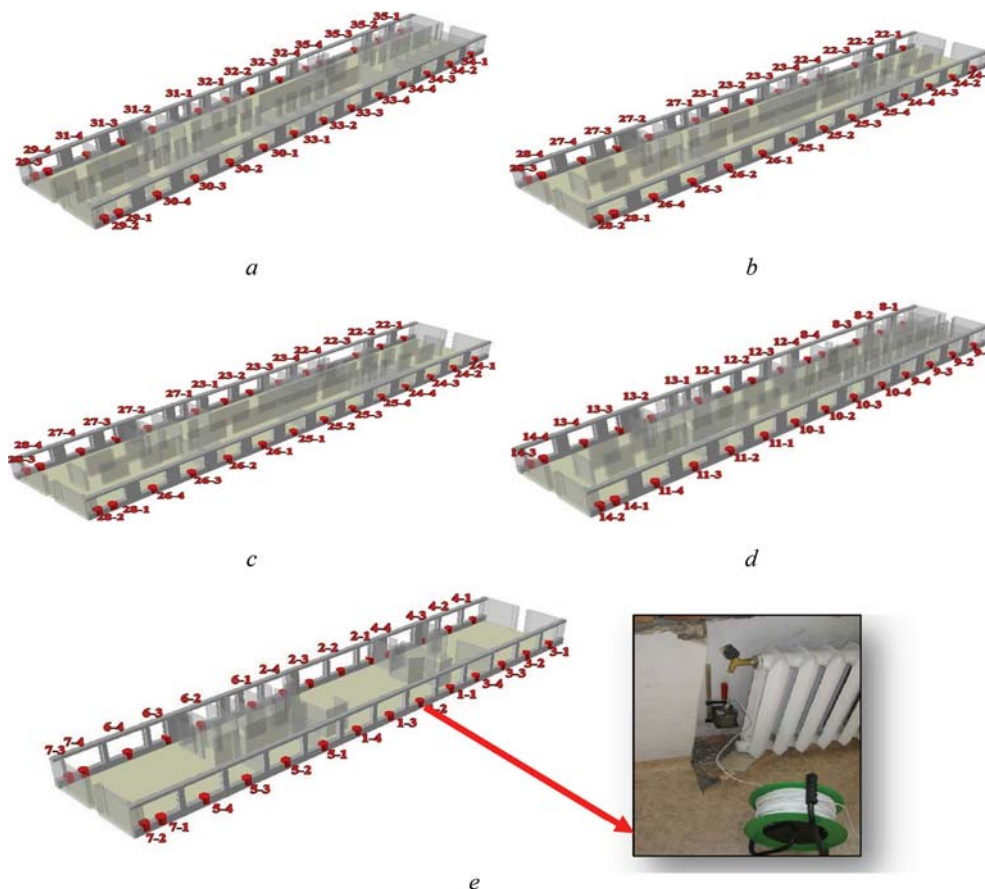


Рис. 5. Расположение точек регистрации микросейсм: *a* — на первом этаже; *b* — на втором этаже; *c* — на третьем этаже; *d* — на четвертом этаже; *e* — на пятом этаже

Fig. 5. Microseism recording points: *a* — on the first floor; *b* — on the second floor; *c* — on the third floor; *d* — on the fourth floor; *e* — on the fifth floor

Для выделения поля стоячих волн в здании рассчитываются спектры когерентности и спектры погрешностей. Спектр когерентности $\gamma(\omega)$ является мерой линейности связи колебаний между двумя точками наблюдений. Значения спектров когерентности повышаются на частотах собственных колебаний здания и понижаются в промежутках между ними. Для спектра погрешностей, наоборот, $\sigma^{(\omega)}$ значения уменьшаются на частотах собственных колебаний здания и повышаются в промежутках между ними. Итак, из записей микроколебаний здания выделяются собственные частоты.

Спектр когерентности записи в i -й точке относительно одной опорной точки рассчитывается по формуле:

$$\gamma^2(\omega) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n \bar{F}_i(\omega) \bar{F}_0^*(\omega) \right|^2}{\sum_{j=1}^n |\bar{F}_0(\omega)|^2 \sum_{j=1}^n |\bar{F}_i(\omega)|^2}, \quad (3)$$

где $\bar{F}_i(\omega)$, $\bar{F}_0(\omega)$ — спектры одновременных записей стоячих волн в i -й точке обследуемого здания и опорной точке.

Среднеквадратическая ошибка фазовой характеристики (спектр погрешностей) выделения собственных частот рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\theta}(\omega) \approx \frac{\sqrt{1 - \gamma_{oi}^2(\omega)}}{|\gamma_{oi}(\omega)| \sqrt{2n}}. \quad (4)$$

Для обработки данных динамических испытаний был разработан программный комплекс «Метод стоячих волн» [12, 20, 21], дающий возможность определять динамические характеристики объекта, выделять собственные частоты и визуализировать результаты испытаний в 3D ГИС-модели исследуемого объекта (рис. 6).

Программный комплекс реализует метод стоячих волн, основанный на определении динамических характеристик (периодов, частот, фаз и форм колебаний, логарифмических декрементов затухания) поля собственных (стоячих) волн конструкций сооружения, вызванных микроколебаниями земной поверхности (микросейсм) малоканальной аппаратурой.

Для выделения собственных частот здания рассчитаны спектры когерентности колебаний. На рис. 7 показаны обобщенные спектры когерентности для первых трех расстановок датчиков.

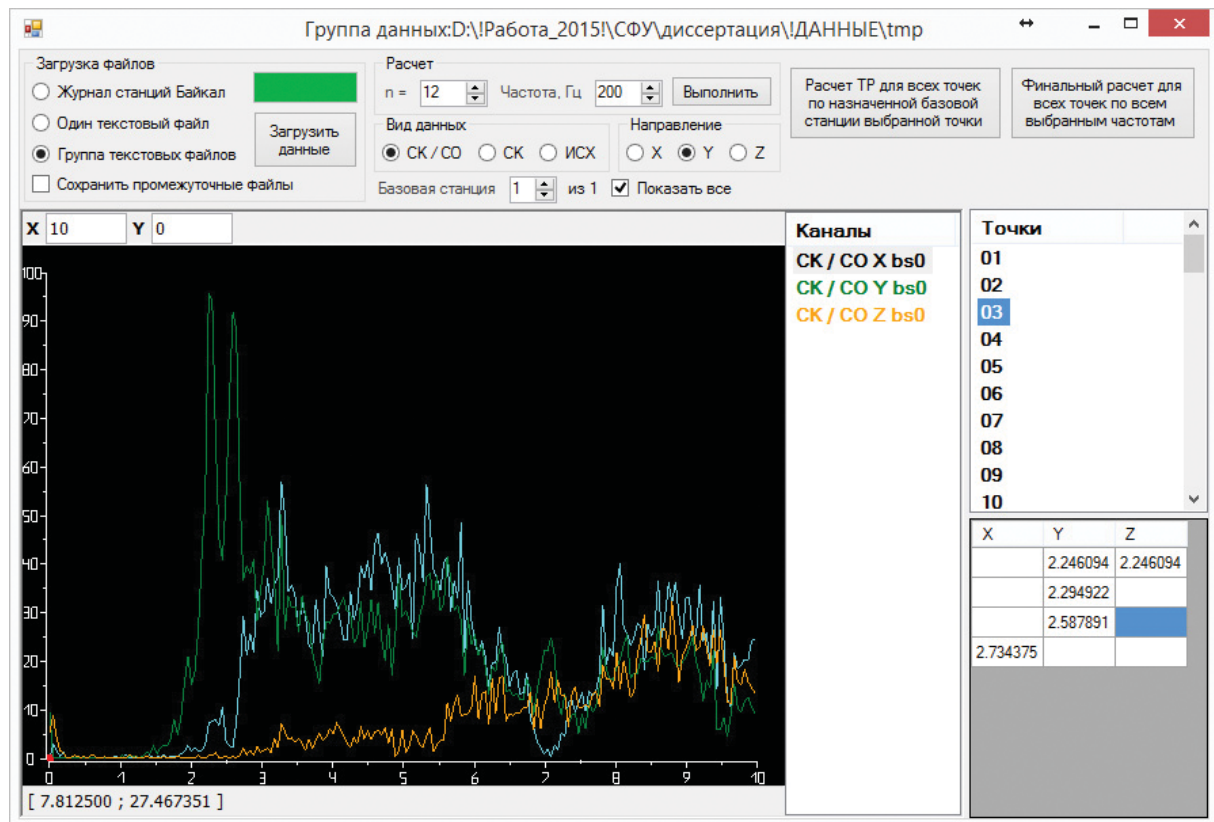


Рис. 6. Интерфейс программы «Метод стоячих волн». Построение спектров когерентности, нормированных на спектры погрешности

Fig. 6. The interface of the “Method of standing waves” software. Development of coherence spectra normalized to the error spectra

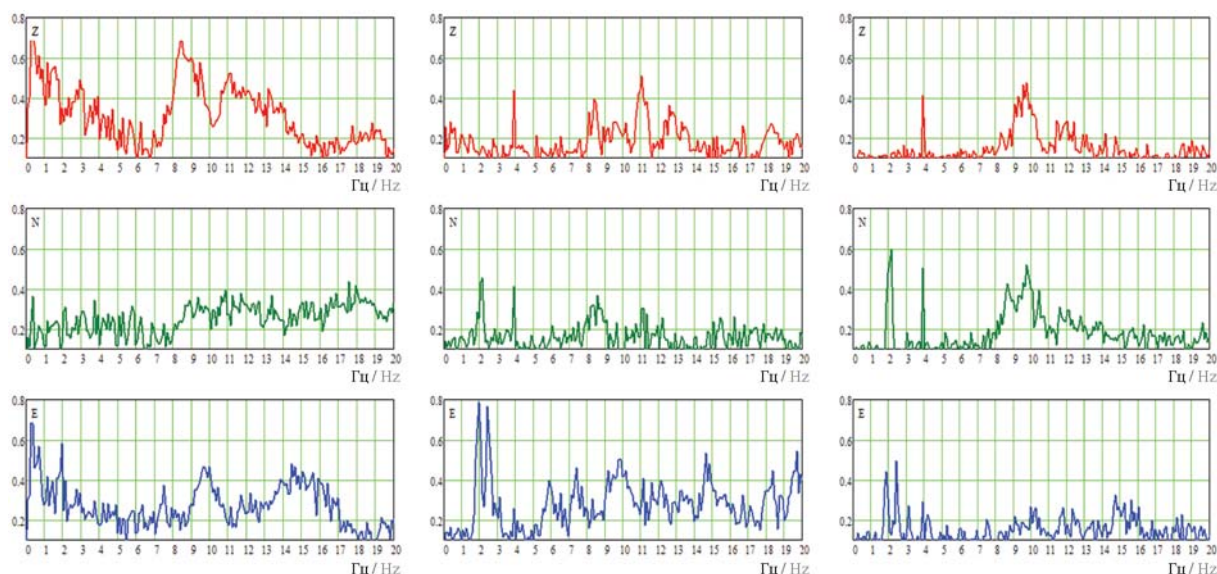


Рис. 7. Спектры когерентности колебаний для первых трех расстановок датчиков

Fig. 7. Vibration coherence spectra for the first 3 layouts of sensors

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам анализа спектров когерентности одновременных колебаний определены наборы собственных частот для трех компонент X , Y , Z (табл.).

На рис. 8 построена 3D ГИС-модель для представления амплитуд и фаз полей собственных колебаний здания и его конструктивных элементов.

Для отдельных собственных частот показаны схемы распределения амплитуд (рис. 9) и фаз колебаний (рис. 10).

Собственные частоты здания

Natural frequencies of the building

Номер Number	Z	X	Y
1	3,91	2,05	1,95
2	8,50	2,15	2,44
3	9,57	3,91	9,57
4	9,76	9,67	9,67
5	10,94	9,76	9,86
6	11,30	9,86	9,96

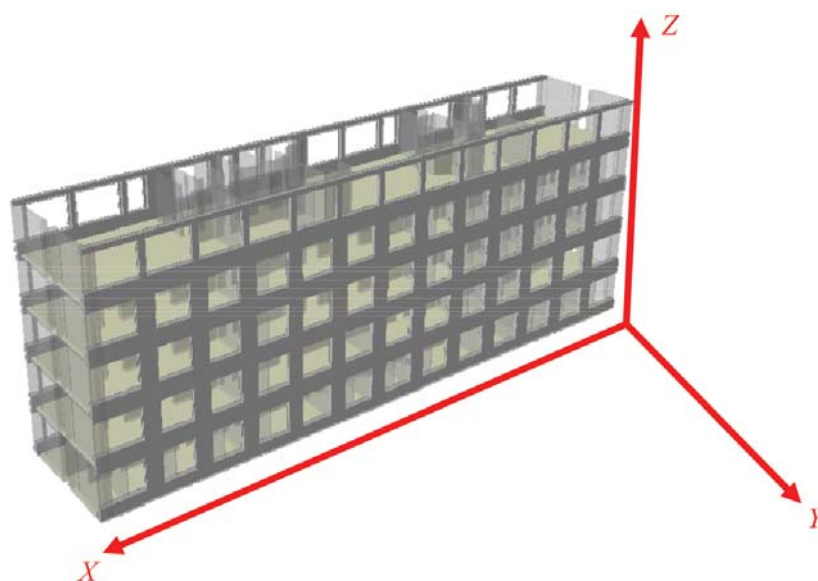


Рис. 8. 3D ГИС-модель исследуемого объекта

Fig. 8. 3D GIS model of the facility under research

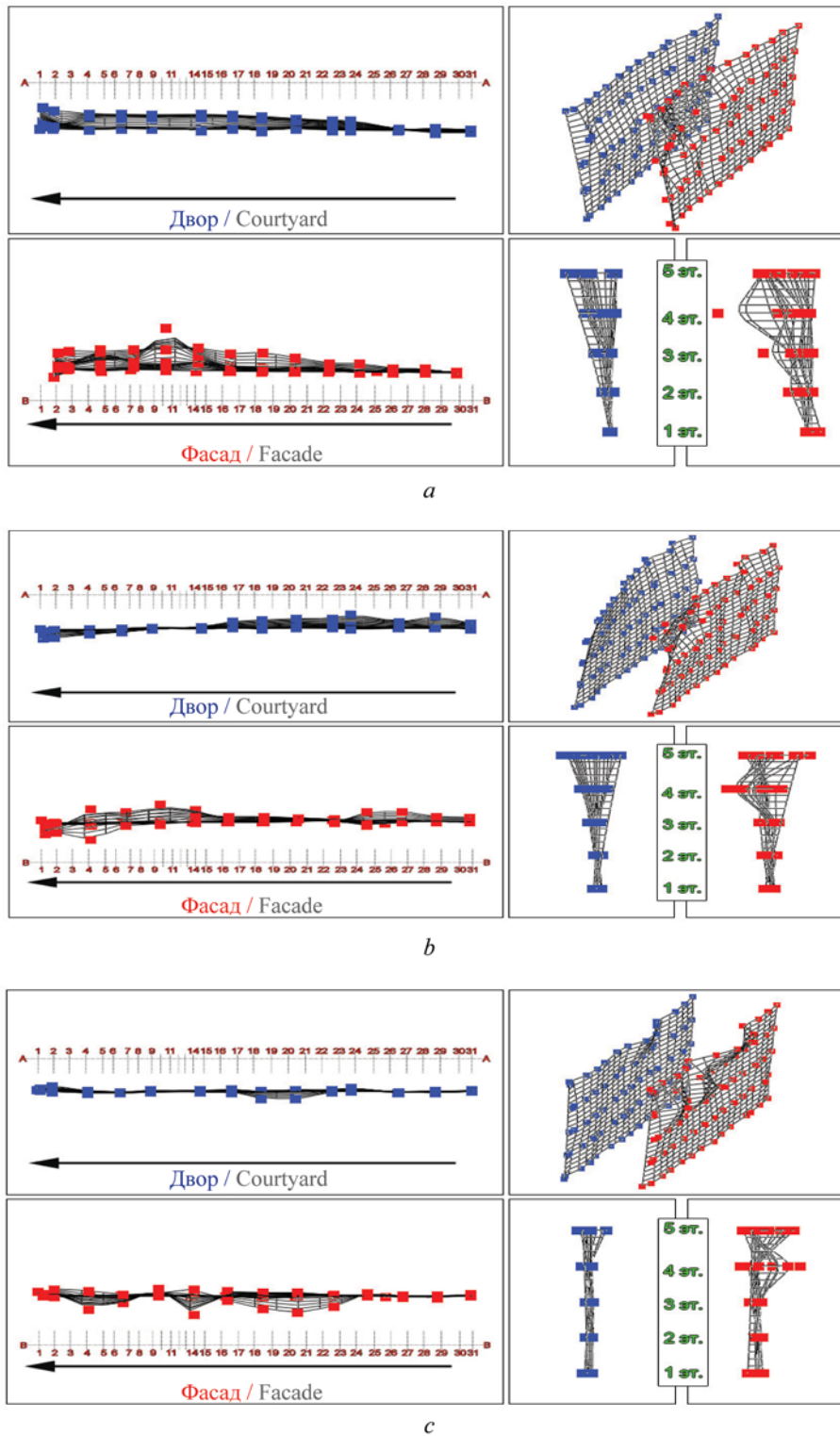


Рис. 9. Формы собственных колебаний вдоль оси Y здания: a — первая форма на частоте 1,95 Гц; b — вторая форма на частоте 2,44 Гц; c — третья форма на частоте 9,57 Гц

Fig. 9. Patterns of natural vibrations along axis Y of the building: a — pattern 1.95 Hz frequency; b — pattern 2.44 Hz frequency; c — pattern 9.57 Hz frequency

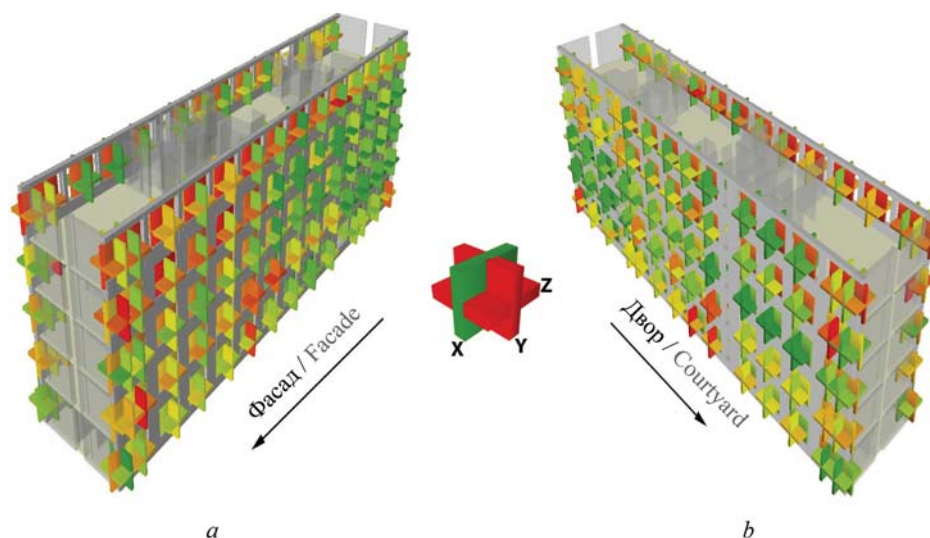


Рис. 10. Фазы колебаний фасадов здания для первых форм собственных колебаний: *a* — со стороны дороги; *b* — со стороны двора

Fig. 10. Vibration phases of the building facades for the first patterns of natural vibrations: *a* — if viewed from the road; *b* — if viewed from the courtyard

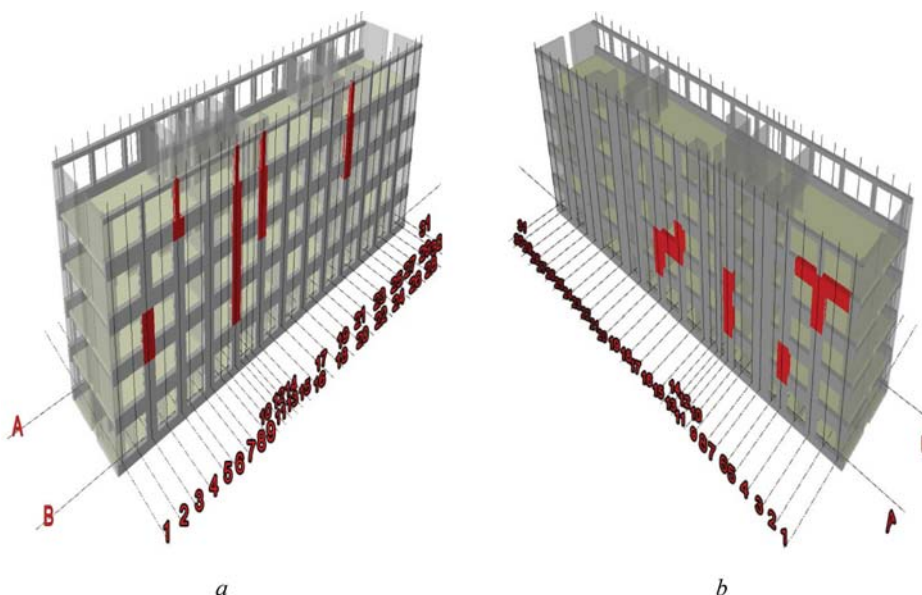


Рис. 11. Места возникновения трещин в кирпичной кладке стен фасадов здания: *a* — со стороны дороги; *b* — со стороны двора

Fig. 11. Areas of cracking brickwork in the walls of the building facades: *a* — if viewed from the road; *b* — if viewed from the courtyard

По результатам динамических испытаний здания установлены его динамические характеристики. Из анализа изменений полученных амплитудных и фазовых характеристик волнового поля объекта выявлены зоны деструктивных процессов в кирпичной кладке стен (рис. 11). Это видно из распределения пиковых амплитуд (рис. 9) по цифровой оси № 10, где возникают самые большие зоны деструктивных процессов в кирпичной кладке стен (рис. 11), а также по изменению фаз колебаний (рис. 10) в этой зоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведена регистрация микросейсмических колебаний конструкций здания мобильным диагностическим комплексом «Метод стоячих волн». По результатам динамических испытаний административного здания получены его динамические характеристики. Определены собственные частоты, пиковые амплитуды и фазовые характеристики волнового поля здания. Для выделения собственных частот здания разработан программный комплекс,

реализующий метод стоячих волн. Построена ГИС-модель для представления амплитуд и фаз полей собственных колебаний здания и его конструктивных элементов. Анализ полученных динамических характеристик позволил установить причины возникновения трещин в несущих кирпичных стенах здания. Выявлены зоны деструктивных процессов в кирпичной кладке несущих стен, влияющие на безопасное функционирование здания. Обнаруженные разрушения кирпичной кладки вызваны динамическими нагрузками на здание от уличной автомагистрали — пр-т имени газеты «Красноярский рабочий», имеющей трамвайные пути. Для безопасного функционирования здания необходимо повысить его пространственную жесткость путем установки дополнительных диафрагм жесткости на верхних этажах здания.

В настоящее время для диагностики зданий и сооружений разработан и используется новый мобильный диагностический комплекс, реализующий метод стоячих волн, на базе трехкомпонентных регистраторов расширенного частотного диапазона «Байкал-АСН8». Данный аппаратно-программный комплекс применялся для диагностики больше-

пролетных мостовых сооружений, оценки сейсмостойкости здания со стационарной системой сейсмоизоляции, мониторинга технического состояния музыкального театра и жилого здания. Перспективы применения комплекса — самые разнообразные. Он может использоваться для решения самого широкого круга задач:

- обследование аварийных зданий;
- оценка сейсмостойкости зданий и сооружений;
- оценка класса сейсмостойкости зданий и сооружений;
- построение адаптированных расчетных моделей зданий и сооружений по динамическим параметрам, определенным в ходе испытаний;
- возобновление строительства и реконструкция зданий и сооружений;
- плановые проверки особо опасных объектов и промышленных зданий и сооружений;
- обследование и мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений любой сложности;
- определение параметров основного тона собственных колебаний для паспорта здания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савин С.Н. Использование упругих колебаний различных длин волн для оценки динамических параметров зданий и сооружений и прочности каменной кладки // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 4. С. 43–54.

2. Нигметов Г.М., Савинов А.М. О динамико-геофизическом методе оценки несущей способности сооружений // Сборник трудов XXVIII Международной научно-практической конференции. М. : Академия гражданской защиты МЧС России, 2018. С. 66–68.

3. Нигметов Г.М. Применение частоты собственных колебаний для оценки категории технического состояния сооружений // Природные технические риски. Безопасность сооружений. 2019. № 5 (42). С. 24–27.

4. Савин С.Н. Экспресс-оценка технического состояния сооружений по значению их динамических параметров // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники : сб. ст. III Всеросс. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2016. С. 422–426.

5. Савин С.Н. Проведение динамического анализа при реконструкции и капитальном ремонте зданий и сооружений // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути решения : мат. VII Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2016. С. 215–222.

6. Савин С.Н. Диагностика технического состояния железобетонных ферм большепролетных соору-

жений // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути решения : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2017. С. 170–175.

7. Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Короленко Д.Б. Особенности применения инженерно-сейсмометрического метода обследования и мониторинга технического состояния зданий и сооружений // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии. 2019. Т. 12. № 2. С. 231–239. DOI: 10.17516 / 1999-494X-0132

8. Нигметов Г.М., Егорова А.А. Диагностика и мониторинг зданий, сооружений, конструкций с применением методов динамических и геофизических испытаний // Пожарная и аварийная безопасность : мат. XII Междунар. науч.-практ. конф. Иваново, 2017. С. 847–850.

9. Савин С.Н. Динамический мониторинг строительных конструкций на примере пандуса киноконцертного зала «Пушкинский» в г. Москва // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7 (33). С. 58–62.

10. Шаблинский Г.Э., Зубков Д.А. Натурные и модельные исследования динамических явлений в строительных конструкциях энергетических и гражданских объектов : монография. М. : МГСУ, 2012. 484 с.

11. Савин С.Н., Александрова А.А., Грабаровская К. Мониторинг динамических параметров зданий и сооружений как средство их безопасной эксплуатации // Безопасность в строительстве : мат. IV

Всеросс. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2019. С. 145–149.

12. *Золотов А.Е., Сафина О.В., Романюк П.В.* Динамические испытания каркасных производственных зданий // Наука и образование в XXI веке: Теория, Методология, Практика : сб. ст. по мат. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа : Вестник науки, 2019. С. 84–88.

13. *Нигметов Г.М.* О практическом применении метода динамических испытаний для оценки категории технического состояния и сейсмостойкости зданий и сооружений. Ответ на статью Тонких Г.П. // Мониторинг. Наука и безопасность. 2013. № 1. С. 112–119.

14. *Тонких Г.П.* По вопросу использования динамических испытаний для оценки технического состояния и сейсмостойкости зданий и сооружений // Мониторинг. Наука и безопасность. 2012. № 4. С. 54–57.

15. *Abovsky N.P., Inzhutov I.S., Khoroshavin E.A., Deordiyev S.V., Palagushkin V.I.* Importance of foundations in earthquake-resistant construction. Seismically protective foundation (in order of discussion) // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2012. Vol. 49. Issue 5. Pp. 200–201. DOI: 10.1007/s11204-012-9190-8

16. *Хорошавин Е.А.* Динамические испытания административного здания со стационарной системой сейсмоизоляции в г. Иркутске // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 6. С. 62–69.

17. *Суцев С.П., Ларионов В.И., Галиуллин Р.Р., Нигметов Г.М., Савин С.Н., Самарин В.В.* О практическом применении метода динамических испытаний для оценки категории технического состояния и сейсмостойкости зданий и сооружений при слабых и сильных импульсных воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. № 3 С. 52–59.

18. *Суцев С.П., Самарин В.В., Адаменко И.А., Сотин В.Н.* Мониторинг технического состояния несущих конструкций зданий и сооружений // Мониторинг. Наука и безопасность. 2011. № 1. С. 24–32.

19. *Frolova N.I., Larionov V.I., Sushev S.P., Bonin J.* Estimation of loss caused by earthquakes and secondary technological hazards // Natural Hazards and Earth System Science. 2011. Vol. 11. No. 11. Pp. 3025–3033. DOI: 10.5194/nhess-11-3025-2011

20. *Суцев С.П., Галиуллин Р.Р., Савин С.Н., Ларионов В.И., Нигметов Г.М., Самарин В.В.* О применении метода динамических испытаний для оценки категории технического состояния и сейсмостойкости зданий и сооружений при слабых и сильных импульсных воздействиях // Мониторинг. Наука и безопасность. 2013. № 3. С. 84–91.

21. *Савин С.Н., Смирнова Е.Э.* Прогноз ресурса зданий и сооружений в условиях природных и техногенных чрезвычайных ситуаций // Современные

проблемы гражданской защиты. 2019. № 2 (31). С. 33–42.

22. *Нигметов Г.М.* Оценка опасности обрушения сооружений и их конструктивных элементов // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : мат. III Междунар. науч.-практ. конф. посвящ. Всемирному дню гражданской обороны. В 3-х частях. М., 2019. С. 277–278.

23. *Лебедин А.П., Баранов С.А., Васюткин Е.С., Белый А.А.* Обследование и мониторинг технического состояния зданий и сооружений как основной элемент их безаварийной эксплуатации // Материалы Первой Международной научно-практической конференции. СПб. : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2019. С. 150–158.

24. *Бубис А.А., Петряшев Н.О., Петряшев С.О., Петросян А.Е.* Натурные динамические испытания на сейсмостойкость архитектурно-строительной системы КУПАСС // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. № 2. С. 13–23.

25. *Emanov A.F., Krasnikov A., Bach A., Seleznev V.S., Shevtsov A.* The Standing waves method in microseismic zoning and studying of buildings and engineering constructions // The 10th Asian seismological commission (FSC) general assembly. Makati city, Philippines, 2014. P. 105.

26. *Савин С.Н., Смирнова Е.Э.* Проблема определения динамических параметров для прогноза ресурса зданий и сооружений в условиях природных и техногенных ЧС // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 3 (74). С. 14–19. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-3-14-19

27. *Osipov V.I., Larionov V.I., Burova V.N., Frolova N.I., Sushchev S.P.* Methodology of natural risk assessment in Russia // Natural Hazards. 2017. Vol. 88. No. S1. Pp. 17–41. DOI: 10.1007/s11069-017-2780-z

28. *Бержинский Ю.А.* Рецензия на статью Суцева В.А., Ларионова В.А. и соавторов «О практическом применении метода динамических испытаний для оценки категории технического состояния и сейсмостойкости зданий и сооружений при слабых импульсных воздействиях» // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. № 3. С. 60–63.

29. *Савин С.Н., Данилов И.Л.* Сейсmobезопасность зданий и территорий. М. : Изд-во Лань, 2015. 240 с.

30. *Хорошавин Е.А.* Оценка сейсмостойкости зданий и сооружений на основе метода стоячих волн // Модернизация экономики и экспорт технологий в торгово-экономических отношениях и научных исследованиях России и Германии : мат. V Междунар. конф. М. : Московский финансово-юридический университет МФЮА, 2016. С. 85–98.

31. *Хорошавин Е.А.* Оценка сейсмостойкости зданий и сооружений на основе метода стоячих волн // XIII Российская национальная конференция

по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию : сб. тр. СПб., 2019. С. 103–106.

32. Базаров А.Д., Суржигов А.П. Разработка аппаратно-программного комплекса для контроля динамических характеристик инженерных сооружений // Контроль. Диагностика. 2014. № 11. С. 57–61.

33. Савин С.Н. Особенности использования измерительных комплексов различных типов для получения динамических параметров зданий и сооружений // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути решения : мат. IX научно-практ. конф. СПб., 2018. С. 244–252.

34. Кабанцев О.В. О достоверности оценки сейсмостойкости зданий на основе результатов диагностики методом импульсного воздействия малой интенсивности // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 2. С. 46–50.

35. Нигметов Г.М., Рыбаков А.В., Савинов А.М., Нигметов Т.Г. Современные подходы к оценке опасности обрушения сооружений // Технологии гражданской безопасности. 2018. Т. 15. № 2 (56). С. 26–29.

36. Нигметов Г.М., Акатьев В.А., Савинов А.М., Нигметов Т.Г. Оценка сейсмостойкости зданий динамико-геофизическим методом с учетом особенности взаимодействия сейсмической волны с системой «грунт-сооружение» // Строительная механика и расчет сооружений. 2018. № 1. С. 24–30.

37. Нигметов Г.М. Особенности расчета и оценки несущей способности конструкций зданий с применением динамико-геофизических параметров // Технологии гражданской безопасности. 2019. Т. 16. № 2 (60). С. 4–7.

38. Emanov A.F., Bach A., Krasnikov A.A., Seleznev V.S. Standing waves method in engineering seismology // 18th European meeting of environmental and engineering geophysics. European Association of Geoscientists and Engineers. Paris. 2012. Pp. 94–98.

39. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Красников А.А. Метод стоячих волн в инженерной сейсмологии // VIII научно-практ. конф. и выставка «Инженерная геофизика 2012. Геофизические исследования и инженерные изыскания». Геленджик : SAGE Publications BV, 2012. DOI: 10.3997/2214-4609.20146016

40. Emanov A.F., Emanov A.A., Leskova E.V., Seleznev V.S., Fateev A.V. The Tuva earthquakes of December 27, 2011, ML = 6.7, and February 26, 2012, ML = 6.8, and their aftershocks // Doklady earth

sciences. Pleiades publishing, Ltd, 2014. Vol. 456. Issue 1. Pp. 594–597. DOI: 10.1134/S1028334X14050249

41. Еманов А.Ф., Красников А.А. Применение метода стоячих волн для исследования сейсмоизолированных зданий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42. № 4. С. 37–64

42. Красников А.А., Еманов А.Ф., Бах А.А. Оценка полноты конечно-элементных моделей инженерных сооружений по экспериментальным данным метода стоячих волн // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Новосибирск, 2017. Т. 2. № 4. С. 179–184.

43. Еманов А.А., Еманов А.Ф., Клецин В.И. Изучение платины Богучанской ГЭС методом стоячих волн // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2018. Т. 3. С. 138–144. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-3-138-144

44. Еманов А.Ф., Бах А.А. Развитие алгоритмов интерпретации метода стоячих волн для исследования зданий и сооружений сложных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 5. С. 28–35.

45. Еманов А.Ф., Бах А.А. Стоячие волны в инженерных объектах сложных конструкций // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2019. Т. 2. № 2. С. 67–73. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-2-2-67-73

46. Emanov A.F. Standing wave method in engineering seismology (theory) // Taiwan-Russia Bilateral symposium on civil engineering. Taipei, Taiwan. Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Novosibirsk, 2012. Pp. 13–14.

47. Еманов А.Ф., Красников А.А. Опыт исследования сейсмоизолированных зданий методом стоячих волн // Материалы научно-практ. конф. по сейсмостойкому строительству (с международным участием) памяти В.И. Смирнова. М. : НИЦ «Строительство», 2016. С. 213–216.

48. Еманов А.Ф., Бах А.А., Еманов А.А. Применение метода стоячих волн в исследовании инженерных сооружений сложных конструкций и в сейсмическом микрорайонировании // Природные и технологические риски. Безопасность сооружений. 2017. № 4 (31). С. 36–37.

49. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеева А.В., Бах А.А., Дураченко А.В., Шевкунова Е.В. и др. Методические основы совместного инструментального сейсмологического мониторинга геосреды и особо ответственных зданий // Вестник научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2019. № 3. С. 14–44. DOI: 10.25558/VOSTNII. 2019.13.3.002

Поступила в редакцию 26 февраля 2020 г.

Принята в доработанном виде 9 ноября 2020 г.

Одобрена для публикации 27 января 2021 г.

О Б АВТОРЕ: Евгений Алексеевич Хорошавин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ОПД; Красноярский институт железнодорожного транспорта — филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КРИЖТ ИрГУПС); 660028, Красноярск, ул. Ладо Кецховели, д. 89; ул. Новая Заря, д. 2и; РИНЦ ID: 661393, ORCID: 0000-0001-7816-0467; zkp2007@ya.ru.

REFERENCES

1. Savin S.N. The use of elastic vibrations of various wavelengths to assess the dynamic parameters of buildings and structures and the strength of masonry. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2017; 4: 43-54. (rus.).
2. Nigmatov G.M., Savinov A.M. On the dynamic-geophysical method for assessing the load-bearing capacity of structures. *Proceedings of the VIII International scientific and practical conference*. Moscow, Academy of civil protection of the Ministry of emergency situations of Russia, 2018; 66-68. (rus.).
3. Nigmatov G.M. Application of the natural oscillation frequency for assessing the category of technical condition of structures. *Natural and Technical Risks. Safety of Structures*. 2019; 5:24-27. (rus.).
4. Savin S.N. Rapid assessment of the technical condition of structures by the value of their dynamic parameters. *Modern problems of the creation and operation of weapons, military and special equipment : Collection of articles of the III All-Russian scientific-practical conference*. St. Petersburg, 2016; 422-426. (rus.).
5. Savin S.N. Dynamic analysis during reconstruction and overhaul of buildings and structures. *Inspection of buildings and structures: problems and solutions : Materials of the VII international scientific-practical conference*. St. Petersburg, 2016; 215-222. (rus.).
6. Savin S.N. Diagnostics of the technical condition of reinforced concrete trusses of large-span structures. *Inspection of buildings and structures: problems and solutions : Materials of the VIII international scientific-practical conference*. St. Petersburg, 2017; 170-175. (rus.).
7. Kuzmenko A.P., Saburov V.S., Korolenko D.B. Features of the application of the engineering-seismometric survey method and monitoring the technical condition of buildings and structures. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Equipment and Technologies*. 2019; 12(2):231-239. DOI: 10.17516/1999-494X-0132 (rus.).
8. Nigmatov G.M., Egorova A.A. Diagnostics and monitoring of buildings, Structures, and structures using dynamic and geophysical testing methods. *Fire and emergency safety : Proceedings of the XII international scientific and practical conference*. Ivanovo, 2017; 847-850. (rus.).
9. Savin S.N. Dynamic monitoring of building structures on the example of the ramp of the Pushkin concert hall in Moscow. *Engineering and Construction Magazine*. 2012; 33(7):58-62. (rus.).
10. Shablinsky G.E., Zubkov D.A. *Full-scale and model studies of dynamic phenomena in building structures of energy and civil objects : monograph*. Moscow, MGSU, 2012; 484. (rus.).
11. Savin S.N., Aleksandrova A.A., Grabarovskaya K. Monitoring the dynamic parameters of buildings and structures as a means of their safe operation. *Safety in Construction : Materials of the IV All-Russian scientific-practical conference with the participation*. St. Petersburg, 2019; 145-149. (rus.).
12. Zolotov A.E., Safina O.V., Romanyuk P.V. Dynamic tests of frame industrial buildings. *Science and education in the XXI century: Theory, Methodology, and Practice : Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference. The journal of science*. Ufa, 2019; 84-88. (rus.).
13. Nigmatov G.M. On the practical application of the dynamic test method for assessing the category of technical condition and seismic resistance of buildings and structures. Response to the article by Tonkikh G.P. *Monitoring. Science and Security*. 2013; 1:112-119. (rus.).
14. Tonkih G.P. Issue of the use of dynamic tests for assessment the technical state and seismic stability of buildings and structures. *Monitoring. Science and Security*. 2012; 4:54-57. (rus.).
15. Abovsky N.P., Inzhutov I.S., Khoroshavin E.A., Deordiyev S.V., Palagushkin V.I. Importance of foundations in earthquake-resistant construction. Seismically protective foundation (in order of discussion). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2012; 49(5): 200-201. DOI: 10.1007/s11204-012-9190-8
16. Khoroshavin E.A. Dynamic tests of the administrative building with a stationary seismic isolation system in Irkutsk. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2019; 6:62-69. (rus.).
17. Suschev S.P., Larionov V.I., Galiullin R.R., Nygmetov G.M., Savin S.N., Samarin V.V. Practical application of the method of dynamic tests for evaluation of the category of technical state and seismic stability of buildings and constructions in weak and strong pulse influences. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2014; 6:52-59. (rus.).
18. Suschev S.P., Samarin V.V., Adamenko I.A., Sotin V.N. Monitoring the technical condition of the supporting structures of buildings and structures. *Monitoring. Science and Security*. 2011; 1:24-32. (rus.).
19. Frolova N.I., Larionov V.I., Suschev S.P., Bonin J. Estimation of loss caused by earthquakes and secondary technological hazards. *Natural Hazards and Earth System Science*. 2011; 11(11):3025-3033. DOI: 10.5194/nhess-11-3025-2011
20. Suschev S.P., Galiullin R.R., Savin S.N., Larionov V.I., Nigmatov G.M., Samarin V.V. On the application of the dynamic test method to assess the category of technical condition and earthquake resistance of buildings and structures under weak and strong impulse effects. *Monitoring. Science and Security*. 2013; 3:84-91. (rus.).
21. Savin S.N., Smirnova E.E. Forecast of the resource of buildings and structures in natural and man-

made emergencies. *Modern Problems of Civil Protection*. 2019; 2(31):33-42. (rus.).

22. Nigmatov G.M. Assessment of the danger of collapse of structures and their structural elements. *Civil defense guarding peace and security : Proceedings of the III International scientific and practical conference dedicated to World Civil Defense Day. In 3 parts*. Moscow, 2019; 277-278. (rus.).

23. Lebedkin A.P., Baranov S.A., Vasyutkin E.S., Bely A.A. Inspection and monitoring of the technical condition of buildings and structures as the main element of their accident-free operation. *Materials of the First International scientific and practical conference*. SPb. : Saint Petersburg state University of Imperial Railways Alexander I, 2019; 150-158. (rus.).

24. Bubis A.A., Petryashev N.O., Petryashev S.O., Petrosyan A.E. Full-scale dynamic tests for earthquake resistance of the KUPASS architectural and construction system. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2016; 2:13-23. (rus.).

25. Emanov A.F., Krasnikov A., Bach A., Seleznev V.S., Shevtsov A. The standing waves method in microseismic zoning and studying of buildings and engineering constructions. *The 10th Asian Seismological Commission (FSC) General Assembly. Makati City, Philippines*. 2014; 105. (rus.).

26. Savin S.N., Smirnova E.E. The problem of determining dynamic parameters for predicting the resource of buildings and structures in natural and man-made emergencies. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 3(74):14-19. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-3-14-19 (rus.).

27. Osipov V.I., Larionov V.I., Burova V.N., Frolova N.I., Sushchev S.P. Methodology of natural risk assessment in Russia. *Natural Hazards*. 2017; 88(S1):17-41. DOI: 10.1007/s11069-017-2780-z

28. Berzhinsky Yu.A. Review of the article of S.P. Sushchev, V.I. Larionov and other authors "Practical application of the method of dynamic tests for evaluation of the category of technical state and seismic stability of buildings and constructions in weak and strong pulse influences". *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2014; 3:60-63. (rus.).

29. Savin S.N., Danilov I.L. *Seismic Safety of Buildings and Territories. Textbook*. Moscow, 2015; 240. (rus.).

30. Khoroshavin E.A. Evaluation of seismic resistance of buildings and structures of the method of standing waves. *Modernization of the Economy and Export of Technology in Trade and Economic Relations and Scientific Research of Russia and Germany: Materials of the V International Conference*. Moscow, Moscow Finance and Law University, 2016; 85-98. (rus.).

31. Khoroshavin E.A. Evaluation of seismic resistance of buildings and structures of the method of standing waves. *In the proceedings of the XIII Russian National Conference on earthquake engineering and seismic zoning*. St. Petersburg, 2019; 103-106. (rus.).

32. Bazarov A.D., Surzhikov A.P. Development of hardware — software complex for the monitoring dynamic characteristics of engineering structures. *Control. Diagnostics*. 2014; 11:57-61. (rus.).

33. Savin S.N. Features of using measuring systems of various types to obtain the dynamic parameters of buildings and structures. *Inspection of buildings and structures: problems and solutions : Materials of the IX scientific-practical conference*. St. Petersburg. 2018; 244-252. (rus.).

34. Kabantsev O.V. On the reliability of the assessment of seismic resistance of buildings based on the results of diagnostics using the low-intensity pulsed impact method. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2013; 2:46-50. (rus.).

35. Nigmatov G.M., Rybakov A.V., Savinov A.M., Nigmatov T.G. Modern approaches to assessing the danger of collapse of structures. *Civil Security Technologies*. 2018; 15(2):26-29. (rus.).

36. Nigmatov G.M., Akatyev V.A., Savinov A.M., Nigmatov T.G. Assessment of seismic stability of buildings by dynamic-geophysical method taking into account the peculiarities of interaction of the seismic wave with the system "Ground-Structure". *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2018; 1:24-30. (rus.).

37. Nigmatov G.M. Features of calculation and assessment of the bearing capacity of building structures using dynamic geophysical parameters. *Technologies of Civil Security*. 2019; 16(2):4-7. (rus.).

38. Emanov A.F., Bach A., Krasnikov A.A., Seleznev V.S. Standing waves method in engineering seismology. *18th European meeting of environmental and engineering geophysics*. European Association of Geoscientists and Engineers. Paris, 2012; 94-98.

39. Emanov A.F., Seleznev V.S., Bach A.A., Krasnikov A.A. The standing wave method in engineering seismology. *VIII scientific-practical conference and exhibition "Engineering geophysics 2012. Geophysical research and engineering surveys"*. Gelendzhik, SAGE Publications BV, 2012. DOI: 10.3997/2214-4609.20146016 (rus.).

40. Emanov A.F., Emanov A.A., Leskova E.V., Seleznev V.S., Fateev A.V. The Tuva earthquakes of December 27, 2011, ML = 6.7, and February 26, 2012, ML = 6.8, and their Aftershocks. *Doklady earth Sciences. Pleiades Publishing, Ltd*. 2014; 456(1):594-597. DOI: 10.1134/S1028334X14050249

41. Emanov A.F., Krasnikov A.A. Application of the standing wave method for the study of seismically insulated buildings. *Issues of Engineering Seismology*. 2015; 42(4):37-64. (rus.).

42. Krasnikov A.A., Emanov A.F., Bach A.A. Estimation of completeness of finite element models of engineering structures based on experimental data of the standing waves method. *Interexpo GEO-Siberia*. 2017; 2(4):179-184. (rus.).

43. Emanov A.A., Emanov A.F., Kleocin V.I. The study of platinum of the Boguchansk hydroelectric station using the standing wave method. *Interexpo GEO-Siberia*. 2018; 3:138-144. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-3-138-144 (rus.).

44. Emanov A.F., Bakh A.A. Development of algorithms for interpreting the method of standing waves for the study of buildings and structures of complex constructions. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2019; 5:28-35. (rus.).

45. Emanov A.F., Bakh A.A. Standing waves in engineering objects of complex constructions. *Interexpo GEO-Siberia*. 2019; 2(2):67-73. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-2-2-67-73 (rus.).

46. Emanov A.F. Standing wave method in engineering seismology (theory). *Taiwan-Russia Bilateral Symposium on Civil Engineering, Taipei, Taiwan. Siberian branch of the Russian Academy of Sciences*. Novosibirsk, 2012; 13-14.

47. Emanov A.F., Krasnikov A.A. Experience of studying seismically isolated buildings by the method of standing waves. *Materials of the scientific and practical conference on earthquake-resistant construction (with international participation) in memory of V.I. Smirnov*. 2016; 213-216. (rus.).

48. Emanov A.F., Bach A.A., Emanov A.A. The use of the standing wave method in the study of engineering structures of complex structures and in seismic microzoning. *Natural and Technological Risks. Safety of Facilities*. 2017; 4(31):36-37. (rus.).

49. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateeva A.V., Bach A.A., Durachenko A.V., Shevkunova E.V. et al. Methodological foundations of a joint instrumental-geological monitoring of the geological environment and critical buildings. *Bulletin of the scientific center of VostNII on industrial and environmental safety*. 2019; 3:14-44. DOI: 10.25558/VOSTNII. 2019.13.3.002 (rus.).

Received February 26, 2020.

Adopted in revised form on November 9, 2020.

Approved for publication on January 27, 2021.

BIONOTES: **Evgeny A. Khoroshavin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Professional Disciplines; **Krasnoyarsk Institute of Railway Transport — branch Irkutsk State Transport University**; 89 Lado Ketskhoveli st.; 2i Novaya Zarya st., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation; ID RISC: 661393, ORCID: 0000-0001-7816-0467; zkp2007@ya.ru.

Экспериментальное исследование сдвигового соединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий на уголковых анкерных упорах

Г.П. Тонких^{1,2}, Д.А. Чесноков^{3,2}

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (ВНИИ ГОЧС); г. Москва, Россия;

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

³ Хилти Дистрибьюшин ЛТД; г. Химки, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Уголковые анкерные упоры, закрепляемые с помощью порохового монтажного пистолета, являются альтернативным способом устройства сдвигового объединения сталежелезобетонных балок по отношению к традиционным приварным элементам. Необходимо уточнить их прочностные характеристики при различных вариантах конструирования сталежелезобетонных перекрытий для расчета по СП 266.1325800.2016.

Материалы и методы. Для выявления прочностных характеристик уголковых анкерных упоров составлена программа лабораторных испытаний по методике ГОСТ Р 58336-2018. Испытания по определению несущей способности уголковых упоров на срез выполнены в лаборатории испытаний строительных материалов, изделий и конструкций НИУ МГСУ на универсальной сервогидравлической реконфигурируемой установке для испытаний крупноразмерных конструкций на статические и динамические нагрузки MTS.Multiaxial.DS1.4811.DS1.50019. Измерение перемещений проводилось с помощью индикатора поршневого типа, установленного на независимом штативе.

Результаты. На основе анализа имеющихся нормативных документов и литературных источников разработана программа экспериментально-теоретических исследований работы сдвигового соединения на уголковых анкерных упорах в монолитных сталежелезобетонных перекрытиях, в том числе с применением стального профилированного настила по ГОСТ 24045-2016. В ходе эксперимента установлено, что прочность сдвигового соединения на уголковом упоре зависит не только от геометрических характеристик применяемого для несъемной опалубки профилированного настила, но и от расположения упора внутри гофры.

Выводы. Результаты экспериментально-теоретического исследования позволяют получить новые сведения о прочностных и деформативных характеристиках уголковых анкерных упоров, закрепляемых пороховой пристрелкой на высокопрочных дюбелях и, при необходимости, уточнить существующие положения по расчету коэффициента редукации по СП 266.1325800.2016 с учетом параметров конструирования узла сдвигового соединения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сталежелезобетонные перекрытия, сталежелезобетонные балки, комбинированные балки, анкерные упоры, стальной профилированный настил, коэффициент редукации, высокопрочные дюбели

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Экспериментальное исследование сдвигового соединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий на уголковых анкерных упорах // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 144–152. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.144-152

An experimental study of a shear connection of steel-reinforced concrete slabs with angle shear studs

Gennadij P. Tonkih^{1,2}, Denis A. Chesnokov^{3,2}

¹ All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergencies of Russia (VNIИ ГОChS); Moscow, Russian Federation;

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

³ Hilti Distribution LTD; Khimki, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Angle shear studs, attachable by powder-actuated fasteners, are used as an alternative to traditional welded elements ensuring the shear connection of steel-reinforced concrete slabs. The objective is to revise their strength characteristics for different options of steel-reinforced concrete slab designs pursuant to SP 266.1325800.2016.

Materials and methods. The programme of laboratory tests was developed in compliance with GOST R 58336-2018 to identify the strength behaviour of angle shear studs. Static shear testing of angle studs was performed at the LISMIK laboratory of the Moscow State University of Civil Engineering using universal servo-hydraulic reconfigurable testing machine MTS.Multiaxial.DS1.4811.DS1.50019, designated for the testing of static and dynamic loads applied to large constructions. Displacements were measured by a tripod-mounted piston-type indicator.

Results. The programme of theoretical and experimental research into the behaviour of a shear connection with angle shear studs in steel-reinforced concrete slabs that also had steel deck profile sheets was developed on the basis of the analysis of regulatory documents and sources of research information. Laboratory tests showed that the strength of the shear connection in an angle stud depends not only on the geometry of the steel deck, used as the stay-in-place formwork, but also on the position of a shear stud in the deck.

Conclusions. The results of the theoretical and experimental research can be used to obtain new information about the strength and deformability of angle shear studs, connected by powder-actuated fasteners with the help of high strength expansion anchors; they allow to revise the currently used provisions governing the calculation of the reduction factor pursuant to SP 266.1325800.2016 with account taken of the design parameters of a shear connection.

KEYWORDS: steel-reinforced concrete floor, steel-reinforced concrete slabs, composite slabs, shear studs, profiled steel decking, reduction factor, expansion anchor

FOR CITATION: Tonkih G.P., Chesnokov D.A. An experimental study of a shear connection of steel-reinforced concrete slabs with angle shear studs. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(2):144-152. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.144-152 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Монолитное сталежелезобетонное перекрытие — это конструкция, включающая три элемента: стальную прокатную балку, железобетонную плиту и конструкцию их объединения. С точки зрения расчета такое перекрытие обычно представляется в виде балки комбинированного сечения. Объединение стальной и железобетонной частей сечения дает возможность добиться большей несущей способности перекрытия за счет более эффективных геометрических характеристик конечного сечения и, зачастую, наиболее результативной работы каждого из материалов. В случае устройства монолитной железобетонной плиты возможно применение стального профилированного настила в качестве несъемной опалубки, что разрешает снизить стоимость и трудоемкость производства работ.

При изгибе балки в ее сечении возникают касательные напряжения, действующие перпендикулярно поперечному сечению. В случае значительной нагрузки на комбинированную балку, силы трения между железобетонной плитой и стальным профилем может быть недостаточно для компенсации этих напряжений, что приводит к перемещению железобетонной плиты относительно стальной балки. Для того чтобы воспринять сдвигающую силу и сделать возможной совместную работу двух материалов, на верхней полке стальной балки устанавливают объединительные элементы (анкерные упоры) различных конфигураций (рис. 1). Помимо обеспечения устойчивости стальных опорных балок и повышения пространственной жесткости каркаса, объединение стальной и железобетонной частей перекрытия позволяет уменьшить сечения стальной балки, получив тем самым дополнительную выгоду [1].

Анкерные упоры можно классифицировать по одному из следующих признаков: податливость, геометрические характеристики, способ монтажа.

Податливость характеризует допустимую деформацию анкерного упора при сдвиге без разру-

шения. Несмотря на то что СП 266.1325800.2016¹ оперирует данным понятием при описании анкерных упоров, этот параметр он не нормирует. Согласно классификации «Еврокод 4»², анкерный упор может считаться податливым, если его нормативная деформация при сдвиге превышает 6 мм, в противном случае, упор считается жестким. Учет этого параметра важен при расчетах балок с «частичным объединением» (partial connection): проектировщик допускает некоторую податливость связей между сталью и железобетоном, что приводит к равномерному распределению сдвигающих сил вдоль шва объединения. Таким образом, применяя гибкие упоры, можно оптимизировать их количество в конструкции.

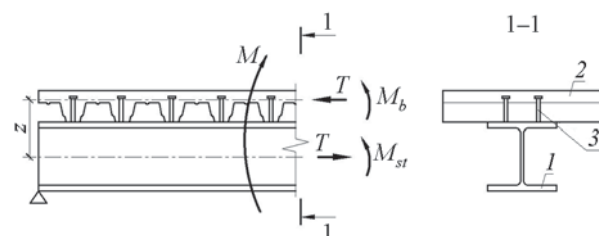


Рис. 1. Схема распределения усилий в комбинированной балке при изгибе: 1 — стальная балка; 2 — железобетонная плита; 3 — анкерные упоры; M — изгибающий момент от нагрузки; M_b — момент в плите; M_{st} — момент в стальной балке; T — продольные (сдвигающие) силы; z — плечо пары сил

Fig. 1. The distribution of forces in a composite beam in bending: 1 — steel beam; 2 — reinforced concrete slab; 3 — shear studs; M — bending moment caused by loading; M_b — bending moment in the slab; M_{st} — bending moment in the steel beam; T — shear forces; z — arm of force couple

¹ СП 266.1325800.2016. «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования (с Изменением № 1, с Поправкой).

² EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, 2004.

По геометрическим характеристикам анкерные упоры подразделяются на упоры в виде круглых стержней (стад-болты) (рис. 2, *a*), прокатных швеллеров, двутавров, уголков без подкрепляющих ребер (рис. 2, *b*) и т.д.

По способу монтажа анкерные упоры классифицируются на приварные и устанавливаемые с помощью техники прямого монтажа посредством стальных дюбель-гвоздей (рис. 2, *c*) [2, 3]. Также известны упоры в виде болтов с резьбой, прикрепляемых к стальной балке через сквозное отверстие во фланце с помощью гаек (рис. 2, *d*) [4, 5].

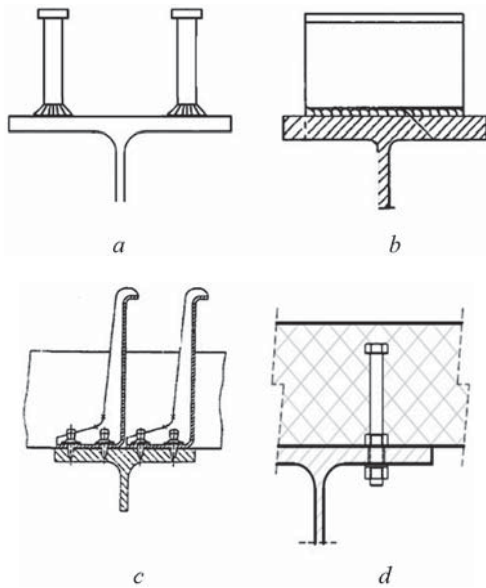


Рис. 2. Анкерные упоры: *a* — стад-болты; *b* — уголок без подкрепляющих ребер; *c* — уголковые упоры, закрепляемые с помощью техники прямого монтажа; *d* — болтовой упор

Fig. 2. Shear studs: *a* — stud bolts; *b* — angle without ribs; *c* — powder actuated shear studs, connected using the direct fastening technique; *d* — bolted shear stud

При расчете сталежелезобетонных перекрытий по СП 266.1325800.2016, конструкции объединения рассчитываются на срез с учетом интенсивности

воздействия сдвигающей силы в расчетном сечении. Для большинства существующих типов приварных элементов несущая способность анкерной связи определяется аналитически, исходя из геометрических характеристик упора, прочности стали упора и класса бетона плитной части сечения. В случае с уголковыми упорами, закрепляемыми с помощью стальных дюбелей, несущая способность объединительной конструкции должна быть определена в испытаниях, зафиксирована производителем упоров в технической документации.

К настоящему времени сформировалось два подхода к экспериментальному исследованию конструкции объединения комбинированных балок, в том числе для определения их прочностных и деформативных характеристик [6, 7]. Первый — испытание полноразмерных сталежелезобетонных перекрытий или отдельных комбинированных балок (рис. 3). Такой подход дает полную картину работы конструкции, приближенную к реальным условиям эксплуатации, однако, является достаточно дорогим и трудоемким. Данный метод апробирован отечественными учеными для изучения различных аспектов работы сталежелезобетонных перекрытий [8]. Второй способ — испытание фрагментов сталежелезобетонной балки на срез (рис. 4). Классические исследования таких ученых, как И. Виест³ и Дж. Оллгаард и Дж. Грант⁴, показали достаточную сходимость результатов при оценке прочностных и деформативных характеристик упоров при обоих подходах, поэтому большинство исследований последних десятилетий оперируют результатами экспериментов, выполненных вторым способом [9]. В частности, разработанный ЦНИИ «ПроектСтальКонструкция» в 2018 г.

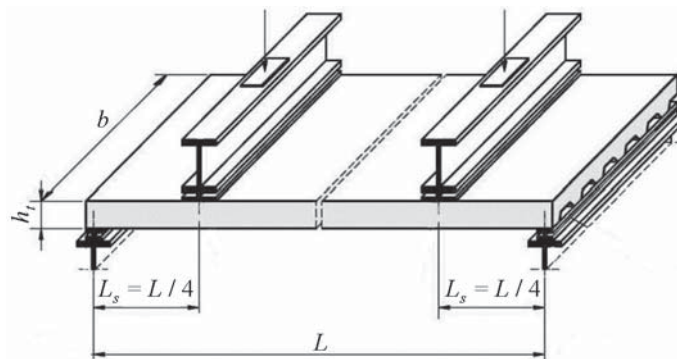


Рис. 3. Схема стандартного испытания полноразмерного комбинированного перекрытия

Fig. 3. A test pattern for a full-size composite beam

³ Viest I.M. Investigation of stud shear connectors for composite concrete and steel T-beams // Journal of the American Concrete Institute. 1956. No. 27. Pp. 875–891.

⁴ Grant J.A., Fisher J.W., Slutter R.G. Composite beams with formed steel deck // Engineering Journal, AISC. 1977. Vol. 14 (1). Pp. 24–43.

ГОСТ на методы испытания угловых упоров⁵ базируется на данном подходе к испытаниям.

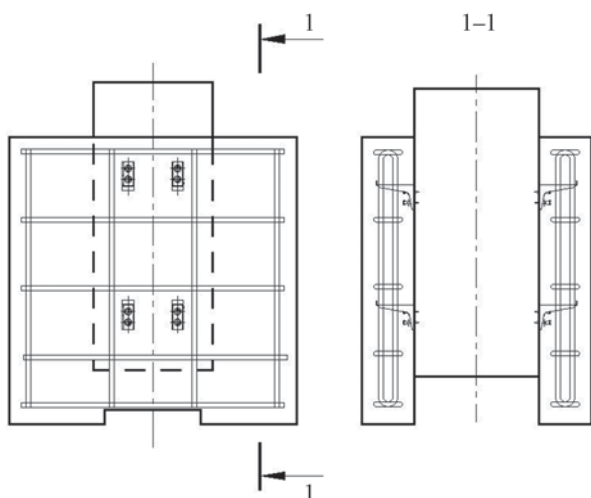


Рис. 4. Схема стандартного испытания фрагмента сдвигового соединения комбинированного перекрытия

Fig. 4. A standard test pattern applicable to an element of a shear connection of a composite beam

⁵ ГОСТ Р 58336-2018. Упоры угловые анкерные. Методы испытаний.

Сегодня исследования свойств анкерных связей сталежелезобетонных перекрытий в отечественной и зарубежной науке развиваются в следующих направлениях: оценка влияния особых условий эксплуатации (циклическое нагружение [10, 11], огневое воздействие [12, 13]), изучение конструктивных параметров установки упоров в комбинированной конструкции [14, 15], совершенствование методики расчета [16–18]. Говоря о проблемах конструирования сталежелезобетонных перекрытий, следует упомянуть об ограничениях, которые накладывает применение профилированного настила в качестве несъемной опалубки: оно оказывает существенное влияние на восприятие нагрузки упором. В бетонной плите без настила сдвигающее усилие от изгиба распределяется вдоль анкерного упора неравномерно, достигая максимума у основания (рис. 5, *a*). Использование профилированного настила меняет характер взаимодействия бетона с анкерным упором: часть бетона, находящаяся внутри гофры настила, выключается из работы. Таким образом, площадь контакта при передаче сдвигающей силы уменьшается, что в отдельных случаях может привести к хрупкому разрушению соединения по бетону (рис. 5, *b*). Для того чтобы учесть влияние профилированного листа на несущую способность, приме-

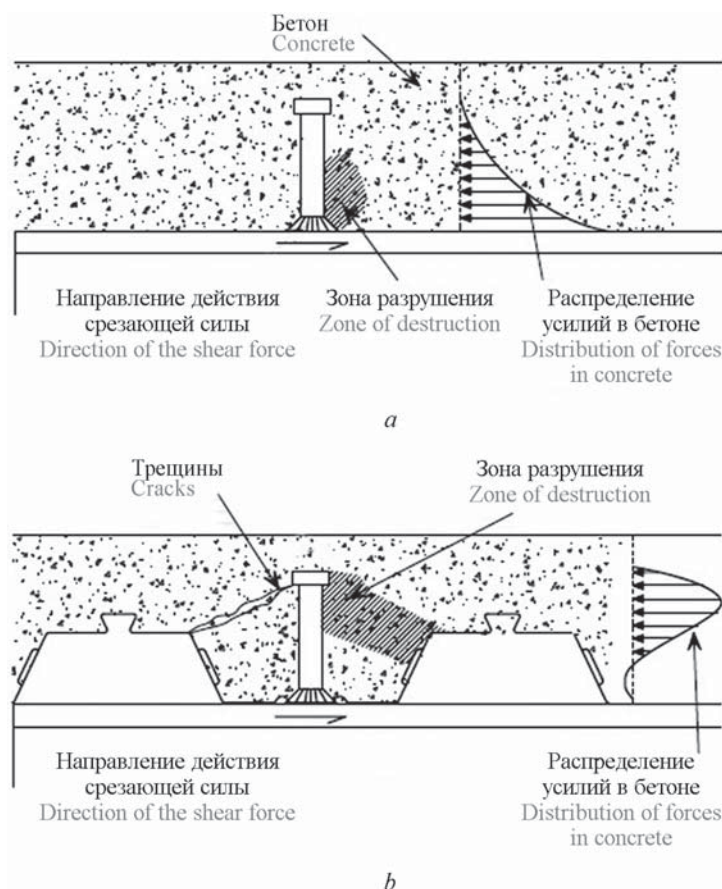


Рис. 5. Распределение сдвигающей силы в бетонной плите при изгибе: *a* — без профилированного настила; *b* — с профилированным настилом

Fig. 5. Shear force distribution in a composite beam in bending: *a* — no steel deck; *b* — steel deck available

няют коэффициент редукиции путем умножения его на несущую способность упора, вычисленную для плиты без профилированного настила.

Существуют различные аналитические зависимости влияния формы профиля листа, краевых и осевых расстояний при расстановке анкерных упоров, в том числе зафиксированных в национальных нормативных документах разных стран. В СП 266.1325800.2016 эта зависимость представлена в виде формулы понижающих коэффициентов k_t для покрытий с профилированным настилом, уложенным гофрами настила поперек балок, и k_l для покрытий с профилированным настилом, уложенным гофрами настила вдоль балок:

$$k_t = 0,7 \frac{b_0 (h_{an} - h_n)}{h_n^2 \sqrt{n_r}} \leq 1;$$

$$k_l = 0,6 \frac{b_0 (h_{an} - h_n)}{h_n^2},$$

где b_0 — ширина полки настила; h_{an} — полная высота упора; h_n — высота гофра настила; n_r — количество упоров в одном гофре, принимается равным 1, если в каждой гофре установлен один упор; 2, если в каждой гофре установлено два упора и более.

Отличительной особенностью СП 266.1325800 является допуск на применение иных коэффициентов редукиции на основании нормативной документации. Это положение выглядит достаточно дальновидным, поскольку, во-первых, существующие понижающие коэффициенты основаны на испытаниях приварных стержней круглого сечения и могут не учитывать особенностей работы анкерных упоров иной конструкции; во-вторых, существующие коэффици-

енты основаны на изысканиях, выполненных еще в 1970-е годы при ограниченных ресурсах и технических возможностях того периода. В разное время исследования Старка Ван Хови⁶ и Деррика Эйлерса⁷ продемонстрировали излишнюю консервативность расчетных формул, приведенных в Еврокоде [19, 20], которые построены на тех же зависимостях, что и подход СП 266.1325800.2016. Упомянутыми авторами были предложены различные расчетные модели для приварных стержней круглого сечения, которые еще требуют дополнительной апробации, в том числе для упоров, закрепляемых на стальной балке с помощью дюбелей или резьбового соединения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе проводятся исследования работы сдвигового соединения на уголковых анкерных упорах типа Hilti X-HVB в монолитных сталежелезобетонных перекрытиях с применением стального профилированного настила с целью оценки их прочностных и деформативных характеристик. В качестве исходной методики испытаний выбран ГОСТ Р 58336-2018, составлена программа лабораторных испытаний из 15 серий образцов. Опытный образец представляет собой фрагмент сталежелезобетонного перекрытия, в котором к внешней по-

⁶ Stark J.W.B., Van Hove B.W.E.M. Statistical analysis of push-out tests on stud connectors in composite steel and concrete structures, Part 2: Solid Concrete Slabs, TNO report BI-91-163. Delft, Netherlands, 1991. P. 196.

⁷ Oehlers D.J., Brandford M.A. Composite steel and concrete structural members: Fundamental behavior. Pergamon, Австралия. 1995. P. 506.



Рис. 6. Общий вид опытных образцов: а — образец первой серии; б — образец второй серии с профилированным настилом NS44

Fig. 6. Tested specimens: a — first series specimen; b — second series specimen with a NS44 steel deck

верхности полок двутавра 25К2, посредством порохового монтажного пистолета Hilti DX76 через дюбельное соединение закреплены угловые анкерные упоры. Плиты армированы арматурными сетками с шагом 200 × 200 мм в два слоя арматурой Ø10 А500С.

Программа включает в себя два этапа. Первый этап — испытание пяти серий образцов с плитами со съемной опалубкой (рис. 6, а). Второй этап — десяти серий образцов с плитами, устроенными по несъемной опалубке из профилированных листов марок НС44, Н60 и Н75 по ГОСТ 24045-2016⁸.

⁸ ГОСТ 24045-2016. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства. Технические условия.

Образцы первой серии выполнены с переменной высотой (95, 125, 140 мм) и различной ориентацией угловых упоров (параллельно и перпендикулярно вектору воздействия сдвигающих сил) в монолитных железобетонных плитах высотой 120, 150 и 160 мм. Назначение первой серии — определение «эталонной» прочности упоров для дальнейшего анализа и проверка работоспособности упоров, установленных перпендикулярно стальной балке (подобная конфигурация в нормативной документации производителя не описана). Образцы второй серии выполнены с переменной высотой (120 и 150 мм) и с различной высотой, числом и ориентацией упоров относительно гофр профилированного настила. Подробное описание установочных параметров каждой серии приведено в табл.

Программа испытания угловых анкерных упоров

A testing programme for angle shear studs

Номер серии Series number	Высота упоров X-HVB The height of X-HVB studs	Количество упоров в образце, шт. Number of studs in a sample, pieces	Толщина ж/б плит, мм Thickness of reinforced concrete slabs, mm	Ориентация упоров к балке Position of studs in relation to the beam	Марка профлиста Grade of profiled decking steel
1	80	8	110	Параллельно Parallel	—
2	125	8	150	Параллельно Parallel	—
3	140	8	160	Параллельно Parallel	—
4	80	8	110	Перпендикулярно Perpendicular	—
5	125	8	150	Перпендикулярно Perpendicular	—
6	125	12	150	Перпендикулярно Perpendicular	НС44
7	80	12	110	Перпендикулярно Perpendicular	НС44
8	125	12	150	Перпендикулярно Perpendicular	Н75
9	125	6	150	Перпендикулярно Perpendicular	Н75
10	80	12	110	Параллельно Parallel	НС44
11	125	12	150	Параллельно Parallel	НС44
12	125	12	150	Перпендикулярно Perpendicular	Н75
13	125	12	150	Перпендикулярно Perpendicular	Н60
14	125	6	150	Перпендикулярно Perpendicular	Н60
15	140	12	160	Параллельно Parallel	Н60

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытания по определению несущей способности угловых упоров на срез выполнены в лаборатории испытаний строительных материалов, изделий и конструкций НИУ МГСУ на универсальной сервогидравлической реконфигурируемой установке для испытаний крупноразмерных конструкций на статические и динамические нагрузки MTS.Multiaxial.DS1.4811.DS1.50019 в 2019–2020 гг. Измерение перемещений проводилось с помощью индикатора поршневого типа, установленного на независимом штативе. Измерение нагружающего усилия осуществлялось с помощью встроенного в гидроцилиндр датчика силы. Нагружение производилось непрерывно с заданной скоростью — 0,83 кН/с. В ходе экспериментов определялась фиксация нагрузок и вертикальных перемещений.

Разрушение в образцах первой серии происходило по стали дюбелей вследствие среза, что является нормальным для испытанной конфигурации образца. Механизмы разрушения второй серии разнятся в зависимости от высоты профиля настила и краевых расстояний от упора до стенок профиля

настила. В настоящий момент ведется оценка результатов эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительные результаты эксперимента подтверждают применимость угловых анкерных упоров типа Hilti X-HVB в качестве элемента, обеспечивающего сдвиговое соединение сталежелезобетонного перекрытия. Отмечено, что на прочность сдвигового соединения на угловом упоре оказывают влияние не только геометрические характеристики применяемого для несъемной опалубки профилированного настила, но и расположение упора внутри гофры. Это особенно актуально для профилированных листов, имеющих на опорной стороне ребро жесткости, которое не позволяет разместить упор по центру гофры. В этом случае, зафиксированный в СП 266.1325800.2016 порядок расчета коэффициента редукции может оказаться недостаточно консервативным и в будущем дополнен либо уточняющими коэффициентами, либо конструктивными требованиями, ограничивающими допустимую область размещения упоров внутри гофры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Туснин Р.А., Коляго А.А. Конструкция и работа сталежелезобетонного перекрытия с использованием сборных пустотных железобетонных плит // Современная наука и инновации. 2016. № 3 (15). С. 141–147.
2. Рихтер Д.А., Иовенко А.А., Ершов М.Н. Проектирование сталежелезобетонных перекрытий по стальному профилированному настилу с применением анкерных упоров Hilti X-HVB // Технология и организация строительного производства. 2013. № 4 (5). С. 17–22.
3. Gluhović N. Behaviour of shear connections realised by connectors fastened with cartridge fired pins. Belgrade, 2019.
4. Каранетов Э.С., Атанов А.В. Анализ существующих способов включения стали и железобетона в совместную работу // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2018. Т. 15. № 4. С. 592–604.
5. Pavlović M. Resistance of bolted shear connectors in prefabricated steel-concrete composite decks. Belgrade, 2013. 255 p.
6. Замалиев Ф.С. Прочность и деформативность сталежелезобетонных изгибаемых конструкций гражданских зданий при различных видах нагружения : дис. ... д-ра техн. наук. М. : КГАСУ, 2013. 43 с.
7. Eggert Florian. Einfluss der verdübelung auf das trag- und verformungsverhalten von verbundträgern mit und ohne profilblech. Stuttgart : Institut für Konstruktion und Entwurf, 2019. 387 p.
8. Замалиев Ф.С., Морозов В.А. Натурные испытания и численные эксперименты сталежелезобетонного перекрытия // Вестник МГСУ. 2015. № 11. С. 58–67. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.11.58-67
9. Pallarés L., Jerome F.H. NSEL report series report No. NSEL-013. 2009. 35 p.
10. Мирсаяпов И.Т., Замалиев Ф.С., Замалиев Э.Ф. Экспериментальные исследования податливости контакта слоев сталежелезобетонных конструкций при малоцикловых нагружениях // Вестник МГСУ. 2011. № 2 (2). С. 163–168.
11. Henderson I.E.J., Zhu X.Q., Uy B., Mirza O. Dynamic behaviour of steel-concrete composite beams with different types of shear connectors // Engineering Structures. 2015. Vol. 103. Pp. 298–307. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.08.035
12. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Огнестойкость конструкции, обеспечивающей сдвиговое соединение сталежелезобетонных балок // Строительство и реконструкция. 2020. № 6 (92). С. 59–65. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-92-6-59-65
13. Кривцов Ю.В., Пивоваров В.В., Петров В.В. Расчет огнестойкости сталебетонных перекрытий с тонкослойной огнезащитой // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXVIII Междунар. науч.-практ. конф. Балашиха, 2016. С. 395–404.

14. Колякова В.М., Шармаков Е.И. Особенности работы сталежелезобетонных пролетных конструкций при обеспечении их анкеровки в пролете // Наукові нотатки. 2014. № 46. С. 280–285.

15. Luo Y., Zhou D.H., Duan B. Study on the influence of step changed spacing of shear stud connector on the behavior of continuous composite beams // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 153. Issue 5. P. 052060. DOI: 10.1088/1755-1315/153/5/052060

16. Замалиев Ф.С., Филиппов В.В. Расчетно-экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 7. С. 29–36.

17. Фаттахова А.И. Влияние горизонтальных нагрузок на работу стад-болтов в комбинированных

плитах перекрытия // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 1. С. 31–42. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.31-42

18. Hicks S.J., Smith A.L. Stud shear connectors in composite beams that support slabs with profiled steel sheeting // Structural Engineering International. 2014. Vol. 24. Issue 4. Pp. 246–253. DOI: 10.2749/101686614X13830790993122

19. Odenbreit C., Nellinger S. Mechanical model to predict the resistance of the shear connection in composite beams with deep steel decking // Steel Construction. 2017. Vol. 10. Issue 3. Pp. 248–253. DOI: 10.1002/stco.201710029

20. Ernst S., Bridge R.Q., Wheeler A. Correlation of beam tests with pushout tests in steel-concrete composite beams // Journal of Structural Engineering. 2010. Vol. 136. Issue 2. Pp. 183–192. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2010)136:2(183)

Поступила в редакцию 8 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 16 февраля 2021 г.

Одобрена для публикации 18 февраля 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Геннадий Павлович Тонких** — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник; **Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (ВНИИ ГОЧС)**; 121352, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 7; профессор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 697724; 5059144@mail.ru;

Денис Александрович Чесноков — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; инженер по сертификации; **Хилти Дистрибьюшн ЛТД**; 141402, г. Химки, ул. Ленинградская, стр. 25; SPIN-код: 1405-2285, ORCID: 0000-0002-4620-4442; Chesnokovdenis23@gmail.com.

REFERENCES

1. Tusnin A.R., Kolyago A.A. The construction and operation of the composite beams using the prefabricated reinforced concrete slab hollow core. *Modern Science and Innovations*. 2016; 3(15):141-147. (rus.).

2. Rihter D.A., Iovenko A.A., Ershov M.N. Designing of permanent steel decking slabs with X-HVB anchor technology. *Technology and Organization of Construction Production*. 2013; 4(5):17-22. (rus.).

3. Gluhović N. *Behaviour of shear connections realised by connectors fastened with cartridge fired pins*. Belgrade, 2019.

4. Karapetov E.S., Atanov A.A. Analysis of existing methods of incorporation of steel and reinforced concrete in combined action. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2018; 15(4):592-604. (rus.).

5. Pavlović M. *Resistance of bolted shear connectors in prefabricated steel-concrete composite decks*. Belgrade, 2013; 255.

6. Zamaliev F.S. *Strength and deformability of steel-reinforced concrete bending structures of civil buildings under various types of loading : PhD thesis*. Moscow, KGASU, 2013; 43. (rus.).

7. Eggert Florian. *Einfluss der Verdübelung auf das Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit und ohne Profiblech*. Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, 2019; 387.

8. Zamaliev F.S., Morozov V.A. Field tests and numerical experiments of composite reinforced concrete floor. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 11:58-67. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.11 (rus.).

9. Pallarés L., Jerome F.H. *NSEL Report Series Report No. NSEL-013*. 2009; 35.

10. Mirsayapov I.T., Zamaliev F.S., Zamaliev E.F. Experimental researches of a layers contact pliability in steelconcrete construction at lowcycled loadings. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 2-2:163-168. (rus.).

11. Henderson I.E.J., Zhu X.Q., Uy B., Mirza O. Dynamic behaviour of steel–concrete composite beams with different types of shear connectors. *Engineering Structures*. 2015; 103:298-307. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.08.035

12. Tonkih G.P., Chesnokov D.A. Fire resistance of shear connectors for composite beams. *Building and Reconstruction*. 2020; 6(92):59-65. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-92-6-59-65 (rus.).
13. Krivcov Yu.V., Pivovarov V.V., Petrov V.V. Calculation of fire resistance of steel-concrete floors with thin-layer fire protection. *Actual problems of fire safety: proceedings of the XXVIII International Scientific and practical Conference*. Balashikha, 2016; 395-404. (rus.).
14. Kolyakova V.M., Sharmakov E.L. Features of the work of steel-reinforced concrete structures when providing anchoring in the span. *Naukovi notatki*. 2014; 46:280-285.
15. Luo Y., Zhou D.H., Duan B. Study on the influence of step changed spacing of shear stud connector on the behavior of continuous composite beams. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 153(5):052060. DOI: 10.1088/1755-1315/153/5/052060
16. Zamaliev F.S., Filippov V.V. Calculation-experimental studies of steel-reinforced concrete structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 7:29-36. (rus.).
17. Fattahova A.I. Impact of horizontal loads on the work of stud bolts in combined floor slabs. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(1):31-42. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.31-42 (rus.).
18. Hicks S.J., Smith A.L. Stud shear connectors in composite beams that support slabs with profiled steel sheeting. *Structural Engineering International*. 2014; 24(4):246-253. DOI: 10.2749/101686614X13830790993122
19. Odenbreit C., Nellinger S. Mechanical model to predict the resistance of the shear connection in composite beams with deep steel decking. *Steel Construction*. 2017; 10(3):248-253. DOI: 10.1002/stco.201710029
20. Ernst S., Bridge R.Q., Wheeler A. Correlation of beam tests with pushout tests in steel-concrete composite beams. *Journal of Structural Engineering*. 2010; 136(2):183-192. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2010)136:2(183)

Received December 8, 2020.

Adopted in revised form on February 16, 2021.

Approved for publication on February 18, 2021.

BIONOTES: **Gennadij P. Tonkih** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher; **All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergencies of Russia (VNIIGOChS)**; 7 Davydkovskaya st., Moscow, 121352, Russian Federation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 697724; 5059144@mail.ru;

Denis A. Chesnokov — postgraduate; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; certification engineer; **Hilti Distribution LTD**; 25 Leningradskaya st., Khimki, 141402, Russian Federation; SPIN-code: 1405-2285, ORCID: 0000-0002-4620-4442; Chesnokovdenis23@gmail.com.

Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков

А.А. Соловьева, С.А. Соловьев

Вологодский государственный университет (ВоГУ); г. Вологда, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие вероятностных подходов к оценке механической безопасности несущих элементов строительных конструкций является одним из актуальных научных направлений в строительной отрасли.

Материалы и методы. Для моделирования случайных величин в математических моделях предельных состояний при расчете надежности ферм предлагается использовать не отдельные точные функции распределения вероятностей случайных величин, а р-блоки, состоящие из двух граничных функций распределения. Граничные функции распределения создают область распределения вероятностей, в которой находится действительная функция распределения случайной величины, но наперед неизвестная вследствие алеаторной и эпистемологической неопределенности. Выбор р-блока для моделирования случайной величины будет зависеть от вида и количества статистической информации о случайной величине.

Результаты. На примере вероятностной модели веса снегового покрова и численного моделирования испытаний стальных образцов стержней фермы показано, что для практических задач по вероятностной оценке надежности элементов строительных конструкций (в том числе ферм) наиболее рационально применение р-блоков для моделирования случайных величин. Предложены вероятностная модель р-блока снеговой нагрузки, построенная по распределению Гумбеля; математическая модель для расчета надежности элемента стальной плоской фермы, на основе которой рассмотрен численный пример расчета надежности. Приведены расчетные формулы для оценки надежности элемента фермы при нескольких вариантах р-блоков, используемых для описания случайных величин в зависимости от количества имеющейся статистической информации.

Выводы. Р-блоки позволяют дать более осторожную оценку надежности элемента конструкции, но в то же время менее информативную — представленную в интервальной форме. Для получения более точного интервала надежности следует уточнить интервальные оценки параметров распределений или виды р-блоков в расчетной математической модели предельного состояния, что влечет за собой повышение экономических и трудовых затрат на сбор статистической информации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность, вероятность отказа, р-блоки, плоская ферма, интервальная оценка, снеговая нагрузка, неопределенность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Соловьева А.А., Соловьев С.А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 153–167. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.153-167

Reliability analysis of planar steel trusses based on p-box models

Anastasia A. Soloveva, Sergey A. Solovev

Vologda State University (VSU); Vologda, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The development of probabilistic approaches to the assessment of mechanical safety of bearing structural elements is one of the most relevant areas of research in the construction industry. In this research, probabilistic methods are developed to perform the reliability analysis of steel truss elements using the p-box (probability box) approach. This approach ensures a more conservative (interval-based) reliability assessment made within the framework of attaining practical objectives of the reliability analysis of planar trusses and their elements. The truss is analyzed as a provisional sequential mechanical system (in the language of the theory of reliability) consisting of elements that represent reliability values for each individual bar and truss node in terms of all criteria of limit states.

Materials and methods. The co-authors suggest using p-blocks consisting of two boundary distribution functions designated for modeling random variables in the mathematical models of limit states performed within the framework of the truss reliability analysis instead of independent true functions of the probability distribution of random variables. Boundary distribution functions produce a probability distribution domain in which a true distribution function of a random variable is located. However this function is unknown in advance due to the aleatory and epistemic uncertainty. The choice of a p-block for modeling a random variable will depend on the type and amount of statistical information about the random variable.

Results. The probabilistic snow load model and the numerical simulation of tests of steel samples of truss rods are employed to show that p-box models are optimal for modeling random variables to solve numerous practical problems of the probabilistic assessment of reliability of structural elements. The proposed p-box snow load model is based on the Gumbel distribution. The mathematical model used to perform the reliability analysis of planar steel truss elements is proposed. The co-authors provide calculation formulas to assess the reliability of a truss element for different types of p-blocks used to describe random variables depending on the amount of statistical data available.

Conclusions. The application of statistically unsubstantiated hypotheses for choosing the probability distribution law or assessing the parameters of the probability distribution of a random variable leads to erroneous assessments of the reliability of structural elements, including trusses. P-boxes ensure a more careful reliability assessment of a structural element, but at the same time this assessment is less informative, as it is presented in the form of an interval. A more accurate reliability interval requires interval-based assessments of distribution parameters or types of p-boxes applied to mathematical models of the limit state, which entails an increase in the economic and labor costs of the statistical data.

KEYWORDS: reliability, probability of failure, p-boxes, planar truss, interval-based assessment, snow load, uncertainty

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

ВВЕДЕНИЕ

Развитие вероятностных подходов к оценке механической (конструкционной) безопасности несущих элементов строительных конструкций зданий и сооружений является важной научной задачей в свете требований Федерального Закона РФ от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и межгосударственного стандарта ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований». Так, в актуальной статье «Вестника МГСУ» № 9 за 2020 г. [1] отмечается, что «с развитием цифровых технологий, с возрастающими возможностями численных расчетов появляется острая необходимость в развитии стохастических подходов в строительстве на базе математической статистики, теории вероятности, теории надежности и других дисциплин». В работе [2] также указывается, что моделирование работы строительных конструкций связано с оценкой неопределенностей различного рода, которые могут быть учтены путем использования методов теории надежности и вероятностного проектирования.

Одна из научных проблем — оценка надежности стержневых систем, например стропильных и подстропильных ферм при ограниченной статистической информации в математических моделях предельных состояний. Применение метода предельных состояний (или метода частных коэффициентов по Еврокоду) при расчете шарнирно-стержневых систем не позволяет получить комплексное представление о надежности системы. Использование в расчетах одних и тех же коэффициентов запаса для шарнирно-стержневой системы из нескольких элементов и системы из нескольких десятков элементов не дает возможность сделать их равнонадежными. В монографии по теории надежности В.Д. Райзера и О.В. Мкртычева [3] авторы замечают, что при применении метода предельных состояний «у проектировщика практически отсутствует информация, насколько им успешно решена задача обеспечения нормального функционирования сооружения».

В практических инженерных задачах по вероятностной оценке надежности несущих элементов строительных конструкций специалисты сталкиваются с различными неопределенностями при анализе

статистических данных. Как правило, различают две группы неопределенностей: алеаторная неопределенность (aleatory uncertainty) и эпистемологическая неопределенность (epistemic uncertainty). Алеаторная неопределенность возникает вследствие объективной стохастической природы явлений, например, снеговая нагрузка, неоднородность физико-механических свойств материалов и др. Эпистемологическая неопределенность возникает из-за недостатка статистической информации или неточности математических моделей, описывающих явление: событие, свойство и т.д.

Эпистемологическая неопределенность, в отличие от алеаторной, может быть уменьшена, к примеру, при увеличении числа испытаний.

Для статистического моделирования случайных величин с учетом эпистемологической и алеаторной неопределенностей используют р-блоки (p-box или probability box [4–6]). Р-блоки формируют левую и правую границы функции распределения вероятности случайной величины, а также создают ограничения на ее форму. Такие подходы позволяют дать более осторожную оценку надежности при отсутствии необоснованных предположений о форме функции распределения вероятностей или значений ее параметров.

В исследовании [7] отмечается, что «при вероятностном анализе и оценке структурной надежности конструкций часто бывает трудно или невозможно надежно идентифицировать надлежащие вероятностные модели для случайных величин из-за ограниченных данных, например ограниченных наблюдаемых выборок или физических явлений. Для решения этой проблемы можно использовать вероятностно-ограничительный подход для моделирования такой неточной вероятностной информации, т.е. рассматривая границы (неизвестной) функции распределения, а не постулируя единственную, точно заданную функцию распределения». В работе [2] приводится следующее высказывание: «теория вероятностей основана на предположении, что вероятностная мера известна точно, что приводит к точно определенной функции распределения вероятностей. Однако в случаях неполного и/или ограниченного представления о случайной величине, алеаторная неопределенность (естественная изменчивость) и эпистемологическая неопределен-

ность (отсутствие знания) могут возникать одновременно. Эпистемологическая неопределенность не может быть адекватно рассмотрена в контексте теории вероятностей наряду с алеаторной неопределенностью [8]. Следовательно, для полного отражения неопределенности требуется более общая формулировка вероятностной меры».

Для «более общей формулировки вероятностной меры» может быть применена теория свидетельств Демпстера – Шафера [9–11]. Теория свидетельств Демпстера – Шафера объясняет эпистемическую неопределенность, заменяя вероятностную меру двумя значениями: функциями доверия и правдоподобия [9–11]. Функция доверия измеряет минимальную вероятность, связанную с событием, тогда как функция правдоподобия измеряет максимальную вероятность, связанную с тем же событием. Модель р-блока является частным случаем теории свидетельств, рассматривающей только вложенное множество событий $\{X \leq x\}$, которое, в свою очередь, связано с определением функции распределения вероятностной случайной величины.

В данной работе предлагается рассмотреть подход к оценке надежности стальных плоских ферм с использованием р-блоков. При оценке надежности следует учесть ее системный характер — ферма представляется в виде условной механической системы с последовательным соединением элементов. В качестве элементов системы принимаются значения вероятностей безотказной работы узлов и стержней фермы, полученные с учетом всех критериев предельного состояния.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Снеговая нагрузка — один из главных факторов, определяющих вероятность безотказной работы большинства ферм. Для расчета надежности фермы необходимо предварительно составить веро-

ятностную (стохастическую) модель снеговой нагрузки на ферму.

В соответствии с трудом [3], вероятностная модель нагрузки строится через высоту и вес снежного покрова. Максимальная высота снежного покрова за отчетный период (год) является случайной величиной. На рис. 1 приведен график эмпирической функции $F_H^{emp}(H)$ распределения максимальных высот снежного покрова в г. Вологда за период с 1966 по 2016 гг. по метеостанции № 270370¹.

Согласно п. 5.3 ГОСТ Р 53613-2009 «Воздействие природных внешних условий на технические изделия. Общая характеристика. Осадки и ветер», плотность слежавшегося снега изменяется в пределах от 200 до 400 кг/м³. На основании этих сведений можно построить нижнюю $F_S^{emp}(s)$ и верхнюю $\bar{F}_S^{emp}(s)$ граничные функции эмпирического распределения для ежегодных максимумов веса снежного покрова (рис. 2). Коэффициент вариации веса снежного покрова за рассматриваемый период составляет 0,25.

Как видно из рис. 2, вероятностная модель снеговой нагрузки может быть охарактеризована р-блоком, как минимум вследствие неопределенности в виде плотности снежного покрова.

В ряде исследований [3, 12–14] отмечается, что наиболее подходящим для вероятностного моделирования снеговой нагрузки является закон распределения Гумбеля (или двойной экспоненциальный закон) с аналитическим видом:

$$F_S(s) = \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha - s}{\beta}\right)\right], \quad (1)$$

где α — параметр центра; β — параметр сдвига.

¹ Вологда, снежный покров и статистика за последние годы. URL: https://climate-energy.ru/weather/spravochnik/sndp/climate_sprav-sndp_270370766.php

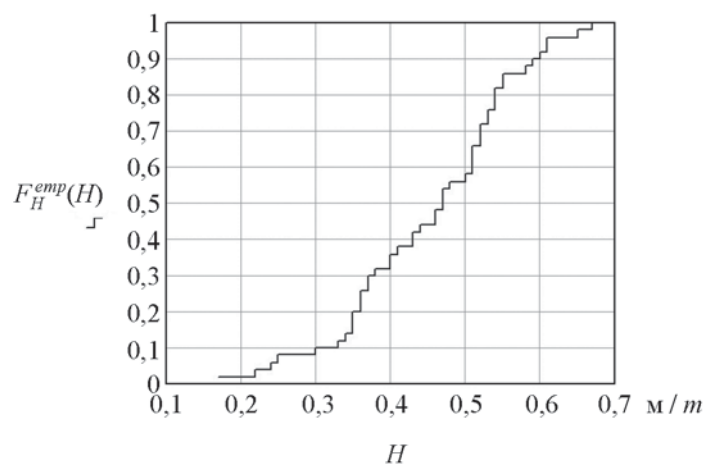


Рис. 1. Эмпирическая функция $F_H^{emp}(H)$ распределения максимальных высот снежного покрова в г. Вологда, м [3]

Fig. 1. Empirical distribution function $F_H^{emp}(H)$ describing the maximal snow cover height in Vologda [3], m

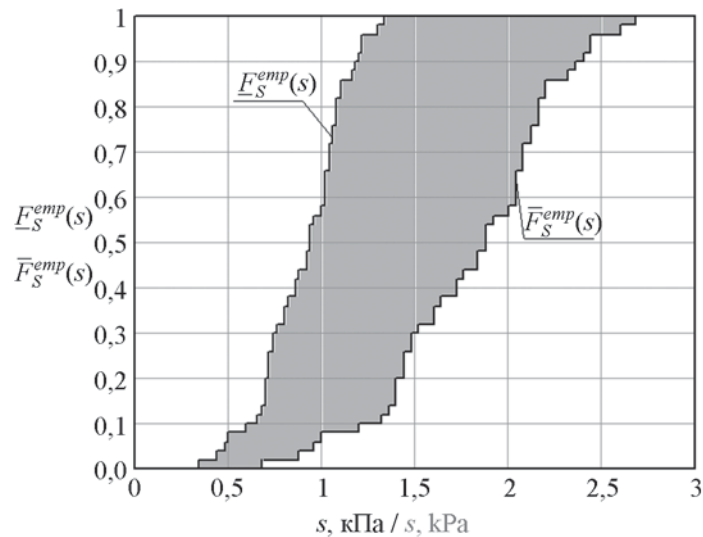


Рис. 2. Нижняя $F_S^{emp}(s)$ и верхняя $\bar{F}_S^{emp}(s)$ граничные функции распределения для максимумов веса снежного покрова за 1966–2016 гг., кПа

Fig. 2. The lower $F_S^{emp}(s)$ and upper $\bar{F}_S^{emp}(s)$ boundaries of the distribution function describing maximal snow loads in 1966–2016 in Vologda, kPa

Параметры закона распределения Гумбеля могут быть вычислены по статистической выборке следующим образом:

$$\beta = (0,78 + 1,54N^{-0,75})\sigma_S,$$

$$\alpha = m_S - [0,45 + 0,34N^{-0,69}]\sigma_S, \quad (2)$$

где N — количество значений в выборке; m_S — математическое ожидание случайной величины; σ_S — среднеквадратическое отклонение случайной величины.

Для IV снежного района (г. Вологда) в исследовании доктора технических наук Т.В. Золиной [12]

предложены следующие значения для вероятностного представления снеговой нагрузки: $\alpha = 1,08$ кПа, $\beta = 4,12$ кПа. На рис. 3 приведены графики граничных эмпирических функций распределения снеговой нагрузки $F_S^{emp}(s)$ и $\bar{F}_S^{emp}(s)$ (по аналогии с рис. 2), а также график функции распределения вероятностей $F_S(s)$ снеговой нагрузки по закону Гумбеля с параметрами IV снежного района из работы [12].

Как видно из рис. 3, предложенная в работе [12] вероятностная функция распределения снеговой нагрузки $F_S(s)$ попадает в р-блок, построенный по статистическим данным снеговой нагрузки для г. Вологда.

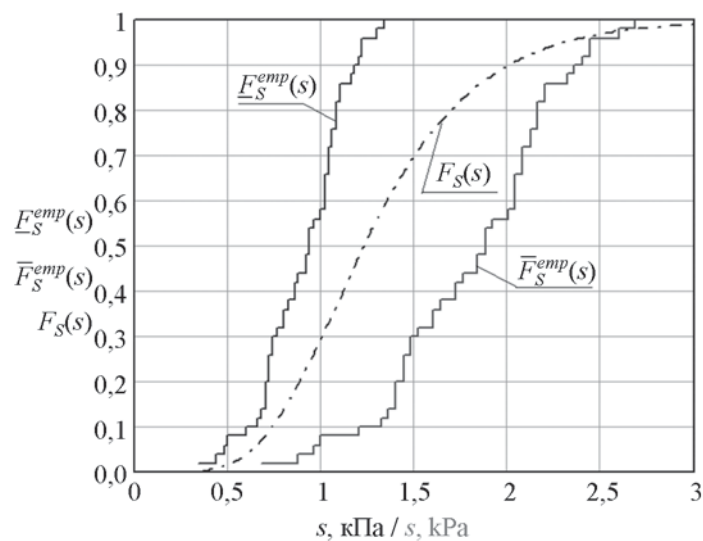


Рис. 3. Граничные эмпирические функции распределения вероятностей для снеговой нагрузки и вероятностная модель снеговой нагрузки, кПа [12]

Fig. 3. Empirical boundary probability distribution functions designated for the snow load and a probabilistic snow load model developed pursuant to [12], kPa

В СП 20.13330.2011, для которого были предложены параметры снеговой нагрузки [12], вес снегового покрова принимается как превышаемый в среднем один раз в $T_0 = 25$ лет ежегодный максимум веса снежного покрова, определяемый на основе маршрутных снегосъемок о запасах воды на защищенных от прямого воздействия ветра участках (в лесу под кронами деревьев или на лесных полянах) за период не менее 20 лет. Следовательно, обеспеченность веса снежного покрова составляет:

$$F(S_g) = \frac{1}{T_0} = 0,04.$$

В СП 20.13330.2016 нормативное значение веса снежного покрова может быть вычислено как $S_g = S_{g,50}/1,4$, где $S_{g,50}$ — превышаемый в среднем один раз в $T_0 = 50$ лет ежегодный максимум веса снежного покрова, определяемый на основе сведений многолетних маршрутных снегосъемок о запасах воды в снеговом покрове на защищенных от прямого воздействия ветра участках местности. Обеспеченность нагрузки $S_{g,50}$ составит $F(S_{g,50}) = \frac{1}{50} = 0,02$.

Вычислим параметры распределения (2) на основе новых данных.

При $N \rightarrow \infty$ параметры закона распределения Гумбеля примут вид: $\beta = 0,78 \cdot \sigma_S$, $\alpha = m_S - 0,45\sigma_S$,

откуда можно выразить: $\sigma_S = \frac{\beta}{0,78}$, $m_S = \alpha + \frac{0,45}{0,78}\beta$.

Из выражения (1) следует, что $S_g = \alpha - \beta \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T_0}\right)\right)$. Подставим полученные выражения в уравнение индекса надежности [12]:

$$\beta_{Sg} = \frac{S_g - m_S}{\sigma_S}. \text{ Получим:}$$

$$\beta_{Sg} = \frac{\alpha - \beta \cdot \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T_0}\right)\right) - \alpha + \frac{0,45}{0,78}\beta}{\frac{\beta}{0,78}}.$$

Преобразуем полученное выражение к виду:

$$\beta_{Sg} = 0,45 - 0,78 \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T_0}\right)\right). \quad (3)$$

Для нагрузки $S_{g,50}$ индекс надежности по формуле (3) составит: $\beta_{Sg} = 0,45 - 0,78 \cdot \ln(-\ln(1 - 0,02)) = 3,494$.

Из записи индекса надежности $\beta_{Sg} = \frac{S_g - m_S}{\sigma_S}$

следует $\beta_{Sg} = \frac{S_g - m_S}{m_S \text{Var}(S_g)} \rightarrow \beta_{Sg} m_S \text{Var}(S_g) = S_g + m_S \rightarrow S_g = \beta_{Sg} m_S \text{Var}(S_g) + m_S$.

В соответствии с п. 10.2. СП 20.13330.2016, нормативный вес снежного покрова также может быть вычислен по формуле: $S_g = \frac{S_{g,50}}{1,4}$. Тогда для нормативного значения веса снежного покрова справедливо следующее выражение:

$$S_g = \frac{S_{g,50}}{1,4} = m_S (1 + 3,494 \cdot \text{Var}(S_g)).$$

Нормативное значение веса снежного покрова для IV снегового района по СП 20.13330.2016: $S_g = 2$ кПа. Тогда $S_{g,50} = 1,4S_g = 2,8$ кПа. Рекомендуемый коэффициент вариации для снеговой нагрузки по [12] $\text{Var}(S_g) = 0,4$. В таком случае математическое ожидание снеговой нагрузки для IV снегового района составит $m_S = 1,17$ кПа, а среднее квадратическое отклонение $\sigma_S = 0,47$ кПа. Вычислим параметры функции распределения Гумбеля для IV снегового района: $\beta = (0,78)\sigma_S = (0,78) \cdot 0,47 = 0,37$ кПа, $\alpha = m_S - [0,45]\sigma_S = 0,96$ кПа. Статистические параметры веса снежного покрова стали меньше, чем в работе [12], но из формулы расчета нормативной снеговой нагрузки был убран коэффициент 0,7.

Как видно из рис. 3, а также сопоставлений данных работы [12] по СП 20.13330.2011, единого подхода к параметрам вероятностного моделирования снеговой нагрузки в настоящее время не сформировано. Также следует понимать, что статистический анализ веса снежного покрова выполняется по выборочной совокупности данных, статистические оценки которой должны быть представлены в виде доверительных интервалов. Оценка параметров функции распределения вероятностей в виде интервалов позволяет представить ее в виде р-блока.

Рассмотрим числовой пример с условными интервальными значениями статистических параметров α и β веса снежного покрова s_g . Примем для веса снежного покрова IV снегового района следующие параметры: $\alpha \in [\underline{\alpha}; \bar{\alpha}] = [0,90; 1,00]$ кПа, $\beta \in [\underline{\beta}; \bar{\beta}] = [0,35; 0,40]$ кПа. Исходя из них построим возможные функции распределения веса снежного покрова (рис. 4).

Как было отмечено выше, область, сформированная всеми возможными функциями распределения, называется р-блок (p-box, probability box).

Граничные функции распределения для р-блока снеговой нагрузки с учетом выражения (1) можно записать в виде:

$$F_S(s) = \begin{cases} \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha - s}{\beta}\right)\right], & \text{если } s < \underline{m}_S \\ \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha - s}{\beta}\right)\right], & \text{если } s \geq \underline{m}_S \end{cases}, \quad (4)$$

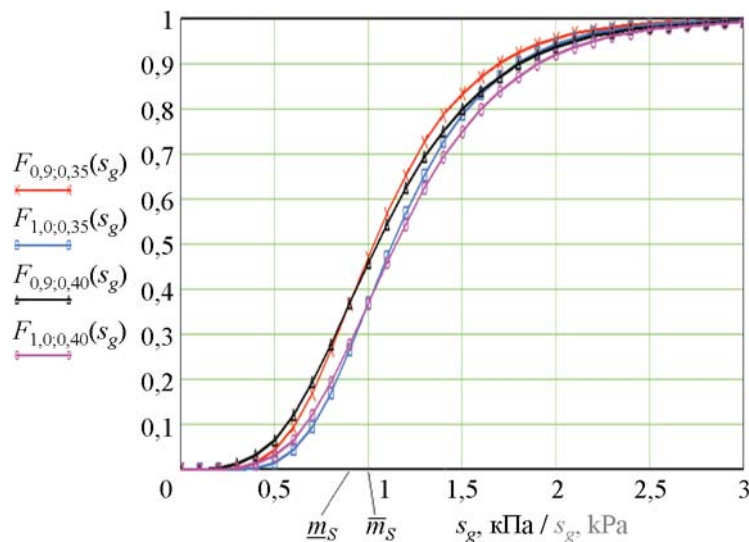


Рис. 4. Возможные функции распределения снеговой нагрузки, формирующие р-блок

Fig. 4. Possible snow load distribution functions forming the p-box

$$\bar{F}_S(s) = \begin{cases} \exp\left[-\exp\left(\frac{\bar{\alpha} - s}{\beta}\right)\right], & \text{если } s < \bar{m}_S \\ \exp\left[-\exp\left(\frac{\bar{\alpha} - s}{\beta}\right)\right], & \text{если } s \geq \bar{m}_S \end{cases}, \quad (5)$$

или с учетом формулы (2):

$$F_S(s) = \begin{cases} \exp\left[-\exp\left(\frac{[\underline{m}_S - 0,45 \cdot \bar{\sigma}_S] - s}{0,78 \cdot \bar{\sigma}_S}\right)\right], & \text{если } s < \underline{m}_S \\ \exp\left[-\exp\left(\frac{[\underline{m}_S - 0,45 \cdot \underline{\sigma}_S] - s}{0,78 \cdot \underline{\sigma}_S}\right)\right], & \text{если } s \geq \underline{m}_S \end{cases}, \quad (6)$$

$$\bar{F}_S(s) = \begin{cases} \exp\left[-\exp\left(\frac{[\bar{m}_S - 0,45 \cdot \underline{\sigma}_S] - s}{0,78 \cdot \underline{\sigma}_S}\right)\right], & \text{если } s < \bar{m}_S \\ \exp\left[-\exp\left(\frac{[\bar{m}_S - 0,45 \cdot \bar{\sigma}_S] - s}{0,78 \cdot \bar{\sigma}_S}\right)\right], & \text{если } s \geq \bar{m}_S \end{cases}. \quad (7)$$

Интервальные оценки параметров уточняются для снеговых районов или отдельных населенных пунктов в зависимости от имеющейся статистической выборки информации метеостанции о ежегодных максимумах высот снежного покрова, определяемых на основе сведений снегосъемок, или ежегодных максимумах веса снежного покрова на прямую.

Таким образом из выражений (4)–(7) формируется вероятностная модель веса снежного покрова. Для описания моделей снеговой нагрузки необходимо использовать следующие граничные функции:

$$\bar{F}_{s,0}(s) = c_e c_t \mu \bar{F}_S(s), \quad (8)$$

$$F_{s,0}(s) = c_e c_t \mu F_S(s), \quad (9)$$

где c_e — коэффициент, учитывающий снос снега; c_t — термический коэффициент; μ — коэффициент формы. Коэффициенты рассчитываются в соответствии с СП 20.13330.2016.

В вышеописанных функциях распределения веса снежного покрова он принимается распределенным на квадратный метр. Для перехода к узловой сосредоточенной нагрузке, вероятностные модели снеговой нагрузки (8)–(9) умножаются на соответствующую грузовую площадь покрытия.

Перейдем к проблеме анализа надежности стальных плоских ферм. Рассмотрим подход к оценке надежности фермы на примере фермы с расчетной схемой по рис. 5.

Используя известные подходы строительной механики, можно получить выражения усилий в стержнях фермы (табл. 1).

Из табл. 2 видно, что любое усилие \tilde{N}_{i-j} может быть выражено в общем виде как:

$$\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}) = \tilde{P}\delta,$$

где δ — коэффициент, зависящий от геометрических размеров и формы фермы.

С учетом изложенного, для любого стержня фермы можно составить математическую модель предельного состояния вида:

$$\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}) \leq \tilde{N}_{i-j,ult}, \quad (10)$$

где $\tilde{N}_{i-j,ult}$ — предельное продольное усилие для стержня фермы $i-j$.

Предельное усилие для $i-j$ элемента фермы может быть определено по различным критериям предельных состояний.

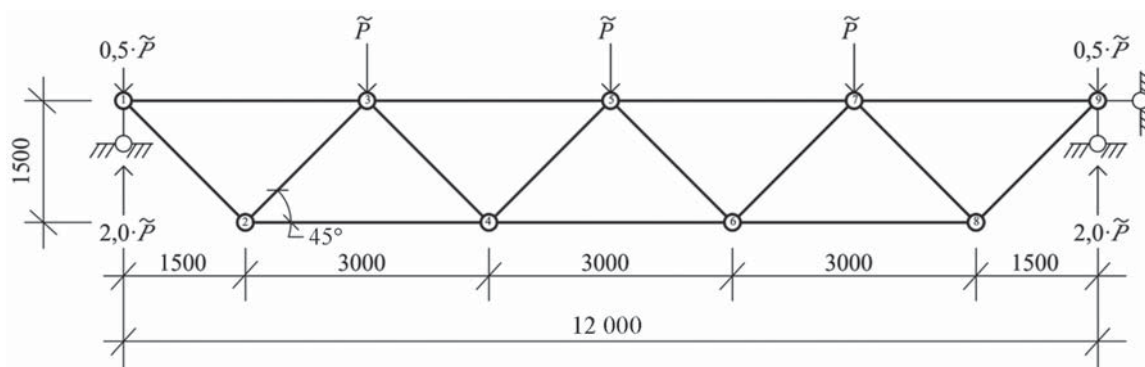
Рис. 5. Расчетная схема фермы со случайной нагрузкой \tilde{P} Fig. 5. A design pattern for a truss exposed to random \tilde{P} load

Табл. 1. Усилия в стержнях фермы по рис. 5

Table 1. Forces arising in truss bars pursuant to Fig. 5

Стержни Bars	Усилие в стержне Force in a bar	Стержни Bars	Усилие в стержне Force in a bar
1–2, 8–9	$\tilde{N}_{1-2} = +\frac{3 \cdot \tilde{P}}{\sqrt{2}}$	3–4, 6–7	$\tilde{N}_{3-4} = +\frac{\tilde{P}}{\sqrt{2}}$
1–3, 7–9	$\tilde{N}_{1-3} = -1,5 \cdot \tilde{P}$	3–5, 5–7	$\tilde{N}_{3-5} = -3,5 \cdot \tilde{P}$
2–3, 7–8	$\tilde{N}_{2-3} = -\frac{3 \cdot \tilde{P}}{\sqrt{2}}$	4–5, 5–6	$\tilde{N}_{4-5} = -\frac{\tilde{P}}{\sqrt{2}}$
2–4, 6–8	$\tilde{N}_{2-4} = +3 \cdot \tilde{P}$	4–6	$\tilde{N}_{4-6} = +4 \cdot \tilde{P}$

Например, по условию прочности стали стержня фермы:

$$\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}) \leq \tilde{N}_{i-j,ult} = \tilde{\sigma}_{s,ult} A, \quad (11)$$

где A — площадь поперечного сечения стержня фермы; $\tilde{\sigma}_{s,ult}$ — предельное напряжение в стали стержня фермы (случайная величина).

Из условия устойчивости i - j стержня фермы:

$$\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}) \leq \tilde{N}_{i-j,ult} = \tilde{\sigma}_{s,ult} A \tilde{\varphi}(\tilde{\sigma}_{s,ult}, \tilde{E}), \quad (12)$$

где $\tilde{\varphi}$ — коэффициент продольной устойчивости.

Площадь поперечного сечения стержня фермы A принята детерминированной (постоянной) величиной, так как в задачах оценки надежности существующих ферм можно многократно и с высокой точностью измерить данную характеристику. При оценке надежности ферм на стадии проектирования площадь поперечного сечения стержней фермы может быть принята в виде случайной величины, поскольку металлопрокат имеет различный коэффициент вариации (в зависимости от завода-производителя, стандарта и типа сечения), что не позволяет заранее дать точную оценку площади поперечного сечения стержней.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из выражений (11) и (12) следует, что правая часть неравенства зависит от предельного напря-

жения стали стержней фермы. Покажем объективность применения р-блоков для вероятностного представления предельного напряжения стали на примере численного моделирования. В ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» говорится, что при отсутствии сертификатов, недостаточной или неполной информации, приводимой в сертификатах, обнаружении в конструкциях трещин или других дефектов и повреждений, а также, если указанная в проекте марка стали не соответствует нормативным требованиям по прочности, физико-механические и химические характеристики стали конструкций определяют механическими испытаниями образцов, химическим и металлографическим анализом.

Для объективного сравнения исследуемых подходов сгенерируем в программе PTC MathCAD 8 значений случайной величины с параметрами: математическое ожидание $m_X = 300$ МПа и стандартное отклонение $S_X = 15$ МПа. Предположим, что рассматриваемые данные являются результатом численного эксперимента по оценке прочности стали несущего элемента строительной конструкции. По итогам генерации были получены следующие значения $X = \{303,58; 289,73; 275,78; 321,17; 314,57; 282,66; 302,16; 325,46\}$ МПа. На рис. 6 приведены графики эмпирической функции распределения вероятностей $F_{X,emp}(x)$ на основе восьми значений

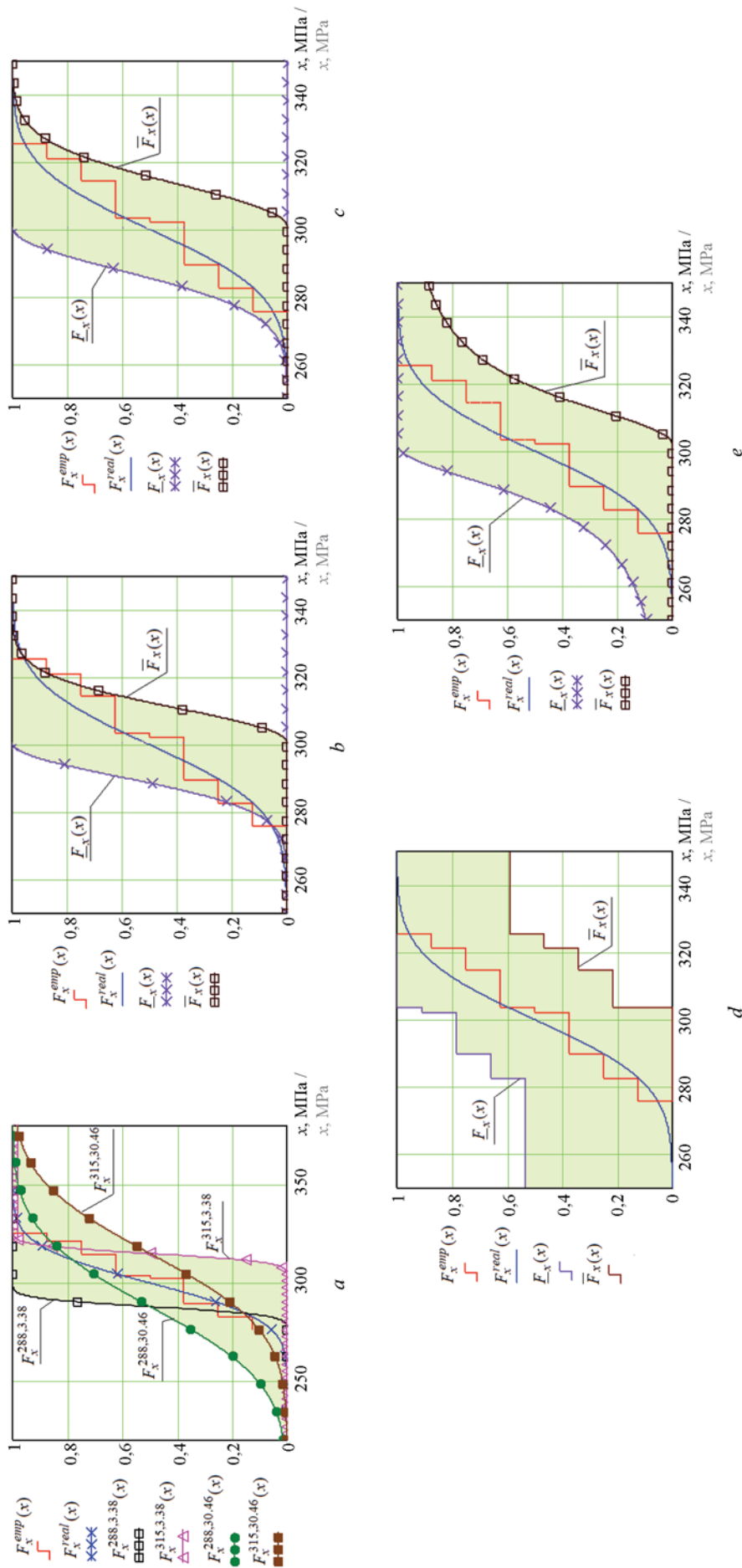


Рис. 6. Различные варианты формирования р-блоков: *a* — р-блок с интервальными оценками параметров нормального распределения; *b* — р-блок на основе функций распределения возможных срезом $\alpha = 0,05$; *c* — р-блок на основе функций распределения возможных срезом $\alpha = 0,15$; *d* — р-блок с граничными функциями, полученными по критерию Колмогорова — Смирнова; *e* — р-блок с граничными функциями, полученными на основе неравенства П.Л. Чебышева

Fig. 6. Different cases of p-boxes: *a* — a P-box based on interval assessments of normal distribution parameters; *b* — a P-box based on probability distribution functions encompassing the shear value of $\alpha = 0,05$; *c* — a P-box based on probability distribution functions encompassing the shear value of $\alpha = 0,15$; *d* — a P-box whose boundary functions are based on the Kolmogorov-Smirnov criteria; *e* — P-box based on the distribution functions obtained using the Chebyshev inequality

и график нормального распределения $F_X(x)$ при наличии полной статистической информации.

Так как математическое ожидание и стандартное отклонение генеральной совокупности данных неизвестно, можно получить оценки доверительных интервалов для этих параметров [15]. Используя известные подходы [15], были получены следующие интервальные оценки параметров по выборке из восьми значений: математическое ожидание [288,09; 315,68] МПа и стандартное отклонение [3,38; 39,46] МПа. Для наиболее осторожной оценки распределения вероятностей следует использовать различные участки функций нормального распределения (рис. 6, а), в зависимости от различных комбинаций доверительных границ математического ожидания и стандартного отклонения. В общем виде граничные функции можно записать в виде:

$$\underline{F}_X(x) = \begin{cases} F^{norm}(\underline{m}_X, \bar{S}_X), & \text{если } x < \underline{m}_X; \\ F^{norm}(\underline{m}_X, \underline{S}_X), & \text{если } x \geq \underline{m}_X, \end{cases} \quad (13)$$

$$\bar{F}_X(x) = \begin{cases} F^{norm}(\bar{m}_X, \underline{S}_X), & \text{если } x < \bar{m}_X; \\ F^{norm}(\bar{m}_X, \bar{S}_X), & \text{если } x \geq \bar{m}_X, \end{cases} \quad (14)$$

где F^{norm} — функция нормального распределения вероятностей.

Как видно из рис. 6, а, область р-блока, сформированная возможными функциями распределения вероятностей, полностью перекрывает эмпирическую и реальную функции распределения вероятностей. Рост числа испытаний уменьшит площадь р-блока и позволит получить более информативную оценку надежности. Однако недостатком такого подхода является необходимость обоснования гипотезы о принадлежности случайной величины к определенному закону распределения вероятностей, что может быть затруднительно в условиях ограниченных статистических данных.

Решение этой проблемы можно найти в использовании р-блоков на основе функции распределения возможностей в рамках положений теории возможностей и теории нечетких множеств [16, 17]. В задачах оценки надежности строительных конструкций получила распространение функция распределения возможностей вида (рис. 2, b, c):

$$\underline{F}_x(x) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{a_x - y}{b_y}\right)^2\right], & \text{если } x < a_x; \\ 1, & \text{если } x \geq a_x, \end{cases} \quad (15)$$

$$\bar{F}_x(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } y < a_y; \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{a_x - x}{b_x}\right)^2\right], & \text{если } x \geq a_x, \end{cases} \quad (16)$$

где $a_x = 0,5 (X_{\max} + X_{\min})$ — условное «среднее»; $b_x = 0,5 (X_{\max} - X_{\min}) / \sqrt{-\ln \alpha}$ — мера «рассеяния», где X_{\max} и X_{\min} — наибольшее и наименьшее значение во множестве значений $\{x\}$ нечеткой переменной X , полученных из результатов измерений (испытаний); $\alpha \in [0; 1]$ — уровень среза (риска), значением которого задаются.

Как видно из рис. 2, b, c, в рамках построения данного р-блока имеется существенная зависимость его площади от субъективно назначаемого параметра — уровня среза (риска). Так, при уровне среза (риска) 0,05 р-блок (рис. 4, b) не покрывает полностью эмпирическое и теоретическое распределение, что может привести к ошибкам в оценке надежности; при уровне среза 0,15 (рис. 4, c) р-блок покрывает обе функции распределения. Дальнейшее развитие этого подхода требует наличия объективных подходов к назначению уровня среза (риска) для конкретных несущих элементов строительных конструкций.

Общим недостатком вышеописанных р-блоков является предположение о форме распределения граничных функций. Р-блок на основе критерия согласия Колмогорова – Смирнова позволит сформировать граничные функции распределения по эмпирической функции распределения вероятностей, без гипотез о виде распределения. На рис. 4, d, показан р-блок для рассматриваемых исходных данных, сформированный по критерию Колмогорова – Смирнова [18].

Также на рис. 4, e, представлен р-блок, сформированный на основе неравенства П.Л. Чебышева [19]. Его можно построить также по доверительным оценкам математического ожидания и стандартного отклонения без необходимости проверки согласия на вид распределения.

Поскольку нагрузки, входящие в математическую модель (10), описываются различными законами распределения (Гумбеля и нормальным), то для более удобного подхода к оценке надежности выражение (10) можно записать в виде:

$$\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}_{snow}) \leq \tilde{N}_{i-j,ult} - \tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}_{sw}), \quad (17)$$

где $\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}_{snow})$ — усилие в стержне $i-j$ от снеговой (snow) нагрузки; $\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}_{sw})$ — усилие в стержне $i-j$ от собственного веса (self-weight) конструкций.

В обобщенном виде неравенство (17) можно записать как:

$$X \leq Y. \quad (18)$$

Так как в обозначение переменной Y входит несколько случайных величин, описываемых нормальным распределением, то статистические параметры могут быть вычислены следующим образом: математическое ожидание $m_y = m_{N_{i-j,ult}} - m_{N_{i-j}}$, среднеквадратическое отклонение $S_y = \sqrt{S_{N_{i-j,ult}}^2 + S_{N_{i-j}}^2}$,

где $m_{N_{i-j,ult}}$ — математическое ожидание предельного продольного усилия в стержне $i-j$; $m_{N_{i-j}}$ — математическое ожидание продольного усилия в стержне $i-j$ от собственного веса конструкций; $S_{N_{i-j,ult}}$ — среднеквадратическое отклонение предельного продольного усилия в стержне $i-j$; $S_{N_{i-j}}$ — среднеквадратическое отклонение продольного усилия в стержне $i-j$ от собственного веса конструкций. Для случайной величины X используется распределение и параметры по выражениям (4)–(6).

Вероятность безотказной работы для математической модели вида (18) можно вычислить по формуле [3, 20]:

$$P = \int_0^{+\infty} f_y(x) F_x(x) dx, \quad (19)$$

где $f_y(x)$ — плотность распределения случайной величины Y ; $F_x(x)$ — функция распределения случайной величины X .

В связи с тем, что р-блок имеет две граничные функции распределения, выражение (19) можно записать в виде:

$$\begin{cases} P = \int_0^{+\infty} f_y(x) \bar{F}_x(x) dx; \\ \bar{P} = \int_0^{+\infty} \bar{f}_y(x) F_x(x) dx, \end{cases} \quad (20)$$

где $F_x(x)$ и $\bar{F}_x(x)$ — нижняя и верхняя граничные функции распределения случайной величины X .

С учетом принятых выше законов распределения для модели (17) можно записать выражение (19) в виде:

$$P = \int_0^{+\infty} \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha-s}{\beta}\right)\right] \frac{1}{S_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(x-m_y)^2}{2S_y^2}\right] dx.$$

В виду того, что функции представлены р-блоками, можно записать:

$$\begin{aligned} \underline{P} = & \int_0^{\bar{m}_x} \exp\left[-\exp\left(\frac{\bar{\alpha}-x}{\beta}\right)\right] \times \\ & \times \frac{1}{S_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(x-m_y)^2}{2S_y^2}\right] dx + \\ & + \int_{\bar{m}_x}^{\bar{m}_y} \exp\left[-\exp\left(\frac{\bar{\alpha}-x}{\beta}\right)\right] \cdot \frac{1}{S_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(x-m_y)^2}{2S_y^2}\right] dx + \\ & + \int_{\bar{m}_y}^{+\infty} \exp\left[-\exp\left(\frac{\bar{\alpha}-x}{\beta}\right)\right] \cdot \frac{1}{S_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(x-m_y)^2}{2S_y^2}\right] dx, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \bar{P} = & \int_0^{\bar{m}_x} \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha-x}{\beta}\right)\right] \times \\ & \times \frac{1}{S_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(x-m_y)^2}{2S_y^2}\right] dx + \\ & + \int_{\bar{m}_x}^{\bar{m}_y} \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha-x}{\beta}\right)\right] \cdot \frac{1}{S_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(x-m_y)^2}{2S_y^2}\right] dx + \\ & + \int_{\bar{m}_y}^{+\infty} \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha-x}{\beta}\right)\right] \cdot \frac{1}{S_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(x-m_y)^2}{2S_y^2}\right] dx. \end{aligned} \quad (22)$$

После вычисления интервальных значений параметров α , β , m_x , m_y и S_y вероятности безотказной работы по (21), (22) рассчитываются в программе MathCAD или аналогичной ей.

Если про случайные величины и не удается получить достаточное количество статистической информации, чтобы обосновать принадлежность к нормальному или другому закону распределения, то можно использовать подход на основе теории возможностей. В этом случае граничные функции распределения р-блока примут вид (15), (16).

Для использования их в выражении (20) вычислим производные от граничных функций распределения возможностей:

$$\underline{f}_Y(y) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{a_y-y}{b_y}\right)^2\right] \frac{(2a_y-2y)}{b_y^2}, & \text{если } y < a_y; \\ 0, & \text{если } y \geq a_y, \end{cases} \quad (23)$$

$$\bar{f}_Y(y) = \begin{cases} 0, & \text{если } y < a_y; \\ -\exp\left[-\left(\frac{a_y-y}{b_y}\right)^2\right] \frac{(2a_y-2y)}{b_y^2}, & \text{если } y \geq a_y. \end{cases} \quad (24)$$

Тогда можно получить аналогичные (21), (22) выражения:

$$\begin{aligned} \underline{P} = & \int_0^{\bar{m}_x} \exp\left[-\exp\left(\frac{\bar{\alpha}-x}{\beta}\right)\right] \exp\left[-\left(\frac{a_y-y}{b_y}\right)^2\right] \times \\ & \times \frac{(2a_y-2y)}{b_y^2} dx + \int_{\bar{m}_x}^{a_y} \exp\left[-\exp\left(\frac{\bar{\alpha}-x}{\beta}\right)\right] \exp\left[-\left(\frac{a_y-y}{b_y}\right)^2\right] \times \\ & \times \frac{(2a_y-2y)}{b_y^2} + dx \int_{a_y}^{+\infty} \exp\left[-\exp\left(\frac{\bar{\alpha}-x}{\beta}\right)\right] 0 dx, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \bar{P} = & \int_0^{m_x} \exp \left[-\exp \left(\frac{\alpha - x}{\beta} \right) \right] 0 dx + \\ & + \int_{m_x}^{a_y} \exp \left[-\exp \left(\frac{\alpha - x}{\beta} \right) \right] 0 dx + \\ & + \int_{a_y}^{+\infty} \exp \left[-\exp \left(\frac{\alpha - x}{\beta} \right) \right] \left[-\exp \left[-\left(\frac{a_y - y}{b_y^2} \right)^2 \right] \frac{(2a_y - 2y)}{b_y^2} \right] dx. \end{aligned} \quad (26)$$

По представленным формулам можно вычислить надежность стержня фермы по критерию предельного состояния (11) в зависимости от имеющейся статистической информации.

Пример. Пусть требуется найти вероятность безотказной работы элемента 4–6 фермы с расчетной схемой по рис. 5. В качестве критерия предельного состояния используется прочность элемента по материалу. Применяя метод моментной точки относительно узла 5, можно записать уравнение: $\sum M_5 = 0 \rightarrow 2\bar{P} \cdot 6 - 0,5\bar{P} \cdot 6 - \bar{P} \cdot 3 - \bar{N}_{4-6} \cdot 1,5 = 0$. Следовательно, в стержне 4–6 возникает растягивающее усилие $\bar{N}_{4-6} = +4 \cdot \bar{P}$. Данное усилие можно разбить на две составляющих: $\bar{N}_{4-6} = +4 \cdot (\bar{P}_{snow} + \bar{P}_{sw})$. Математическую модель предельного состояния по критерию прочности материала стержня запишем с учетом (17) и табл. 1 в виде:

$$4\tilde{P}_{snow} \leq \tilde{\sigma}_{4-6,ult} A_{4-6} - 4\tilde{P}_{sw}, \quad (27)$$

где $\tilde{\sigma}_{4-6,ult}$ — предельное допустимое напряжение в стержне 4–6; A_{4-6} — площадь поперечного сечения стержня 4–6.

Сосредоточенную нагрузку \tilde{P}_{snow} получим путем перемножения случайной нагрузки от веса снегового покрова \tilde{S}_g на грузовую площадь узла фермы. Аналогичным образом возможно получить значение нагрузки \tilde{P}_{sw} , в состав которой будут входить несколько случайных величин, описывающих изменчивость слоев конструкции покрытия.

Для сокращения объема статьи не будем приводить данные выкладки. Более подробная информация про суммирование случайных нагрузок на строительные конструкции представлена в работах [1, 3].

Математическую модель (27) преобразуем к виду: $\tilde{P}_{snow} \leq \frac{\tilde{\sigma}_{4-6,ult} A_{4-6}}{4} - \tilde{P}_{sw}$. Вводим обозна-

чения $\tilde{P}_{snow} = X$, $\frac{\tilde{\sigma}_{4-6,ult} A_{4-6}}{4} - \tilde{P}_{sw} = Y$. Тогда (27)

будет преобразована к виду (18).

Пусть про параметр \tilde{P}_{snow} , описываемый распределением Гумбеля, получены следующие данные в интервальной форме: $\alpha \in [50; 60]$ кН, $\beta \in [10; 15]$ кН. Через зависимости $\beta = 0,78 \cdot \sigma_x$ и $\alpha = m_x - 0,45\sigma_x$ можно найти: $\sigma_x \in [12,82; 19,23]$ кН, $m_x \in [55,77; 68,65]$ кН.

Стержень — это труба квадратного сечения 100×5 с площадью поперечного сечения $A_{4-6} = 18,57 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. По результатам испытаний стали стержня установлены значения: $m_\sigma \in [300; 320]$ МПа, $S_\sigma \in [15; 20]$ МПа. По итогам сбора нагрузок от собственного веса конструкций покрытия определено: $m_{p,sw} \in [30; 35]$ кН, $S_{p,sw} \in [2; 4]$ кН.

По этим данным можно вычислить значения параметров случайной величины Y : $m_y = \frac{m_\sigma A_{4-6}}{4} -$

$$-m_{p,sw} = 104,3 \text{ кН и } m_y = \frac{m_\sigma A_{4-6}}{4} - m_{p,sw} = 118,6 \text{ кН;}$$

а среднеквадратическое отклонение найти по источникам [3, 15] в виде:

$$S_y = \sqrt{\left[\frac{\partial Y(\tilde{\sigma}_{4-6,ult}, \tilde{P}_{sw})}{\partial \sigma_{4-6,ult}} \right]^2 S_\sigma^2 + \left[\frac{\partial Y(\tilde{\sigma}_{4-6,ult}, \tilde{P}_{sw})}{\partial P_{sw}} \right]^2 S_{p,sw}^2},$$

откуда $S_y = \sqrt{\left[\frac{A_{4-6}}{4} \right]^2 S_\sigma^2 + S_{p,sw}^2}$, тогда запишем

$$S_y \in [7,25; 10,11] \text{ кН.}$$

После того, как были получены интервальные оценки параметров для функций распределений случайных величин X и Y , подставляем их в расчетные формулы (21), (22). Надежность элемента фермы по критерию прочности материала составляет $P \in [P; \bar{P}] = [0,8842; 0,9928]$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из численного примера расчета, оценка надежности представлена в виде интервала значений $P \in [P; \bar{P}] = [0,8842; 0,9928]$. Такая неопределенность в оценке возникает вследствие ограниченности (недостаточности) статистической информации о случайных величинах в расчетной математической модели предельного состояния. Для того чтобы получить более информативный ответ (более узкий интервал), необходимо получить более точную статистическую информацию, что обычно достигается путем увеличения выборочной совокупности данных. Тем не менее верхняя граница оценки надежности составляет $\bar{P} = 0,9928$, что в большинстве практических задач является недопустимо низким уровнем надежности. Следовательно, предложенный алгоритм позволяет даже при неполной статистической информации судить о недостаточном уровне механической безопасности фермы.

Вопрос о предельном (целевом) уровне надежности в настоящее время — дискуссионный и зависит от множества факторов. В Eurocode 0 «Basis of structural design» установлен целевой индекс надежности $\beta = 3,8$ по критерию несущей способности после 50 лет эксплуатации. Сравнение индексов надежности в различных нормах проектирования отражено в труде [21].

В работе [22] предлагается модифицированный подход к расчету и нормированию индекса надежности с моделированием неопределенностей с использованием теории нечетких множеств. Авторы публикации [23] анализируют нормирование индекса надежности с учетом экономических и социальных аспектов. Применение положений теории возможностей как альтернативы теории вероятностей для расчета и нормирования индекса надежности рассмотрено в работе [24]. Также исследуется вопрос о нормировании индекса надежности и определении индекса надежности конструкций с учетом фактора пожарной безопасности [25].

Выше описан подход к анализу надежности одного стержня фермы по критерию прочности материала. Для комплексной оценки надежности каждый элемент фермы следует проверить на надежность по всем критериям работоспособности, предусмотренным нормативными документами для расчетной ситуации (расчетная ситуация — учитываемый при расчете сооружений комплекс наиболее неблагоприятных условий, которые могут возникнуть при его возведении и эксплуатации в соответствии с ГОСТ 27751-2014). Для центрально-сжатого элемента — это прочность, устойчивость элемента в плоскости и из плоскости, гибкость. В результате будем иметь несколько интервалов надежности элемента по различным критериям предельных состояний. Поскольку наступление любого предельного состояния в элементе фермы возможно считать критерием отказа всей фермы, то стержень фермы можно представить в виде условной последовательной системы, состоящей из элементов — значений надежности стержня по отдельным критериям предельного состояния $[P_i, \bar{P}_i]$. В соответствии с трудом [26], надежность такой системы вычисляется по формуле:

$$\begin{cases} \underline{P} = \max\left(0, \sum_{i=1}^n P_i - (n-1)\right); \\ \bar{P} = \min(\bar{P}_i), \end{cases} \quad (28)$$

где P_i и \bar{P}_i — нижняя и верхняя границы вероятности безотказной работы стержня фермы по i -му

критерию работоспособности; n — число элементов (критериев) в последовательной системе.

ВЫВОДЫ

В работе разработаны методы оценки надежности стальных плоских ферм на основе р-блоков с обоснованием их практической значимости.

Предложена вероятностная модель снеговой нагрузки для анализа надежности плоских ферм в соответствии с изменениями СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» в части обеспеченности веса снегового покрова и данных по весу снегового покрова по снеговым районам.

Приведены расчетные формулы для анализа надежности плоской фермы с использованием р-блоков в случае известных законов распределения вероятностей, но неточных (интервальных) оценках параметров этих распределений. Также рассмотрен вариант комбинации р-блоков, построенных на основе теории вероятностей и теории возможностей, для расчета надежности.

Р-блоки позволяют дать более осторожную оценку надежности элемента конструкции, но в то же время менее информативную — представленную в интервальной форме. С целью получения более узкого интервала надежности следует уточнить интервальные оценки параметров распределений или виды р-блоков в расчетной модели, что влечет за собой повышение экономических и трудовых затрат на сбор статистической информации.

Надежность элемента фермы необходимо рассчитывать по всем критериям предельных состояний, соответствующих нормативным требованиям. Элемент фермы может быть представлен в виде условной последовательной системы, состоящей из условных элементов — значений надежности по отдельным критериям предельных состояний элемента фермы. Следовательно, надежность элемента фермы должна носить системный характер. При наличии системных оценок надежности для каждого элемента фермы и надежности каждого узла фермы, аналогичным (28) образом может быть вычислена надежность всей фермы как условной последовательной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кургузов К.В., Фоменко И.К., Шубина Д.Д. Вероятностно-статистическое моделирование нагрузок и воздействий // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 9. С. 1249–1261. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1249-1261
2. Schobi R., Sudret B. Structural reliability analysis for p-boxes using multi-level meta-models // Probabilistic Engineering Mechanics. 2017. Vol. 48. Pp. 27–38. DOI: 10.1016/j.probenmech.2017.04.001
3. Мкртычев О.В., Райзер В.Д. Теория надежности в проектировании строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2016. 908 с.
4. Liu X., Kuang Z., Yin L., Hu L. Structural reliability analysis based on probability and probability box hybrid model // Structural Safety. 2017. Vol. 68. Pp. 73–84. DOI: 10.1016/j.strusafe.2017.06.002
5. Yang X., Liu Y., Zhang Y., Yue Z. Hybrid reliability analysis with both random and probability-

box variables // *Acta Mechanica*. 2015. Vol. 226. Issue 5. Pp. 1341–1357. DOI: 10.1007/s00707-014-1252-8

6. Liu X., Wang X., Xie J., Li B. Construction of probability box model based on maximum entropy principle and corresponding hybrid reliability analysis approach // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2020. Vol. 61. Issue 2. Pp. 599–617. DOI: 10.1007/s00158-019-02382-9

7. Wang C., Zhang H., Beer M. Computing tight bounds of structural reliability under imprecise probabilistic information // *Computers & Structures*. 2018. Vol. 208. Pp. 92–104. DOI: 10.1016/j.compstruc.2018.07.003

8. Beer M., Ferson S., Kreinovich V. Do we have compatible concepts of epistemic uncertainty // In Proc. 6th Asian-Pacific Symp. Struct. Reliab. Shanghai, 2016. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Do-we-have-compatible-concepts-of-epistemic-Beer-Ferson/c0056ebb63264a10a085675b86312575e625d8bd>

9. An J., Hu M., Fu L., Zhan J. A novel fuzzy approach for combining uncertain conflict evidences in the Dempster-Shafer theory // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 7481–7501. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2890419

10. Shafer G. Dempster-Shafer theory // *Encyclopedia of artificial intelligence*. 1992. Vol. 1. Pp. 330–331.

11. Zhang Z., Jiang C., Han X., Hu D., Yu S. A response surface approach for structural reliability analysis using evidence theory // *Advances in Engineering Software*. 2014. Vol. 69. Pp. 37–45. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.005

12. Золина Т.В., Садчиков П.Н. Моделирование снеговой нагрузки на покрытие промышленного здания // *Вестник МГСУ*. 2016. № 8. С. 25–33.

13. Qiang S., Zhou X., Gu M. Research on reliability of steel roof structures subjected to snow loads at representative sites in China // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. Vol. 150. Pp. 62–69. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.09.005

14. Wolinski S., Pytlowany T. Evaluation of load values using the Gumbel model // *Archives of Civil Engineering*. 2012. Vol. 58. Issue 2. Pp. 199–208. DOI: 10.2478/v.10169-012-0012-1

15. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. М. : Высшая школа, 2003. 479 с.

16. Utkin V.S., Solovyev S.A. Reliability analysis of existing reinforced concrete beams on normal crack length criterion // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Vol. 13. Issue 2. Pp. 56–63. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-3-142-152

17. Hurtado J.E., Alvarez D.A., Ramirez J. Fuzzy structural analysis based on fundamental reliability concepts // *Computers & Structures*. 2012. Vol. 112–113. Pp. 183–192. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.08.004

18. Utkin L.V., Coolen F. On reliability growth models using Kolmogorov-Smirnov bounds // *International Journal of Performability Engineering*. 2011. Vol. 7. Issue 1. Pp. 5–19.

19. Utkin V.S. Safety analysis of the soil beds of foundations based on bearing-capacity criterion // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2014. Vol. 51. Issue 1. Pp. 9–16. DOI: 10.1007/s11204-014-9247-y

20. Melchers R.E., Beck A.T. *Structural reliability analysis and prediction*. John Wiley & Sons, 2018. 497 p.

21. Holický M., Marková J., Sýkora M. Target reliability levels in present standards // *Transactions of the VŠB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2014. Vol. 14. Issue 2. Pp. 46–53. DOI: 10.2478/tvsb-2014-0018

22. Wang P., Zhang J., Zhai H., Qiu J. A new structural reliability index based on uncertainty theory // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2017. Vol. 30. Issue 4. Pp. 1451–1458. DOI: 10.1016/j.cja.2017.04.008

23. Sykora M., Diamantidis D., Holický M., Jung K. Target reliability for existing structures considering economic and societal aspects // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2017. Vol. 13. Issue 1. Pp. 181–194. DOI: 10.1080/15732479.2016.1198394

24. Marano G.C., Quaranta G. A new possibilistic reliability index definition // *Acta mechanica*. 2010. Vol. 210. Issue 3. Pp. 291–303. DOI: 10.1007/s00707-009-0194-z

25. Van Coile R., Hopkin D., Bisby L., Caspeele R. The meaning of Beta: background and applicability of the target reliability index for normal conditions to structural fire engineering // *Procedia engineering*. 2017. Vol. 210. Pp. 528–536. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.11.110

26. Гуров С.В., Уткин Л.В. Надежность систем при неполной информации. СПб. : Любавич, 1999. 166 с.

Поступила в редакцию 30 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 15 февраля 2021 г.

Одобрена для публикации 16 февраля 2021 г.

О Б АВТОРАХ: Анастасия Андреевна Соловьева — аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства; Вологодский государственный университет (ВоГУ); 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 1090512; solovevaaa@vogu35.ru;

Сергей Александрович Соловьев — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства; Вологодский государственный университет (ВоГУ); 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 821778, Scopus: 57191529586, ResearcherID: AAJ-1708-2020, ORCID: 0000-0001-7083-7963; solovevsa@vogu35.ru.

REFERENCES

1. Kurguzov K.V., Fomenko I.K., Shubina D.D. Probabilistic and statistical modeling of loads and forces. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(9):1249-1261. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1249-1261 (rus.).
2. Schobi R., Sudret B. Structural reliability analysis for p-boxes using multi-level meta-models. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2017; 48:27-38. DOI: 10.1016/j.probengmech.2017.04.001
3. Mkrtychev O.V., Rajzer V.D. *Reliability theory in structural design*. Moscow, Publishing house ASV, 2016; 908. (rus.).
4. Liu X., Kuang Z., Yin L., Hu L. Structural reliability analysis based on probability and probability box hybrid model. *Structural Safety*. 2017; 68:73-84. DOI: 10.1016/j.strusafe.2017.06.002
5. Yang X., Liu Y., Zhang Y., Yue Z. Hybrid reliability analysis with both random and probability-box variables. *Acta Mechanica*. 2015; 226(5):1341-1357. DOI: 10.1007/s00707-014-1252-8
6. Liu X., Wang X., Xie J., Li B. Construction of probability box model based on maximum entropy principle and corresponding hybrid reliability analysis approach. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2020; 61(2):599-617. DOI: 10.1007/s00158-019-02382-9
7. Wang C., Zhang H., Beer M. Computing tight bounds of structural reliability under imprecise probabilistic information. *Computers & Structures*. 2018; 208:92-104. DOI: 10.1016/j.compstruc.2018.07.003
8. Beer M., Ferson S., Kreinovich V. Do we have compatible concepts of epistemic uncertainty. In *Proc. 6th Asian-Pacific Symp. Struct. Reliab.* Shanghai, 2016. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Do-we-have-compatible-concepts-of-epistemic-Beer-Ferson/c0056ebb63264a10a085675b86312575e625d8bd>
9. An J., Hu M., Fu L., Zhan J. A novel fuzzy approach for combining uncertain conflict evidences in the Dempster-Shafer theory. *IEEE Access*. 2019; 7:7481-7501. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2890419
10. Shafer G. Dempster-Shafer theory. *Encyclopedia of artificial intelligence*. 1992; 1:330-331.
11. Zhang Z., Jiang C., Han X., Hu D., Yu S. A response surface approach for structural reliability analysis using evidence theory. *Advances in Engineering Software*. 2014; 69:37-45. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.005
12. Zolina T.V., Sadchikov P.N. Modeling of the snow load on the roofs of industrial buildings. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 8:25-33. (rus.)
13. Qiang S., Zhou X., Gu M. Research on reliability of steel roof structures subjected to snow loads at representative sites in China. *Cold Regions Science and Technology*. 2018; 150:62-69. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.09.005
14. Wolinski S., Pytlowany T. Evaluation of load values using the Gumbel model. *Archives of Civil Engineering*. 2012; 58(2):199-208. DOI: 10.2478/v.10169-012-0012-1
15. Gmurman V.E. *Probabilities theory and mathematical statistic*. Moscow, High School, 2003; 479. (rus.).
16. Utkin V.S., Solovyev S.A. Reliability analysis of existing reinforced concrete beams on normal crack length criterion. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(2):56-63. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-3-142-152
17. Hurtado J.E., Alvarez D.A., Ramirez J. Fuzzy structural analysis based on fundamental reliability concepts. *Computers & Structures*. 2012; 112-113:183-192. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.08.004
18. Utkin L.V., Coolen F. On reliability growth models using Kolmogorov-Smirnov bounds. *International Journal of Performability Engineering*. 2011; 7(1):5-19.
19. Utkin V.S. Safety analysis of the soil beds of foundations based on bearing-capacity criterion. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2014; 51(1):9-16. DOI: 10.1007/s11204-014-9247-y
20. Melchers R.E., Beck A.T. *Structural reliability analysis and prediction*. John Wiley & Sons, 2018; 497.
21. Holický M., Marková J., Sýkora M. Target reliability levels in present standards. *Transactions of the VŠB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2014; 14(2):46-53. DOI: 10.2478/tvsb-2014-0018
22. Wang P., Zhang J., Zhai H., Qiu J. A new structural reliability index based on uncertainty theory. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2017; 30(4):1451-1458. DOI: 10.1016/j.cja.2017.04.008
23. Sykora M., Diamantidis D., Holický M., Jung K. Target reliability for existing structures considering economic and societal aspects. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2017; 13(1):181-194. DOI: 10.1080/15732479.2016.1198394
24. Marano G.C., Quaranta G. A new possibilistic reliability index definition. *Acta mechanica*. 2010; 210(3):291-303. DOI: 10.1007/s00707-009-0194-z
25. Van Coile R., Hopkin D., Bisby L., Caspeele R. The meaning of Beta: background and applicability of the target reliability index for normal conditions to structural fire engineering. *Procedia engineering*. 2017; 210:528-536. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.11.110
26. Gurov S.V., Utkin L.V. *Reliability of systems with limited information*. St. Petersburg, Lyubavich, 1999; 166. (rus.).

Received December 30, 2020.

Adopted in revised form on February 15, 2021.

Approved for publication on February 16, 2021.

B I O N O T E S: **Anastasia A. Soloveva** — postgraduate student of the Department of Industrial and Civil Construction; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; SPIN-code: 5162-9279, ID RSCI: 1090512; solovevaa@vogu35.ru;

Sergey A. Solovev — Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Construction; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; SPIN-code: 4738-8927, ID RSCI: 821778, Scopus: 57191529586, ResearcherID: AAJ-1708-2020, ORCID: 0000-0001-7083-7963; solovevsa@vogu35.ru.

Взаимодействие сваи большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами

З.Г. Тер-Мартirosян, А.С. Акулецкий

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Большинство площадок строительства характеризуются сложными инженерно-геологическими условиями, которые включают в себя чередующиеся слои грунта, в том числе слабые. В качестве основного типа фундамента на таких площадках рассматривают свайный фундамент. Сформулирована постановка и показано решение задачи о взаимодействии сваи большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами.

Материалы и методы. Задача изучена в линейной и нелинейной постановках. Для описания нелинейных сдвиговых деформаций проанализирована упругопластическая модель С.П. Тимошенко. Решение изложено аналитическим и численным методами. Проведено сравнение полученных результатов аналитическим решением упругой задачи с результатами программного комплекса Plaxis 3D.

Результаты. Определено выражение для нахождения приведенного модуля сдвига для многослойного массива грунта. Аналитические решения подкреплены графической частью, выполненной с помощью программы Mathcad. Численные решения задачи осуществлены в программном комплексе Plaxis 3D. Приведены графики зависимости осадки сваи, прорезающей чередующиеся слои, от нагрузки; графики зависимости усилия на пяту сваи от радиуса сваи при переменной нагрузке на оголовок сваи и при переменной длине сваи.

Выводы. Полученная зависимость для определения приведенного модуля сдвига многослойного грунтового массива показала хорошую сходимость с численными методами в упругой постановке. Данные решения могут быть применены для предварительного выявления перемещения сваи большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами. Подбор оптимального соотношения длины сваи и ее диаметра позволяет максимально эффективно использовать несущую способность сваи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: взаимодействие сваи, многослойный и подстилающий грунты, упругая модель, аналитический метод, приведенный модуль, модуль сдвига, Plaxis 3D

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян З.Г., Акулецкий А.С. Взаимодействие сваи большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 168–175. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.168-175

Interaction between a long pile and multi-layer underlying soils

Zaven G. Ter-Martirosyan, Aleksandr S. Akuletskii

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

ABSTRACT

Introduction. The majority of construction sites feature complex geotechnical conditions, as they have alternating soil layers, including loose soils. A pile foundation is the principal type of foundations constructed on these sites. This article encompasses a problem statement and a solution to the problem of interaction between a long pile and multilayer underlying soils.

Materials and methods. The problem is explored in linear and nonlinear settings. The S.P. Timoshenko elastoplastic model is analyzed to describe nonlinear shear deformations. Analytical and numerical methods are employed to present the solution. The results of the analytical solution are compared with the results of the elastic problem obtained using the Plaxis 3D software package.

Results. An equation designated for determining the reduced shear modulus of the multilayer soil mass is obtained. Analytical solutions are supported by the graphical solution obtained using Mathcad software. Numerical solutions are obtained using the Plaxis 3D software package. The diagrams describing the dependence of the settlement of the pile, that passes through alternating soil layers, on the load are provided. The diagrams, describing the dependence between the force, applied to the pile toe, and the pile radius in case of a variable load applied to the pile head and variable pile length are provided.

Conclusions. The resulting dependence, needed to determine the reduced shear modulus of the multi-layer soil mass, demonstrates good convergence with numerical methods in the elastic setting. These solutions can be used to pre-determine the displacement of a long pile surrounded with the underlying multi-layer soil mass. The selection of an optimal correlation between the pile length and the pile diameter allows for the most effective use of the bearing capacity of the pile.

KEYWORDS: pile interaction, underlying multi-layer soil, elastic model, analytical method, reduced modulus, shear modulus, Plaxis 3D

FOR CITATION: Ter-Martirosyan Z.G., Akuletskii A.S. Interaction between a long pile and multi-layer underlying soils. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(2):168-175. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.168-175 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Большинство площадок строительства характеризуются сложными инженерно-геологическими условиями, представленными наличием в основании нескольких слоев, в том числе слабых. В данных условиях применяются: закрепление грунтов [1–6], армирование грунтов [7–10], значительное заглубление подземной части зданий и т.д. Но в качестве основного типа фундамента на таких площадках рассматривают свайный фундамент [11–19]. Известно, что при взаимодействии сваи большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами возникает сложное неоднородное напряженно-деформированное состояние (НДС). В настоящей работе рассматривается задача о взаимодействии длинной сваи с многослойным массивом грунта по определению осадки сваи, а также приведенного модуля сдвига для массива грунта.

Исследования НДС вокруг длинной сваи численным методом доказывают, что влияние длинной сваи на окружающий массив грунта ограничивается расстоянием не более 6–7 диаметров сваи, и такого же порядка в глубину под нижним концом сваи [20]. При уменьшении расстояния между сваями меньше шести диаметров происходит одновременное смещение сваи и грунта в межсвайном пространстве, свайный фундамент и грунт смещаются как единый массив [13]. Данные исследования дают возможность рассмотреть задачу о взаимодействии длинной сваи с многослойным массивом грунта, как задачу о взаимодействии сваи с массивом грунта ограниченных размеров в виде цилиндра, имеющим диаметр $2b$ и высоту $L > l$, где l — длина сваи (рис. 1).

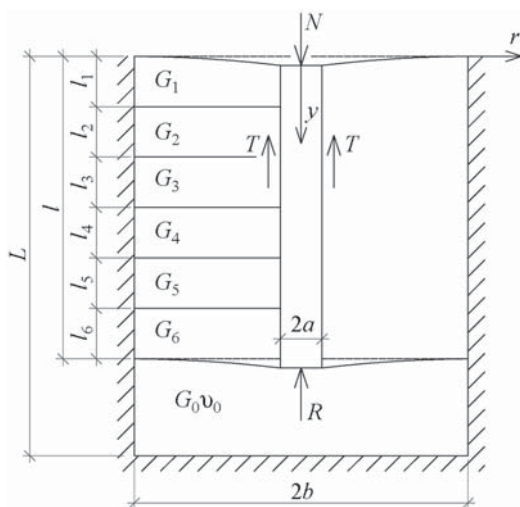


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия сваи с многослойным грунтовым цилиндром

Fig. 1. Design pattern of interaction between the pile and the multilayer soil column

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка и решение задачи аналитическим методом с учетом линейных свойств грунтов

При анализе НДС грунтов вокруг сваи и под ее концом установлено, что при взаимодействии сваи с грунтом наблюдаются преимущественно сдвиговые деформации, объемные деформации можно не учитывать. Решение задачи будем рассматривать для сваи круглого сечения. Также принимаем, что жесткость сваи значительно превышает жесткость грунта $E_{св} \gg E_{гр}$.

Запишем уравнение равновесия для рассматриваемого случая (рис. 1):

$$N = T + R, \quad (1)$$

где

$$N = \pi a^2 p_1, \quad (2)$$

$$T = 2\pi a l \tau, \quad (3)$$

$$R = \pi a^2 p_2. \quad (4)$$

Подставляя в уравнение (1) уравнения (2)–(4), получаем выражение для τ :

$$\tau = (p_1 - p_2) \frac{a}{2l}. \quad (5)$$

Так как $E_{св} \gg E_{гр}$ осадка сваи каждого рассматриваемого слоя равна, т.е.

$$S_1 = S_2 = S_i = S, \quad (6)$$

где S_i — осадка сваи i -го слоя; S — общая осадка сваи.

Сдвиговую деформацию элементарного слоя грунта вокруг сваи можно определить по следующей зависимости:

$$\gamma_i(r) = -\frac{\tau_i(r)}{G_i}, \quad (7)$$

где G_i — модуль сдвига i -го слоя; $i = 1, 2, \dots, n$ — номер слоя.

Исходя из условия (6), можем записать выражение для касательных напряжений i -го слоя:

$$\tau_i = \frac{\tau}{G} G_i, \quad (8)$$

где G — приведенный модуль сдвига многослойного массива грунта.

Исходя из условия распределения касательных напряжений по длине сваи получаем:

$$\tau l = \tau_1 l_1 + \tau_2 l_2 + \tau_i l_i. \quad (9)$$

Рассматривая совместно выражения (9) и (8), получаем формулу для определения приведенного модуля сдвига для многослойного массива грунта:

$$G = \frac{l_1 G_1 + l_2 G_2 + l_i G_i}{l}, \quad (10)$$

где l — длина сваи; $i = 1, 2, \dots, n$ — номер слоя.

Осадку от касательных напряжений на боковой поверхности можно определить, учитывая деформацию грунтового массива вокруг сваи:

$$V_T = \frac{\tau}{G} \ln\left(\frac{b}{a}\right), \quad (11)$$

где G находим по формуле (10).

Определим осадку сваи за счет деформации грунтов под нижним концом сваи. Будем полагать, что свая действует как плоский круглый штамп. Решение такой задачи известно и имеет вид:

$$V_R = p_2 \frac{\pi a(1-\nu_0)K}{4G_0}, \quad (12)$$

где ν_0 и G_0 — деформационные параметры грунта под нижним концом сваи; $K \leq 1$ — коэффициент, учитывающий глубину приложения нагрузки на пятю сваи.

Исходя из того, что $E_{св} \gg E_{гр}$, осадка от сил на боковой поверхности равна осадке от действия сил на уровне нижнего конца сваи [21]. Приравнивая (11) и (12), а также учитывая (5), получаем:

$$p_1 = p_2 + p_2 \frac{\pi(1-\nu_0)KG2l}{4G_0 \ln\left(\frac{b}{a}\right)a}. \quad (13)$$

Отсюда получаем:

$$p_2 = p_1 / A, \quad (14)$$

где

$$A = 1 + \frac{\pi(1-\nu_0)KG2l}{4G_0 \ln\left(\frac{b}{a}\right)a}. \quad (15)$$

Подставляя p_2 из (14) в (12), получаем выражение для установления осадки сваи:

$$V_R = \frac{p_1}{A} \frac{\pi a(1-\nu_0)K}{4G_0}. \quad (16)$$

Таким образом, полностью решена поставленная задача. Из выражения (16) можно определить общую осадку сваи.

Ниже приведены результаты определения осадки сваи по формуле (16) и численным методом, при: $l_1 = l_2 = l_3 = 5$ м; $l = 15$ м; $a = 0,5$ м; $b = 6,0$ м; $E_1 = 30$ МПа; $E_2 = 10$ МПа; $E_3 = 25$ МПа; $E_0 = 50$ МПа; $K = 0,7$.

Решение поставленной задачи было также получено численным методом конечных элементов с помощью программы Plaxis 3D, которая предназначена, в том числе, для количественной оценки НДС массивов грунта (рис. 2).

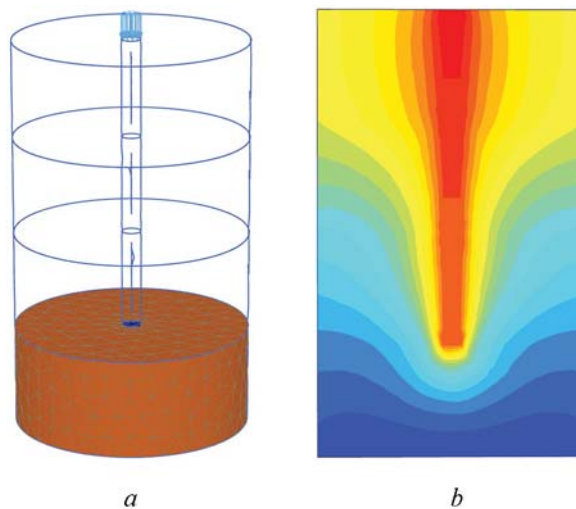


Рис. 2. Расчетная схема для численного метода (a) и изополя вертикальных перемещений (b)

Fig. 2. Design pattern of a numerical method (a) and isofields of vertical displacements (b)

Постановка и решение задачи аналитическим методом с учетом нелинейных свойств грунтов

Рассмотрим задачу взаимодействия сваи с окружающим многослойным массивом грунта, обладающим упругопластическими свойствами, полагая, что прорезающий многослойный массив грунта можно представить с помощью средневзвешенных характеристик γ , ϕ и c .

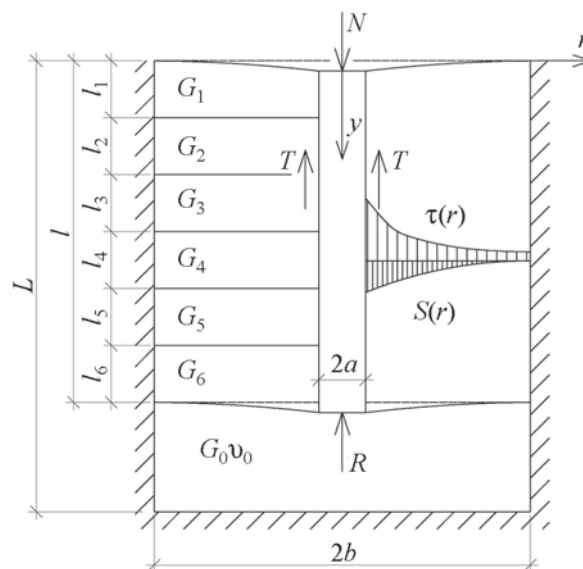


Рис. 3. Расчетная схема взаимодействия сваи с многослойным грунтовым цилиндром

Fig. 3. Design pattern of interaction between the pile and the multi-layer soil column

Для описания нелинейных сдвиговых деформаций воспользуемся упругопластической моделью С.П. Тимошенко [22], представленной уравнением следующего вида:

$$\gamma(r) = \frac{\tau(r)}{G} \frac{\tau^*}{(\tau^* - \tau)}, \quad (17)$$

где $\gamma(r)$ — угловая деформация; G — приведенный модуль сдвига многослойного массива грунта, определяемый по выражению (10); τ^* и τ — средневзвешенные действующее и предельное значения касательных напряжений, причем $\tau^* = \sigma_g \varphi + c$, φ и c — средневзвешенные параметры прочности.

Решение задачи будем рассматривать для сваи круглого сечения, т.е. в условиях осевой симметрии. Напряжение вокруг сваи:

$$\tau(r) = \tau_\alpha \frac{a}{r}, \quad (18)$$

где a — радиус сваи; τ_α — напряжение на контуре сваи; r — координата по горизонтальной оси.

Деформация вокруг сваи:

$$\gamma = -\frac{dV}{dr}, \quad (19)$$

где V — вертикальное перемещение грунта.

Определим осадку сваи от действия касательных напряжений на ее боковой поверхности. Подставляя значения $\tau(r)$ из уравнения (18) в формулу (17) с учетом выражения (19) и выполнив интегрирование, получаем:

$$V_T = \tau_\alpha \frac{a}{G} \ln \left(\frac{b - a \frac{\tau_\alpha}{\tau^*}}{a - a \frac{\tau_\alpha}{\tau^*}} \right). \quad (20)$$

Если выражение (20) представить с учетом уравнения (5):

$$V_T = (p_1 - p_2) \frac{a^2}{2lG} \ln \left(\frac{b - \frac{a^2(p_1 - p_2)}{2l\tau^*}}{a - \frac{a^2(p_1 - p_2)}{2l\tau^*}} \right). \quad (21)$$

Приравнявая V_T и V_R из (21) и (12), получаем:

$$p_2 = \frac{2aG_0(p_1 - p_2)}{\pi l G (1 - \nu_0) K} \ln \left(\frac{b - \frac{a^2(p_1 - p_2)}{2l\tau^*}}{a - \frac{a^2(p_1 - p_2)}{2l\tau^*}} \right), \quad (22)$$

где ν_0 и G_0 — деформационные параметры грунта под нижним концом сваи; a — радиус сваи; l — длина сваи; G — приведенный модуль сдвига многослойного массива грунта.

Это — трансцендентное уравнение относительно неизвестного p_2 в зависимости от p_1 . Его решение можно получить с помощью программного комплекса Mathcad.

Полученное выше решение можно также рассматривать для случая, когда для описания осадки грунта под нижним концом сваи используется нелинейная зависимость. В таком случае нижний слой грунта обладает упругопластическими свойствами, соответствующими формуле (17). Тогда уравнение (12) можно записать в следующем виде:

$$V_R = p_2 \frac{\pi a (1 - \nu_0) K}{4G_0} \frac{p_2^*}{p_2^* - p_2}, \quad (23)$$

где p_2^* — предельное напряжение на пяте сваи.

Значение p_2^* можно определить по СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений»:

$$p_2^* = N_y \xi_y 2a\gamma_2 + N_g \xi_g l \gamma_1 + N_c \xi_c c, \quad (24)$$

где N_y , N_g , N_c — безразмерные коэффициенты несущей способности; γ_1 и γ_2 — значения удельного веса грунта соответственно ниже и выше нижнего конца сваи; $\xi_y = 0,75$; $\xi_g = 2,5$; $\xi_c = 1,3$ — коэффициенты формы фундамента (приведены для круглого сечения сваи).

Если выражение (21) приравнять с (23), получаем формулу для определения неизвестного p_2 :

$$p_2 = \frac{2aG_0(p_2^* - p_2)(p_1 - p_2)}{\pi l G (1 - \nu_0) K p_2^*} \ln \left(\frac{b - \frac{a^2(p_1 - p_2)}{2l\tau^*}}{a - \frac{a^2(p_1 - p_2)}{2l\tau^*}} \right). \quad (25)$$

Полученное трансцендентное уравнение также можно решить с помощью программного комплекса Mathcad.

Ниже приведены решения уравнения (25) для случая: $l_1 = l_2 = l_3 = 10$ м; $l = 30$ м; $a = 0,3, 0,5, 1,0$ м; $b = 13 \cdot a$; $E_1 = 30$ МПа; $E_2 = 10$ МПа; $E_3 = 25$ МПа; $E_0 = 50$ МПа; $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = \nu_0 = 0,35$; $K = 0,7$; $\tau^* = 37,4$ кПа. Решения получены в программном комплексе Mathcad.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определили зависимости осадки сваи от нагрузки при расчете по формуле (16) и в программном комплексе Plaxis 3D. Как и следовало ожидать, сравнение результатов решений, полученных аналитическим и численным методами, показало хорошую сходимость зависимости осадки от нагрузки (рис. 4).

Анализ полученных зависимостей (рис. 5, а) демонстрирует, что при неизменном значении радиуса зоны влияния сваи и длине сваи с увеличением диаметра сваи растет соотношение p_2/p_1 . Используя

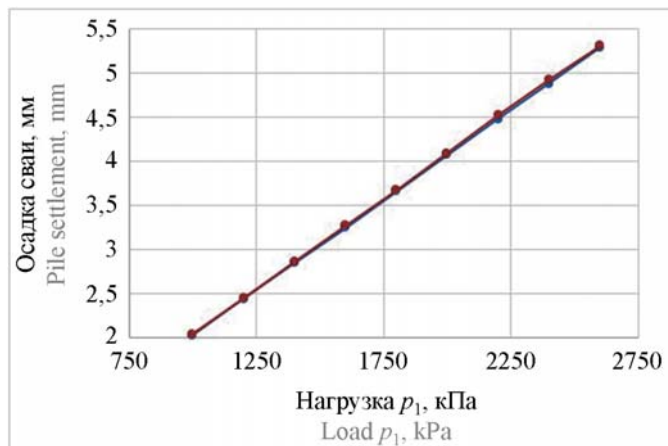
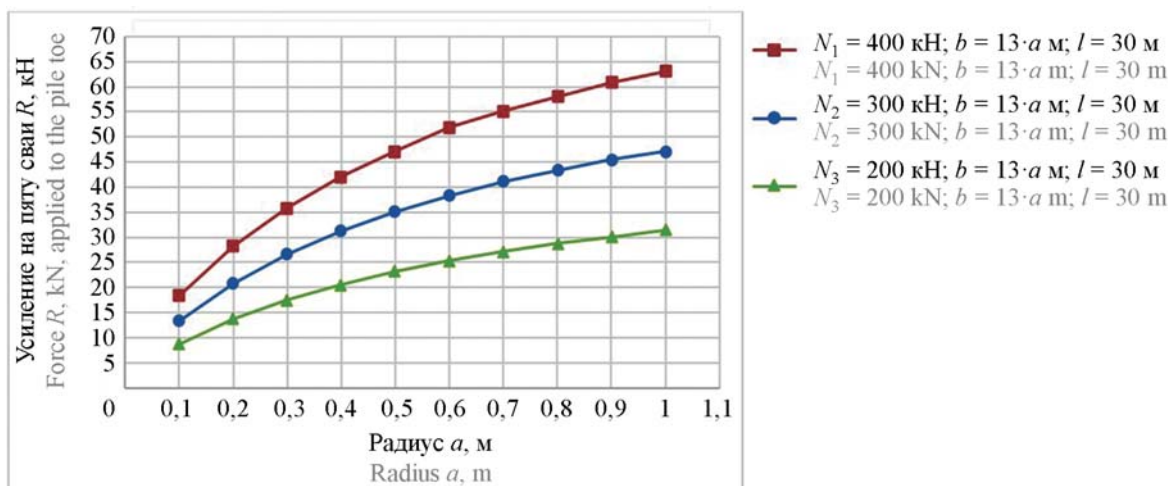
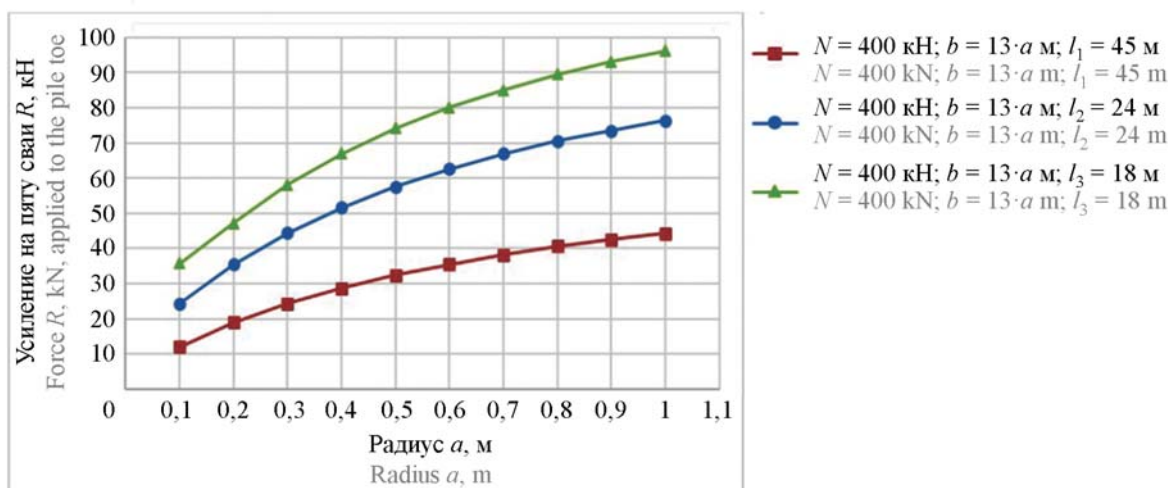


Рис. 4. График зависимости осадки от нагрузки, рассчитанный аналитическим и численным методами

Fig. 4. The diagram describing the dependence of the settlement and the load, obtained using analytical and numerical methods



a



b

Рис. 5. Графики зависимости усилия на пяту свай от радиуса свай при переменной нагрузке на оголовки свай (a) и при переменной длине свай (b)

Fig. 5. Diagrams describing the dependence of the force applied to the pile toe on the pile radius in case of variable loads applied to the pile (a) and if the pile length is variable (b)

установленную зависимость (рис. 5, *b*), можно утверждать, что при увеличении длины сваи снижается напряжение на пяте сваи. Кроме этого, графики зависимости (рис. 5, *a*, *b*) позволяют подобрать оптимальное соотношение длины сваи и ее диаметра для наиболее эффективного использования несущей способности грунтов под пятой сваи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При взаимодействии сваи с окружающим многослойным грунтовым массивом возникает сложное НДС, при котором происходит распределение приложенной нагрузки между касательными напряжениями и напряжением под подошвой сваи.

Полученная зависимость для определения приведенного модуля сдвига многослойного грунтового массива показала хорошую сходимость с численными методами в упругой постановке. При увеличении диаметра сваи увеличивается соотношение p_2/p_1 , при увеличении длины сваи соотношение p_2/p_1 уменьшается. Для свай большой длины происходит перераспределение вертикальной нагрузки между касательными напряжениями и напряжением под подошвой сваи, в результате которого возможно полное исключение пяты сваи из работы. Для наиболее эффективного использования несущей способности грунтов под пятой сваи необходимо подобрать оптимальное соотношение длины сваи и ее диаметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абелев М.Ю., Абелев К.М.* Геотехнические исследования площадок строительства, сложенных слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами // *Геотехника*. 2010. № 6. С. 30–33.
2. *Ибрагимов М.Н., Семкин В.В.* Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов. М.: Изд-во АСВ, 2012. 254 с.
3. *Бройд И.И.* Струйная геотехнология: учебное пособие для студентов. М.: Изд-во АСВ, 2004. 440 с.
4. *Малинин А.Г.* Струйная цементация грунтов. М.: Стройиздат, 2010. 165 с.
5. *Garassimo A.* Design procedures for jet-grouting // *Seminar on jet grouting*. Singapore, 1997.
6. *Yahiro T., Yoshida H., Nishi K.* The development and application of Japanese grouting system // *Water Power and Dam Construction*. 1975. Vol. 27. Pp. 55–69.
7. *Караулов А.М.* Практический метод расчета вертикально армированного основания ленточных и отдельно стоящих фундаментов транспортных сооружений // *Вестник ТГАСУ*. 2012. № 2 (35). С. 183–190.
8. *Кравцов В.Н., Якуненко С.А., Лапатын П.В.* Исследование вертикально армированных оснований плитных фундаментов грунтобетонными микросваями и апробация их результатов в производственных условиях // *Вестник Полоцкого государственного университета*. Серия F. Строительство. 2015. № 16. С. 40–47.
9. *Нуждин М.Л.* Экспериментальные исследования усиления грунтового основания свайных фундаментов армированием жесткими включениями // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2019. Т. 10. № 3. С. 5–15. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01
10. *Мирсаяпов И.Т., Шарафутдинов Р.А.* Расчетная модель несущей способности и осадок грунтового основания, армированного вертикальными и горизонтальными элементами // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 3 (37). С. 179–187.
11. *Тер-Мартirosян А.З., Ле Дык Ань, Манукян А.В.* Влияние разжижения грунтов на расчетную несущую способность сваи // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 5. С. 655–664. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.655-664
12. *Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С.* Прогноз осадок свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1994. 380 с.
13. *Готман Н.З., Сафиуллин М.Н.* Расчет и проектирование усиления плитного фундамента грунтоцементными сваями // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2017. Т. 8. № 4. С. 64–73. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.07
14. *Дорошкевич Н.М., Знаменский В.В., Кудинов В.И.* Инженерные методы расчета свайных фундаментов при различных схемах их нагружения // *Вестник МГСУ*. 2006. № 1. С. 119–132.
15. *Уткин В.С.* Расчет надежности висячих свай по критерию несущей способности грунта основания фундамента // *Строительство: наука и образование*. 2018. № 4 (30). С. 1. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.4.1
16. *Wei Dong Guo.* Theory and practice of pile foundations. London: CRC Press, 2012. 576 p. DOI: 10.1201/b12980
17. *Prakash S., Sharma H.D.* Pile foundation in engineering practice. John Wiley and Sons, Inc, 1990. 768 p.
18. *Viggiani C., Mandolini A., Russo G.* Piles and pile foundations. London: CRC Press, 2012. 296 p. DOI: 10.4324/9780203880876
19. *Madabhushi G., Knappett J., Haigh S.* Design of pile foundations in liquefiable soils. London: CRC Press, 2009. 232 p. DOI: 10.1142/p628

20. Тер-Мартirosян З.Г., Нгуен Занг Нам. Взаимодействие свай большой длины с неоднородным массивом с учетом нелинейных и реологических свойств грунтов // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 3–14.

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

22. Timoshenko S.P., Goodier J.N. Theory of elasticity. N.Y. : McGraw-Hill, 1970, 608 p.

Поступила в редакцию 3 февраля 2021 г.

Принята в доработанном виде 17 февраля 2021 г.

Одобрена для публикации 18 февраля 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Завен Григорьевич Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9613-8764, ORCID: 0000-0001-9159-6759, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; ter-martyrosyanz@mgsu.ru;

Александр Сергеевич Акулецкий — аспирант кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 981728; akula.92@inbox.ru.

REFERENCES

1. Abelev M.Y., Abelev K.M. Geotechnical studies of construction sites on soft water-saturated clay soils. *Geotechnics*. 2010; 6:30-33. (rus.).
2. Ibragimov M.N., Semkin V.V. *Consolidation of soils by injection of cement mortars*. Moscow, ASV Publishing House, 2012; 256. (rus.).
3. Broyd I.I. *Jet Geotechnology*. Moscow, Publishing House of the Association of Civil Engineering Universities, 2004; 440. (rus.).
4. Malinin A.G. *Jet grouting of soils*. Moscow, Stroyizdat, 2010; 165. (rus.).
5. Garassimo A. Design procedures for jet-grouting. *Seminar on jet grouting*. Singapore, 1997.
6. Yahiro T., Yoshida H., Nishi K. The development and application of Japanese grouting system. *Water Power and Dam Construction*. 1975; 27:55-69.
7. Karaulov A.M. Practical method for calculation of vertical reinforced beds of strip foundations of isolated transport facilities. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. 2012; 2(35):183-190. (rus.).
8. Kravcov V.N., Yakunenko S.A., Lapatin P.V. Research of vertical reinforced by soil-concrete micropiles slab foundations' ground bases and testing results in industrial practice. *Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. Applied Sciences*. 2015; 16:40-47. (rus.).
9. Nuhzdin M.I. Experimental studies of pile foundation ground base reinforced with hard inclusions. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2019; 10(3):5-15. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01 (rus.).
10. Mirsayapov I.T., Sharafutdinov R.A. The computational model of bearing capacity and foundation of soil sediment, reinforced by vertical and horizontal elements. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2017; 3(37):153-158. (rus.).
11. Ter-Martirosyan A.Z., Le Duc Anh, Manuky-an A.V. Influence of soil liquefaction on the design bearing capacity of a single pile. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(2):655-664. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.655-664 (rus.).
12. Bartolomey A.A., Omel'chack I.M., Yushkov B.S. *Pile foundation settlement forecast*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1994; 380. (rus.).
13. Gotman N.Z., Safiullin M.N. Calculation and design of reinforcing slab foundations with soil-cement piles. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2017; 8(4):64-73. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.07 (rus.).
14. Doroshkevich N.M., Znamensky V.V., Kudinov V.I. Engineering methods for calculating pile foundations for various loading schemes. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2006; 1:119-132. (rus.).
15. Utkin V.S. Friction pile reliability analysis with respect to the foundation soil bearing capacity. *Construction: Science and Education*. 2018; 4(30):1. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.4.1 (rus.).
16. Wei Dong Guo. *Theory and Practice of Pile Foundations*. London, CRC Press, 2012; 576. DOI: 10.1201/b12980
17. Prakash S., Sharma H.D. *Pile foundation in engineering practice*. John Wiley and Sons, Inc., 1990; 768.
18. Viggiani C., Mandolini A., Russo G. *Piles and Pile Foundations*. London, CRC Press, 2012; 296. DOI: 10.4324/9780203880876

19. Madabhushi G., Knappett J., Haigh S. *Design of Pile Foundations in Liquefiable Soils*. London, CRC Press, 2009; 232. DOI: 10.1142/p628

20. Ter-Martirosyan Z.G., Nguyen Giang Nam. Interaction between long piles and a heterogeneous massif with account for non-linear and rheological properties

of soils. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2008; 2:3-14. (rus.).

21. Ter-Martirosyan Z.G. *Soil Mechanics*. Moscow, ASV Publishing House, 2009; 551. (rus.).

22. Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. N.Y., McGraw&Hill, 1970; 608.

Received February 3, 2021.

Adopted in revised form on February 17, 2021.

Approved for publication on February 18, 2021.

BIONOTES: **Zaven G. Ter-Martirosyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9613-8764, ORCID: 0000-0001-9159-6759, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; ter-martyrosyanz@mgsu.ru;

Aleksandr S. Akuletskii — postgraduate student of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 981728; akula.92@inbox.ru.

Повышение воздухоустойкости прессованных композитов на основе магнезиального вяжущего

Н.С. Ступень¹, А.В. Каклюгин², Л.И. Касторных², В.В. Коваленко¹

¹ Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина (БрГУ имени А.С. Пушкина);
г. Брест, Республика Беларусь;

² Донской государственный технический университет (ДГТУ);
г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из критериев долговечности строительных материалов является их водостойкость, обычно оцениваемая по величине коэффициента размягчения. Однако даже водостойкие материалы не всегда способны выдерживать циклические атмосферные воздействия, вызывающие линейные деформации, снижение прочности и разрушение строительных изделий. Поэтому возникает необходимость учитывать стойкость строительных материалов, в частности, к попеременному увлажнению–высушиванию (воздухостойкость). Цель работы — исследование возможности получения прессованных композитов на основе модифицированного магнезиального вяжущего повышенной стойкости к атмосферным воздействиям.

Материалы и методы. Модификацию магнезиального вяжущего для повышения водо- и воздухоустойкости композитов на его основе осуществляли введением добавки микрокремнезема и прессованием при высоком давлении. Изучали влияние модификатора на изменение прочности на сжатие прессованных композитов в высушенном и водонасыщенном состоянии, коэффициентов размягчения и воздухоустойкости, а также линейных деформаций контрольных образцов после установленного количества циклов попеременных увлажнений и высушиваний.

Результаты. Выявлена возможность повышения водо- и воздухоустойкости строительных изделий на основе магнезиального вяжущего за счет введения в состав формовочных смесей микрокремнезема и их уплотнения методом прессования. Разработаны составы прессованных композитов на основе модифицированного магнезиального вяжущего, предназначенных для изготовления изделий, используемых в ограждающих конструкциях зданий, а также для устройства полов в помещениях с влажностью более 60 %.

Выводы. Установлено, что прессованные композиты на основе модифицированного магнезиального вяжущего обладают высокой стойкостью к попеременному увлажнению–высушиванию. Предлагаемый способ модификации препятствует расшатыванию структуры изготовленного из него прессованного камневидного материала при знакопеременных напряжениях, уменьшает линейные деформации и, как следствие, замедляет его усталостное разрушение. Применение в качестве минеральной добавки вторичного ресурса должно способствовать снижению себестоимости изделий, что позволяет отнести способ их производства к наилучшим доступным технологиям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнезиальные вяжущие, прессованные композиты, водостойкость, воздухоустойкость, микрокремнезем, наилучшие доступные технологии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ступень Н.С., Каклюгин А.В., Касторных Л.И., Коваленко В.В. Повышение воздухоустойкости прессованных композитов на основе магнезиального вяжущего // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 176–185. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.60-69

Using a magnesia binder to improve the airproof performance of molded composites

Nonna S. Stupen¹, Alexandr V. Kaklyugin², Luybov I. Kastornykh²,
Viktor V. Kovalenko¹

¹ Brest State A.S. Pushkin University (BrSU); Brest, Republic of Belarus;

² Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Water resistance is one of durability criteria of building materials. As a rule, the value of the liquefaction ratio is applied to assess the water resistance. However, even water resistant materials are not always able to withstand cyclical weather impacts that cause linear deformations, reduced strength and cause destruction of building products. Therefore, it is necessary to take into account the resistance of building materials, namely, their resistance to alternating humidification and drying (airproof performance). The purpose of this research is to study the producibility of molded composites containing a modified magnesium binder that features higher resistance to weather impacts.

Materials and methods. The magnesium binder was modified by the silica fume and high pressure molding to increase the water resistance and airproof performance of the composites. The influence produced by the modifier on the change in the compressive strength of dried and water-saturated molded composites, liquefaction and airproof performance ratios,

as well as linear deformations of the reference specimens were studied following a pre-set number of cycles of alternating wetting and drying.

Results. The water resistance and airproof performance of construction products, containing magnesia binders, may be improved by the micro-silica, added to pressed mixtures, and their compaction by press molding. Compositions of molded composites, containing a modified magnesia binder, were developed for the manufacture of products used to make enclosing structures and for the flooring of rooms having the indoor humidity of over 60 %.

Conclusions. It is established that molded composites containing a modified magnesia binder feature high resistance to alternating wetting and drying. The proposed method of modifying magnesia binders prevents the destruction of molded stone-like materials containing these binders in case of exposure to alternating stresses; it reduces linear deformations and, as a result, decelerates the fatigue failure. The use of a recyclable material as a mineral additive must contribute to the reduction of the cost of products and allow to consider the method of their production as one of the best technologies available.

KEYWORDS: magnesia binders, molded composites, water resistance, airproof performance, silica fume, best technologies available

FOR CITATION: Stupen N.S., Kaklyugin A.V., Kastornykh L.I., Kovalenko V.V. Using a magnesia binder to improve the airproof performance of molded composites. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(2):176-185. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.176-185 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Водостойкость природных и искусственных строительных материалов принято оценивать по величине коэффициента размягчения, вычисляемого как отношение их прочности на сжатие в водонасыщенном и сухом состоянии. Проблема повышения водостойкости материалов и изделий на основе магнезиальных вяжущих с целью расширения их использования в строительстве на протяжении многих лет находится в центре внимания отечественных и зарубежных исследователей [1–5]. Известные способы повышения водостойкости таких изделий разнообразны, но сводятся главным образом либо к защите материала от увлажнения, либо к модификации магнезиальных вяжущих веществ различными неорганическими и органическими добавками [5–9]. Простым и эффективным методом защиты изделий на основе магнезиальных вяжущих от увлажнений является их гидрофобизация. Для этого изделия покрывают и пропитывают различными гидрофобизирующими составами: смесями, содержащими безводную терпентиновую смолу в сочетании с компонентами из группы парафиновых углеводородов, природными и синтетическими восками, углеводородными смолами, а также полиэтиленом, полигликолем, полигликолевыми эфирами, парафинированным спиртом и силиконовыми смолами, перхлорвиниловыми лаками и красками [10–12]. Более эффективный способ повышения водостойкости изделий на основе магнезиальных вяжущих — связывание водорастворимых продуктов их твердения в труднорастворимые соединения с помощью различных активных минеральных добавок. Многочисленные исследования посвящены изучению влияния фосфатных и сульфатных добавок, тонкомолотой обожженной глины, аморфного кремнезема [13–16]. Такие добавки позволяют улучшить физико-механические свойства изделий, но наличие труднорастворимых соединений среди продуктов твердения не в полной мере устраняет причину низкой водостойкости изделий из магнезиальных вяжущих [17]. В присутствии избытка

хлорид-ионов гидроксид и оксихлориды магния обладают повышенной растворимостью. Кроме этого, одна из проблем получения качественных изделий из магнезиальных вяжущих — устранение высолов хлорида магния на их поверхности, появление которых также связано с избыточной концентрацией хлорид-ионов. Однако уменьшение количественного содержания хлорид-ионов в растворе затворителя (бишофите) приводит к снижению прочности и водостойкости изделий. Это связано с тем, что для обеспечения нормального твердения магнезиального вяжущего требуется концентрация $MgCl_2$ в растворе затворения не менее 15 % [1]. При уменьшении количества затворителя и сохранении необходимой концентрации хлорида магния растворимость гидроксида и оксихлоридов магния, а также возможность образования высолов уменьшаются [18, 19]. Снижение содержания жидкости в формовочной смеси ухудшает удобоукладываемость литых и виброуплотняемых смесей. Поэтому возникла потребность применения более интенсивных способов их уплотнения, например прессования. Метод прессования широко используют при изготовлении теплоизоляционных и акустических ксилолитовых изделий. Хотя удельное давление прессования в этом случае не превышает 15 МПа, что обусловлено деформационными особенностями заполнителей растительного происхождения (древесной шерсти, стружки, опилок и т.п.).

На наш взгляд, для смесей на основе магнезиального вяжущего при производстве изделий плотной структуры значительный интерес представляет метод прессования при более высоком давлении. Увеличение давления прессования в данном случае позволит существенно сократить расход затворителя и повысить за счет этого прочность изделий, а также уменьшить высолообразование на их поверхности. С целью повышения водо- и водостойкости прессованных изделий из магнезиального вяжущего мы предлагаем вводить в его состав тонкодисперсный микрокремнезем. В результате химического взаимодействия аморфного микрокремнезема с оксидом и гидроксидом магния в растворе $MgCl_2$ образуются труднора-

створимые гидросиликаты магния типа сепиолита и серпентина, обеспечивающие повышение водостойкости магнезиального вяжущего. Возникновение гидросиликатов магния протекает через стадию образования аморфной фазы, которая в сочетании с кристаллической делает возможным повышение прочности. Выкристаллизовавшиеся из геля гидросиликаты магния имеют спутанно-волоконистое строение, что также способствует повышению структурно-механических свойств магнезиального вяжущего. При сочетании коагуляционной, конденсационной и кристаллизационной структур камень модифицированного вяжущего приобретает максимальную прочность. В свою очередь, частицы ультрадисперсного кремнезема могут являться дополнительными центрами кристаллизации продуктов твердения магнезиального вяжущего, в частности, оксихлоридов магния [20, 21]. Использование в качестве минеральной добавки вторичного ресурса должно способствовать снижению себестоимости изделий, что позволяет отнести способ их производства к наилучшим доступным технологиям. К тому же, результаты наших предыдущих исследований показывают, что водостойкость прессованных композитов на основе воздушных вяжущих веществ особенно тесно связана с величиной их остаточной открытой пористости. Независимо от вида и количества модифицирующих добавок, значения отношения $MgO/MgCl_2$ и величины прессующего давления, коэффициент размягчения прессованного материала уменьшается пропорционально увеличению его открытой пористости [20]. По мнению некоторых ученых [22], нельзя судить о долговечности мелкоштучных стеновых изделий на основе воздушных вяжущих веществ только на основании оценки коэффициента размягчения. Следует учитывать, что в процессе эксплуатации такие материалы крайне редко подвергаются полному обезвоживанию или водонасыщению, а, в нашем случае, прессованные композиты на основе модифицированного магнезиального вяжущего даже при значениях коэффициента размягчения 0,6–0,7 сохраняют достаточно высокую прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии. Поэтому, по нашему мнению, одним из важнейших критериев долговечности строительных материалов и изделий для ограждающих конструкций зданий, а также изделий, эксплуатируемых в помещениях с повышенной влажностью (более 60 %), является их стойкость к атмосферным воздействиям (воздухостойкость), оцениваемая путем проведения более жестких испытаний на попеременное увлажнение и высушивание. Такие циклические воздействия расшатывают структуру материала, ускоряют трещинообразование, снижают стойкость к агрессивным влияниям. В итоге это приводит к разрушению изделий, объясняемому, прежде всего, изменением их объема в наружных и внутренних зонах и, как следствие, появлением значительных растягивающих и скалывающих напряжений.

Цель настоящей работы — исследование возможности получения прессованных композитов на основе модифицированного магнезиального вяжущего повышенной стойкости к атмосферным воздействиям. В статье представлены результаты исследований по оценке воздухостойкости прессованных композитов на основе магнезиальных вяжущих веществ, модифицированных микрокремнеземом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В экспериментальных исследованиях в качестве магнезиального вяжущего использовали каустический магнезит марки ПМК-75 (ГОСТ 1216-87 «Порошки магнезитовые каустические. Технические условия»), активность которого составляет 40 МПа при сжатии и 18 МПа при изгибе. В качестве пуццолановой добавки в магнезиальное вяжущее применяли микрокремнезем — побочный продукт производства кремниевых и феррокремниевых сплавов, представляющий собой высокодисперсную пыль кремнезема (удельная поверхность $2000 \text{ м}^2/\text{кг}$), содержащую не менее 85 % аморфного SiO_2 .

Приготовление исследуемых сырьевых смесей осуществляли на лабораторной бегунковой растворомешалке путем перемешивания компонентов в течение 5 мин. Оценка стойкости материалов к попеременному увлажнению–высушиванию проводили на образцах-цилиндрах высотой и диаметром 50,5 мм. Образцы изготавливали методом прессования под давлением 40 МПа в специальных пресс-формах из формовочных смесей нескольких составов. Перед испытаниями образцы 28 сут твердели в воздушно-сухих условиях.

Стойкость образцов к попеременному увлажнению–высушиванию изучали следующим образом. Сначала образцы в течение 3 ч выдерживали в воде при температуре $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$, а затем высушивали в течение 15 ч при такой же температуре. После этого их высушивали 6 ч в сушильном шкафу при температуре 60–65 $^\circ\text{C}$. Указанные операции по водонасыщению и высушиванию принимали за один цикл испытаний. Принятую в опытах продолжительность выдерживания образцов в воде устанавливали из условия, что в течение этого времени их водонасыщение достигает примерно 85 % максимально возможного значения. После каждых 10 циклов для физико-механических испытаний отбирали по 10 образцов, половину которых испытывали в высушенном до постоянной массы состоянии, а остальные — в водонасыщенном. По показателям прочности образцов на сжатие определяли коэффициенты размягчения и воздухостойкости. Последний вычисляли как частное от деления прочности высушенных до постоянной массы образцов, прошедших N циклов испытаний, к прочности контрольных образцов (при «нулевом» цикле испытаний). Считали, что материал выдержи-

вает испытания, если коэффициент воздухоустойкости остается не менее 0,75.

Возникновение и развитие необратимых деформаций при попеременных увлажнении–высушиваниях изучали на образцах–призмах размером $40 \times 40 \times 160$ мм, в торцах которых в процессе формования были зафиксированы стальные пластинки размером 40×40 мм с анкерами. Измерение деформаций производили с помощью штатива с индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. Углубления, сделанные керном в геометрических центрах анкерных пластинок, обеспечивали измерение деформации в одних и тех же точках. Контроль надежности измерений и учет температурных погрешностей обеспечивали с помощью стального эталона, имеющего такие же геометрические характеристики, что и опытные образцы. Перед измерением деформаций осуществляли отсчет по эталону, после чего последний помещали в воду, где находились образцы, подлежащие очередным измерениям. По окончании измерения деформаций всех образцов эталон извлекали из воды и снимали второй отсчет. Разность размеров до и после помещения эталона в воду учитывали при подсчете величины деформации. Измерения образцов производили через каждые 10 циклов попеременных увлажнений и высушиваний.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценку стойкости прессованных композитов на основе модифицированного магнезиального вяжущего к попеременному увлажнению и высушиванию проводили с использованием контрольных образцов, отформованных из смесей, составы которых в предварительных опытах показали наилучшие результаты по прочности на сжатие и водостойкости. Исследования выполнены при соотношении $MgO/MgCl_2$, равном 0,072. Составы исследуемых формовочных смесей и физико-механические характери-

стики отформованных их образцов приведены в табл. 1.

Характер изменения прочности на сжатие образцов в сухом и водонасыщенном состоянии по мере увеличения числа циклов попеременных увлажнений–высушиваний представлен на рис. 1.

Из полученных данных видно, что механическая прочность образцов всех составов уменьшается по мере нарастания числа циклов испытаний. Однако наиболее заметно при этом снижение прочности у образцов составов 1 и 2, т.е. изготовленных из теста магнезиального вяжущего нормальной консистенции литьевым способом и прессованного магнезиального вяжущего без минеральной добавки соответственно. Прессованные образцы с добавкой микрокремнезема (составы 3–6) оказались значительно более стойкими к попеременным увлажнениям и высушиваниям. Так, если принять допустимое снижение начальной прочности материала в процессе циклических испытаний не более чем на 25 %, то по показателям прочности в высушенном состоянии образцы первого состава выдержали 35 циклов, второго состава — 40 циклов, пятого состава — 50 циклов, шестого состава — 45 циклов, а указанное снижение прочности третьего и четвертого составов произошло после 80 циклов попеременных увлажнений и высушиваний. Следует отметить, что снижение прочности образцов на 25 % в водонасыщенном состоянии у всех составов фиксируется при меньшем числе циклов увлажнений и высушиваний. У образцов первого и второго составов оно наступает через 25 циклов испытаний, третьего состава — через 65 циклов, четвертого состава — через 45 циклов, пятого состава — через 30 циклов, а у образцов шестого состава, содержащего наибольшее количество микрокремнезема, снижение прочности на сжатие в водонасыщенном состоянии происходит через 20 циклов испытаний. Образцы первого состава, выдержав 60 циклов попеременного увлажнения–высушивания, а второго

Табл. 1. Составы формовочных смесей и физико-механические характеристики модифицированных вяжущих
Table 1. Compositions of molding compounds; physical and mechanical characteristics of modified binders

Состав Composition	Содержание, % по массе Content, % by mass		Предел прочности образцов при сжатии, МПа Ultimate compressive strength of samples, MPa		Коэффициент размягчения Liquefaction ratio	Средняя плотность, кг/м ³ Average density, kg/m ³	Водопоглощение, % по массе Water absorption, % by mass	Открытая пористость, % Effective porosity, %
	магнезиальное вяжущее magnesia binder	микрокремнезем silica fume	сухие dry	водонасыщенные water-saturated				
1	100	–	41,1	22,1	0,54	1900	13,9	26,41
2	100	–	46,1	26,3	0,57	2000	8,9	21,00
3	90	10	66,7	53,6	0,80	2080	5,8	12,06
4	85	15	62,8	44,6	0,71	2108	5,7	11,30
5	80	20	54,7	37,2	0,68	2080	6,5	13,05
6	75	25	46,8	29,3	0,62	2075	8,5	14,20

и шестого составов — 80 циклов испытаний, полностью разрушились.

Как видно из рис. 1, прочность сухих и водонасыщенных образцов третьего и четвертого составов в первые 20 циклов испытаний несколько увеличивается. После 80 циклов попеременных увлажнений–высушиваний эти составы, содержащие соответственно 10 и 15 % микрокремнезема, характеризуются наибольшим сбросом прочности. Отмеченное увеличение прочности образцов указанных выше составов можно объяснить сложными физико-химическими процессами, происходящими в структуре прессованного материала при попеременных увлажнении–высушивании. Они связаны с дополнительной гидратацией оксида магния, а также частичным переходом аморфной фазы гидросиликатов магния в кристаллическую. Происходящие процессы сопровождаются, по-видимому, увеличением удельной поверхности новообразований, что приводит к уплотнению структуры затвердевшего камня и снижению его открытой пористости. В наших исследованиях это хорошо согласуется с представленным на рис. 2 изменением водопоглощения по массе образцов по мере нарастания числа циклов попеременных увлажнений и высушиваний.

Сопоставляя данные изменения прочности образцов (рис. 1) и их водопоглощения по массе (рис. 2) с увеличением числа циклов испытаний,

можно проследить следующую закономерность: чем больше прирост прочности материала в первые циклы испытаний, тем одновременно заметнее снижается его водопоглощение по массе, тем раньше в дальнейшем наступает 25%-ный сброс прочности исследуемых образцов.

Изменение свойств исследованных составов сопровождается линейными деформациями образцов-призм, которые представлены на рис. 3. Они связаны с описанными выше физико-химическими процессами, происходящими в структуре материалов, а также с развитием дефектов и микротрещин усталостного характера. В результате проведенных исследований установлено, что образцы, изготовленные прессованием из модифицированных вяжущих (составы 3–6), характеризуются необратимыми линейными деформациями на 1,5–2 раза меньше, чем образцы из теста магниезального вяжущего нормальной консистенции (состав 1), а также образцы из чистого прессованного магниезального вяжущего (состав 2). Следует отметить, что у образцов первого состава после 40 циклов попеременных увлажнений–высушиваний на поверхности появляются высолы, а после 60 циклов испытаний при деформации 8,8 мм/м они разрушаются. Образцы второго состава (прессованные без добавки микрокремнезема) разрушаются после 80 циклов испытаний при уровне деформаций 7,8 мм/м. Прес-

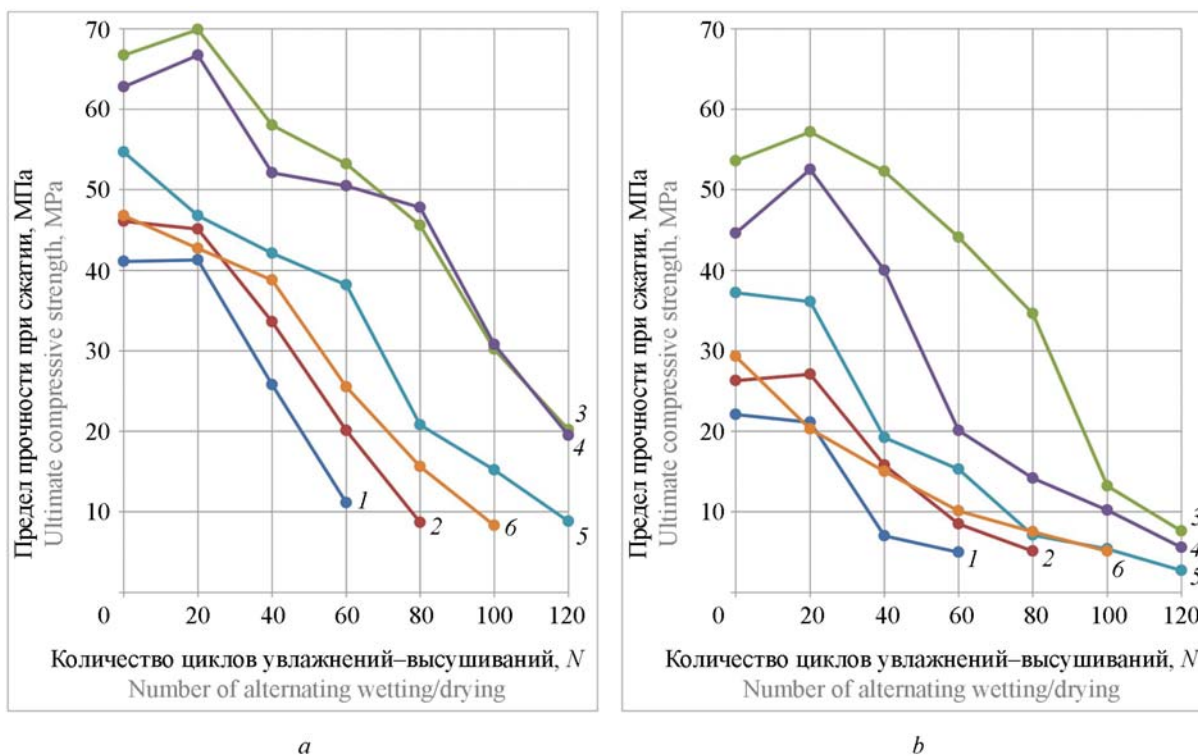


Рис. 1. Зависимость прочности образцов на сжатие в высушенном (а) и водонасыщенном (б) состоянии от числа циклов попеременного увлажнения и высушивания: 1–6 — номера составов

Fig. 1. Dependence of compressive strength of samples in the dried (a) and water-saturated (b) condition on the number of alternating wetting/drying cycles: 1–6 — composition numbers

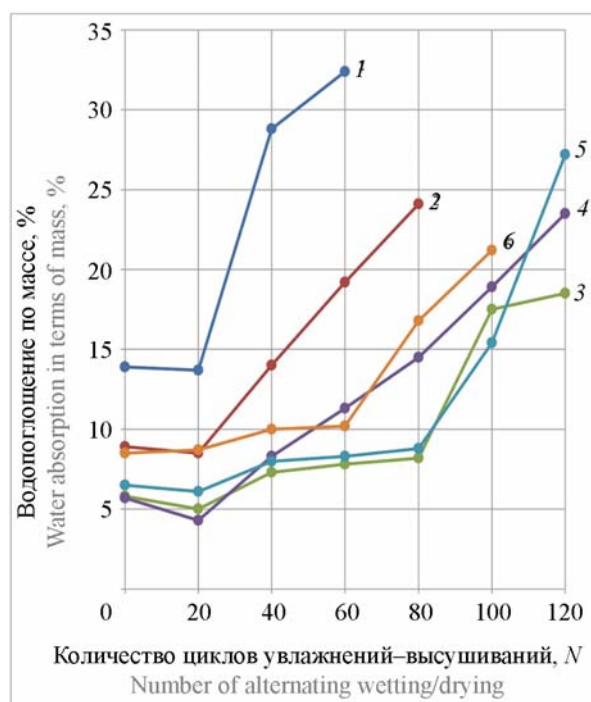


Рис. 2. Зависимость водопоглощения по массе образцов от числа циклов попеременного увлажнения и высушивания: 1–6 — номера составов

Fig. 2. Dependence of water absorption on the number of alternate wetting/drying cycles in terms of the mass of samples: 1–6 — composition numbers

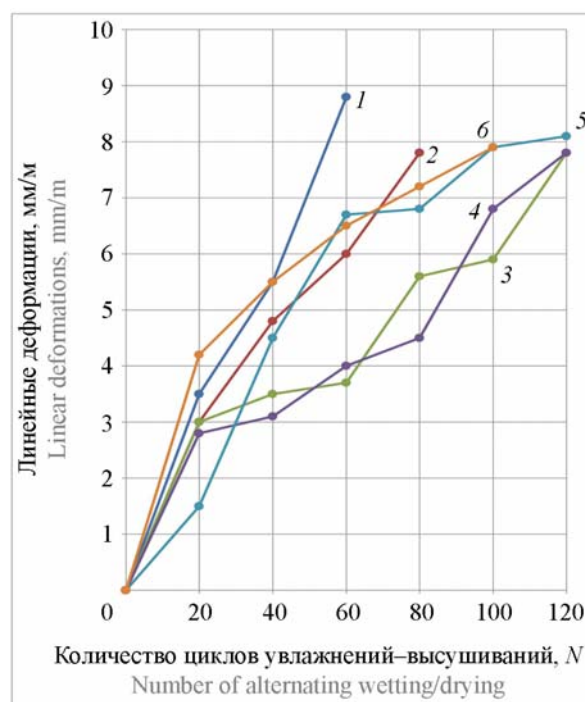


Рис. 3. Линейные деформации образцов при попеременных увлажнении и высушиваниях: 1–6 — номера составов

Fig. 3. Linear deformations of samples in the course of wetting and drying: 1–6 — composition numbers

сованные композиты третьего, четвертого и пятого составов с линейными деформациями 7,8; 7,9 и 8,1 мм/м не разрушаются даже после 120 циклов испытаний.

По нашему мнению, полученные закономерности связаны с особенностями структуры композитов, обусловленными применением добавки тонкодисперсного микрокремнезема и уплотнением смесей прессованием при высоком давлении. Линейные деформации третьего и четвертого составов наиболее сильно проявляются в первые 20–30 циклов попеременных увлажнений–высушиваний, а затем скорость их нарастания понижается.

Ранее мы отмечали, что в этот период испытаний у большинства составов отмечается рост механической прочности и уменьшение водопоглощения по массе. Это позволяет предположить, что увеличение линейных размеров образцов вызвано дополнительной гидратацией и кристаллизацией аморфных гидросиликатов магнезия, происходящих в первые циклы попеременных увлажнений–высушиваний и сопровождающихся некоторым объемным расширением. Как видно из рис. 3, необратимые линейные деформации образцов прессованного магнезиального вяжущего без добавки (состав 2) и изготовленных из магнезиального теста нормальной консистенции (состав 1) нарастают лавинообразно и сопровожда-

ются снижением прочности, водостойкости и ростом водопоглощения, что указывает на крайне низкую стойкость указанных составов при попеременных увлажнении–высушиваниях. Резкое увеличение линейных деформаций наблюдается в образцах пятого и шестого составов (содержат соответственно 20 и 25 % по массе микрокремнезема) после 80 циклов испытаний. Такой характер накопления деформаций связан с избыточным содержанием микрокремнезема, который не участвует в образовании гидросиликатов магнезия и, за счет образования дополнительной аморфной фазы, увеличивает напряжения в камне вяжущего при попеременных увлажнении и высушиваниях.

Описанные выше изменения механической прочности материала в сухом и водонасыщенном состоянии с увеличением числа циклов попеременных увлажнений–высушиваний наиболее наглядно можно проследить на рис. 4, на котором показано изменение рассчитанных коэффициентов размягчения и водостойкости исследованных составов. Как видно из рис. 4, коэффициент размягчения для всех составов при попеременном увлажнении–высушивании изменяется не монотонно. Первый состав (из теста магнезиального вяжущего нормальной консистенции) характеризуется наименьшим начальным коэффициентом размягчения

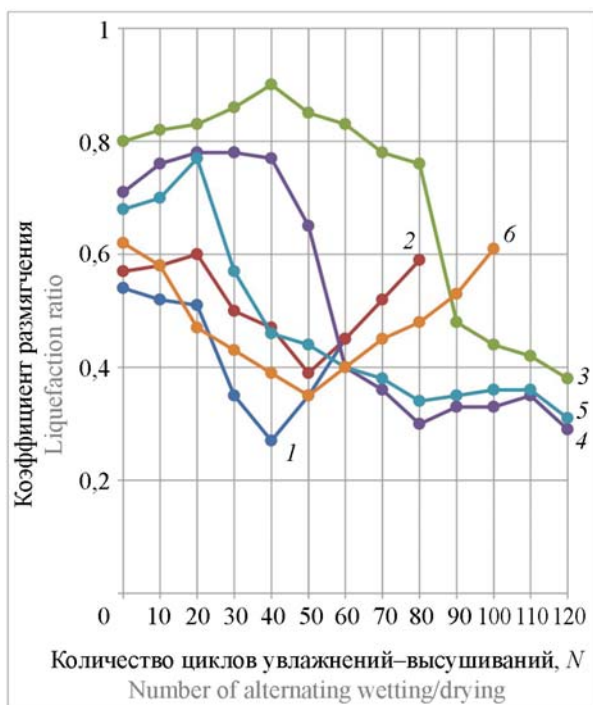
($K_p = 0,54$), величина которого после 40 циклов испытаний снижается до 0,27. Затем после 60 циклов увлажнений–высушиваний коэффициент размягчения повышается до 0,45, но при этом образцы начинают разрушаться. Своего минимального значения коэффициенты размягчения образцов второго и шестого составов достигают через 50 циклов ($K_p = 0,39$ и 0,35), а пятого состава — через 120 циклов испытаний ($K_p = 0,31$). Затем у второго состава — через 80 циклов, а у шестого состава — через 100 циклов увлажнений–высушиваний коэффициент размягчения повышается и достигает практически первоначального значения. Это связано с тем, что при циклических увлажнениях–высушиваниях в первые сроки испытаний прочность магниезиальных вяжущих в высушенном состоянии снижается в меньшей степени, чем прочность в водонасыщенном. При нарастании числа испытаний в камне магниезиального вяжущего накапливаются усталостные напряжения, не позволяющие им восстанавливать прочность при высыхании, поэтому разрушение образцов идет даже при сравнительно большом значении коэффициента размягчения.

Наибольшим коэффициентом размягчения до начала испытаний обладают образцы третьего и четвертого составов ($K_p = 0,80$ и 0,71). Эти составы выдержали 120 циклов испытаний без разрушения при сравнительно небольших значениях коэффициентов размягчения ($K_p = 0,38$ и 0,29).

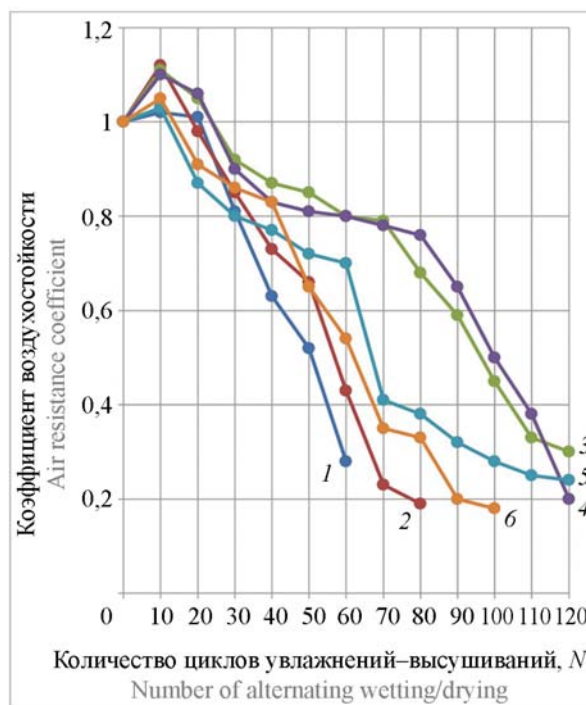
Изменение коэффициента воздухоустойкости у всех составов также согласуется с изменением физико-механических характеристик при попеременных увлажнениях–высушиваниях (рис. 4, *b*). После первых 10 циклов испытаний у всех исследованных составов наблюдается небольшое увеличение K_v . После 60 циклов испытания коэффициент воздухоустойкости первого состава составляет 0,28, при этом образцы разрушаются. У образцов второго состава разрушение происходит после 80 циклов испытаний ($K_v = 0,18$), а образцы из пятого и шестого составов выдерживают 100 циклов испытаний при значениях коэффициента воздухоустойкости соответственно 0,28 и 0,13. Коэффициенты воздухоустойкости у третьего и четвертого составов после 120 циклов испытаний соответственно равны 0,34 и 0,25.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что прессованные композиты из модифицированных магниезиальных вяжущих обладают высокой стойкостью к попеременному увлажнению–высушиванию в сравнении с магниезиальными вяжущими без добавки, и, тем более, с образцами, отформованными из теста нормальной консистенции. Это объясняется тем, что, как установлено в наших предыдущих исследованиях, прессованные композиты на основе модифицированного магниезиального вяжущего содержат



a



b

Рис. 4. Зависимость коэффициентов размягчения (*a*) и воздухоустойкости (*b*) от числа циклов попеременного увлажнения и высушивания: 1–6 — номера составов

Fig. 4. Dependence of liquefaction (*a*) and airproof performance (*b*) ratios on the number of alternating wetting/drying cycles: 1–6 — composition numbers

в структуре затвердевшего камня труднорастворимые гидросиликаты магния. Кроме того, гидросиликатные пленки защищают оксихлориды магния от разрушающего действия воды. Прессование, как способ уплотнения, позволяет более чем в два раза сократить содержание хлорида магния в составе затворителя, что обеспечивает уменьшение растворимости образующихся оксихлоридов и гидросиликатов магния. В результате этого достигается повышение водостойкости затвердевшего камня, а также исключение высолообразования. Процесс твердения прессованных магнезиальных композитов, модифицированных микрокремнеземом в оптимальном количестве (10–15 % по массе), сопровождается образованием сложной комбинированной структуры, содержащей коагуляционную, конденсационную и кристаллизационную

фазы. Предлагаемый способ модификации магнезиального вяжущего препятствует расшатыванию структуры изготовленного из него прессованного камневидного материала при знакопеременных напряжениях, уменьшает линейные деформации и, как следствие, замедляет его усталостное разрушение.

Разработанные составы прессованных магнезиальных композитов рекомендуются для производства строительных изделий, применяемых в ограждающих конструкциях зданий, а также для устройства полов в помещениях с влажностью более 60 %. Использование в качестве минеральной добавки вторичного ресурса должно способствовать снижению себестоимости изделий, что дает возможность отнести способ их производства к наилучшим доступным технологиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайвад А.Я. Магнезиальные вяжущие вещества. Рига : Зинатне, 1971. 331 с.
2. Бердов Г.И., Зырянова В.Н., Ильина Л.В., Никоненко Н.И., Сухаренко В.А. Межфазное взаимодействие и механическая прочность композиционных вяжущих материалов. Часть 1. Магнезиальные вяжущие вещества // Техника и технология силикатов. 2014. Т. 21. № 3. С. 8–14.
3. Митина Н.А., Лотов В.А., Кабанова В.В., Сухушина А.В. Особенности гидратации магнезиального цемента // Фундаментальные исследования. 2013. № 8–3. С. 676–680.
4. Chen H. Preparation and performance of magnesia cement plate modified by some modifiers // International Conference on Agricultural and Natural Resources Engineering Advances in Biomedical Engineering. 2011. Vol. 3–5. Pp. 261–265.
5. Misra A.K., Mathur R. Magnesium oxychloride cement concrete // Bulletin of Materials Science. 2007. Vol. 30. Issue 3. Pp. 239–246. DOI: 10.1007/s12034-007-0043-4
6. Chernykh T. Energy-saving magnesium oxychloride cement intensifier // SGEM International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts. 2015. Vol. 1. Pp. 359–363.
7. Орлов А.А., Черных Т.Н., Крамар Л.Я. Стекломагнезиальные листы: проблемы производства, применения и перспективы развития // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 48–52.
8. Мирюк О.А. Перспективы использования отходов в технологии магнезиальных строительных материалов // Наука и Мир. 2014. Т. 1. № 11 (15). С. 41–44.
9. Прокофьева В.В. Декоративно-технические свойства строительных материалов на основе магнезиального сырья // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 2 (31). С. 169–173.
10. Karimi Y., Monshi A. Effect of magnesium chloride concentrations on the properties of magnesium oxychloride cement for nano SiC composite purposes // Ceramics International. 2011. Vol. 37. Issue 7. Pp. 2405–2410. DOI: 10.1016/j.ceramint.2011.05.082
11. Wang S., Weng R., Zhu Y., Li X. Effects of EVA Latex on the Properties of Glassfiber/Magnesium-oxychloride Cement Composites // Journal of Wuhan University of Technology, Materials Science Edition. 2006. Vol. 21. Issue 1. Pp. 138–142. DOI: 10.1007/BF02861492
12. Garda-Trinanes P., Morgeneyer M., Casares J., Bao M. Use of organic byproducts as binders in the roll compaction of caustic magnesia // Powder Technology. 2012. Vol. 226. Pp. 173–179. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.04.039
13. Плеханова Т.А. Магнезиальные композиционные материалы, модифицированные сульфатными добавками : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2005. 22 с.
14. Li G., Yu H. Influence of fly ash and silica fume on water-resistant property of magnesium oxychloride cement // Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2010. Vol. 25. Issue 4. Pp. 721–724. DOI: 10.1007/s11595-010-0079-y
15. Nahdi K., Ayadi M., Rouquerol F. Mg(OH)₂ dehydroxylation: a kinetic study by controlled rate thermal analysis (CRTA) // Solid State Sciences. 2009. Vol. 11. Issue 5. Pp. 1028–1034. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2009.02.013
16. Li J., Li G., Yu Y. The influence of compound additive on magnesium oxychloride cement/urban refuse floor tile // Construction and Building Materials. 2008. Vol. 22. Issue 4. Pp. 521–525. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.11.010
17. Li Y., Yu H., Zheng L., Wen J., Wu C., Tan Y. Compressive strength of fly ash magnesium oxychloride cement containing granite wastes // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 38. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.016

18. Kandeel A.M., El-Mahllawy M.S., Hassan H.A., Sufe W.H., Zeedan S.R. Effect of type of mixing water and sand on the physico-mechanical properties of magnesia cement masonry units // HBRC Journal. 2012. Vol. 8. Issue 1. Pp. 8–13. DOI: 10.1016/j.hbrcj.2012.08.002

19. Лотов В.А., Митина Н.А. Получение водостойкого магнезиального вяжущего // Техника и технология силикатов. 2010. Т. 17. № 3. С. 19–22.

20. Каклюгин А.В., Ступень Н.С., Касторных Л.И., Коваленко В.В. Зависимость водостойкости прессованных материалов на основе воз-

душных вяжущих веществ от величины открытой пористости // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. № 1 (32). С. 68–75. DOI: 10.21285/2227-2917-2020-1-68-75

21. Kaklyugin A., Stupen N., Kastornykh L., Kovalenko V. Pressed composites based on gypsum and magnesia binders modified with secondary resources // Materials Science Forum. 2020. Vol. 1011. Pp. 52–58. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1011.52

22. Невский В.А. Усталость и деформативность бетона. М. : Вузовская книга, 2012. 264 с.

Поступила в редакцию 18 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 1 января 2021 г.

Одобрена для публикации 1 февраля 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Нонна Степановна Ступень** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры химии; **Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина (БрГУ имени А.С. Пушкина)**; 224016, г. Брест, б-р Космонавтов, д. 21, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 444566, ORCID: 0000-0002-9468-3062; chemskorp@yandex.ru;

Александр Викторович Каклюгин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162; РИНЦ ID: 335150, Scopus: 5720455855, ORCID: 0000-0003-1808-0208; kaklugin@gmail.com;

Любовь Ивановна Касторных — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162; РИНЦ ID: 339734, ORCID: 0000-0001-8968-2543; likas9@mail.ru;

Виктор Викторович Коваленко — старший преподаватель кафедры химии; **Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина (БрГУ имени А.С. Пушкина)**; 224016, г. Брест, б-р Космонавтов, д. 21, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 444566, ORCID: 0000-0002-9468-3062; kvv0407@rambler.ru.

REFERENCES

1. Vaivad A.Ya. *Magnesia binders*. Riga, Zinatne, 1971; 331. (rus.).
2. Berdov G.I., Zyryanova V.N., Ilyina L.V., Nikonenko N.I., Sukharenko V.A. Interfacial interaction and mechanical strength of the composite binding materials. Part 1. Magnesium binders. *Technics and Technology of Silicates*. 2014; 21(3):8-14. (rus.).
3. Mitina N.A., Lotov V.A., Kabanova V.V., Sukhushina A.V. Features of hydration of the magnesia cement. *Fundamental Research*. 2013; 8-3:676-680. (rus.).
4. Chen H. Preparation and performance of magnesia cement plate modified by some modifiers. *International Conference on Agricultural and Natural Resources Engineering Advances in Biomedical Engineering*. 2011; 3-5:261-265.
5. Misra A.K., Mathur R. Magnesium oxychloride cement concrete. *Bulletin of Materials Science*. 2007; 30(3):239-246. DOI: 10.1007/s12034-007-0043-4
6. Chernykh T. Energy-saving magnesium oxychloride cement intensifier. *SGEM International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts*. 2015; 1:359-363.
7. Orlov A.A., Chernykh T.N., Kramar L.Ya. Glass-magnesia sheets: problems of production, application and development prospects. *Construction Materials*. 2014; 3:48-52. (rus.).
8. Miryuk O.A. Prospects of wastes use in the technologies of magnesian construction materials. *Science and World*. 2014; 1:11(15):41-44. (rus.).
9. Prokof'yeva V.V. Decorative-technical properties of building materials on the basis of magnesium raw materials. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 2:169-173. (rus.).
10. Karimi Y., Monshi A. Effect of magnesium chloride concentrations on the properties of magnesium oxychloride cement for nano SiC composite purposes. *Ceramics International*. 2011; 37(7):2405-2410. DOI: 10.1016/j.ceramint.2011.05.082
11. Wang S., Weng R., Zhu Y., Li X. Effects of EVA Latex on the properties of glassfiber/magnesium oxychloride cement composites. *Journal of Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. 2006; 21(1):138-142. DOI: 10.1007/BF02861492
12. Garda-Trinanes P., Morgenyey M., Casares J., Bao M. Use of organic byproducts as binders in the roll

compaction of caustic magnesia. *Powder Technology*. 2012; 226:173-179. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.04.039

13. Plexanova T.A. *Magnesia composite materials modified with sulfate additives: dissertation abstract of candidate of technical sciences*. Kazan, 2005; 22. (rus.).

14. Li G., Yu H. Influence of fly ash and silica fume on water-resistant property of magnesium oxychloride cement. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2010; 25(4):721-724. DOI: 10.1007/s11595-010-0079-y

15. Nahdi K., Ayadi M., Rouquerol F. Mg(OH)₂ dehydroxylation: a kinetic study by controlled rate thermal analysis (CRTA). *Solid State Sciences*. 2009; 11(5):1028-1034. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2009.02.013

16. Li J., Li G., Yu Y. The influence of compound additive on magnesium oxychloride cement/urban refuse floor tile. *Construction and Building Materials*. 2008; 22(4):521-525. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.11.010

17. Li Y., Yu H., Zheng L., Wen J., Wu C., Tan Y. Compressive strength of fly ash magnesium oxychloride cement containing granite wastes. *Construction*

and Building Materials. 2013; 38:1-7. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.016

18. Kandeel A.M., El-Mahllawy M.S., Hassan H.A., Sufe W.H., Zeedan S.R. Effect of type of mixing water and sand on the physico-mechanical properties of magnesia cement masonry units. *HBRC Journal*. 2012; 8(1):8-13. DOI: 10.1016/j.hbrj.2012.08.002

19. Lotov V.A., Mitina N.A. Getting a water-resistant magnesia binder. *Technique and technology of silicates*. 2010; 17(3):19-22. (rus.).

20. Kaklyugin A.V., Stupen N.S., Kastornykh L.I., Kovalenko V.V. Dependence of water resistance of moulded materials containing air-setting binders on effective porosity. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2020; 1(32):68-75. DOI: 10.21285/2227-2917-2020-1-68-75 (rus.).

21. Kaklyugin A., Stupen N., Kastornykh L., Kovalenko V. Pressed composites based on gypsum and magnesia binders modified with secondary resources. *Materials Science Forum*. 2020; 1011:52-58. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1011.52

22. Nevsky V.A. *Fatigue and deformability of concrete*. Moscow, University book, 2012; 264. (rus.).

Received December 18, 2020

Adopted in revised form on January 1, 2021.

Approved for publication on February 1, 2021.

BIONOTES: **Nonna S. Stupen** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry; **Brest State A.S. Pushkin University (BrSU)**; 21 Kosmonavtov blvd., Brest, 224016, Republic of Belarus; ID RISC: 444566, ORCID: 0000-0002-9468-3062; chemskorp@yandex.ru;

Alexandr V. Kaklyugin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials; **Don State Technical University (DSTU)**; 162 Sotsialisticheskaya st., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation; ID RISC: 335150, Scopus: 5720455855, ORCID: 0000-0003-1808-0208; kaklugin@gmail.com;

Luybov I. Kastornykh — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry; **Don State Technical University (DSTU)**; 162 Sotsialisticheskaya st., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation; ID RISC: 339734, ORCID: 0000-0001-8968-2543; likas9@mail.ru;

Viktor V. Kovalenko — Senior lecturer of the Department of Chemistry; **Brest State A.S. Pushkin University (BrSU)**; 21 Kosmonavtov blvd., Brest, 224016, Republic of Belarus; ID RISC: 444566, ORCID: 0000-0002-9468-3062; kvv0407@rambler.ru.

Строительство зданий из вторичного сырья с учетом требований экологических стандартов

Е.А. Сухинина

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
(СГТУ имени Гагарина Ю.А.); г. Саратов, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается проблема нерационального обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) и отходами производства и потребления в России, возможность строительства зданий из вторичного сырья. Объектом исследования являются экологические нормативы, экологические системы сертификации в строительстве и материалы из вторичного сырья. Предмет изучения — возможность строительства зданий с использованием материалов на основе вторичного сырья с учетом требований экологических стандартов.

Материалы и методы. Приводятся типы вторичного сырья и обзор подходов строительства зданий из материалов на основе вторичного сырья в России и за рубежом. Описываются наиболее распространенные технологии строительства домов из вторичного сырья. В качестве примера показан экосертифицированный объект в России с использованием подобных материалов.

Результаты. Анализируется состояние российской законодательной базы по обращению с ТКО и отходами производства и потребления, требования международных и российских экологических стандартов для зданий. Определяется процентное соотношение мероприятий по обращению с отходами относительно других требований в системах экологической сертификации для объектов недвижимости.

Выводы. Предложена новая классификация строительных материалов на основе вторичного сырья. Сделаны выводы о возможности повторного применения ТКО и отходов производства и потребления в строительной индустрии. Выявлена необходимость доработки экологических нормативов в России. В российских экологических стандартах следует увеличить количество критериев относительно рационального обращения с ТКО и отходами производства и потребления, использования материалов на основе вторичного сырья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экологический стандарт, система экологической сертификации, экологические нормативы, экологические требования, «зеленое» строительство, экологическая устойчивость, переработка, материалы на основе вторичного сырья, твердые коммунальные отходы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сухинина Е.А. Строительство зданий из вторичного сырья с учетом требований экологических стандартов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 186–201. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.186-201

Using secondary raw materials in construction of buildings with account taken of environmental standards

Elena A. Sukhinina

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU); Saratov, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article addresses the problem of irrational treatment of solid municipal, production and consumption waste in Russia, as well as the prospects of using secondary raw materials in the construction of buildings. The research is focused on environmental standards, environmental certification systems in the construction industry, as well as recycled materials. The study encompasses the construction of buildings using recycled materials, taking into account the requirements set in environmental standards.

Materials and methods. The article presents several types of secondary raw materials and an overview of sustainable approaches to the construction of buildings using recycled materials in Russia and abroad. Most widely spread construction technologies, used to build houses using secondary raw materials, are described. An environmentally friendly facility constructed in Russia using secondary raw materials is described as an illustration.

Results. The state of the Russian legislative framework governing the treatment of solid municipal, construction, and consumption waste and the requirements of international and Russian environmental standards applicable to buildings are analyzed. The percent ratio of waste management actions is determined in relation to other requirements set by environmental certification systems applicable to real estate items.

Conclusions. A new classification of construction products made of secondary raw materials is presented. Conclusions are made about the feasibility of reusing solid household, industrial and consumption waste in the construction industry. The need to revise environmental standards in Russia is identified. The Russian environmental standards should have a larger number of criteria determining the rational treatment of solid municipal, construction, and consumption waste as well as the use of products made of secondary raw materials.

KEYWORDS: environmental standard, environmental certification system, environmental regulations, ecological requirements, green construction, environmental sustainability, recycling, substances made of secondary raw materials, solid municipal waste

FOR CITATION: Sukhinina E.A. Using secondary raw materials in construction of buildings with account taken of environmental standards. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(2):186-201. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.186-201 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно в мире образуется более 2,1 млрд т отходов, примерно 30–40 % из них не перерабатываются экологически безопасным способом [1]. Твердые коммунальные отходы (ТКО), отходы производства и потребления — одна из основных экологических проблем, которая несет в себе потенциальную опасность для здоровья людей и природы [2].

К примеру, в России большинство ТКО, отходов производства и потребления вывозят на полигоны за городом, при этом окурочек от сигареты разлагается 25 лет, а пластиковая бутылка более 100 лет, для города неизбежен эффект «бумеранга», так как вредные вещества при разложении в почве неизбежно попадают в грунтовые воды и реки. Каждый год россияне выбрасывают 70 млн т ТКО (перерабатывается только 4 %), через 10 лет площадь свалок увеличится в два раза. По данным Минприроды РФ, площадь несанкционированных свалок составляет 20 тыс. га¹.

Единственным решением уменьшения площади городских полигонов для захоронения ТКО и отходов производства и потребления может стать их переработка с предварительным разделением по типам для возможного вторичного применения, например, из одной автомобильной шины можно получить 1 м² покрытия детской площадки.

В развитых странах действует политика по переработке и вторичному использованию отходов, в Германии — 60 % ТКО подлежит переработке, в некоторых городах Японии перерабатывается до 80 % отходов. Развитые зарубежные страны стараются перейти на «безотходные технологии» и экономику замкнутого цикла [3–7]. Гонконг генерирует около 1,3 млн т отходов от демонтажа зданий в год, Китай — более двух млрд т в год, что составляет около 40 % от общего объема ТКО, скорость рекуперации таких отходов составляет около 55 % [8]. Переработка некоторых видов отходов позволяет получать энергию электростанциям, такая электростанция по переработке отходов работает в Италии [9].

Возведение объектов из привычных материалов и традиционным способом негативно сказывается на состоянии окружающей среды [10]. Для производства строительных материалов (бетона, ар-

матуры, стекла, пластика и прочее) работают заводы, выделяя вредные выбросы и CO₂, применение деревянных стройматериалов приводит к уменьшению деревьев и лесов.

Во многих российских городах большое количество ветхих зданий, просуществовавших многие годы, подлежат сносу. Длительное время такие объекты ликвидировались с помощью взрывов, после чего экскаватор вывозил строительные отходы² (бетон, стекло, металл) специальными насадками на лицензированные полигоны для обработки, дальнейшего размещения и обезвреживания особо вредных составляющих, так как разложение вредных веществ, входящих в состав многих строительных материалов (свинца, асбеста и др.), сильно влияет на экологию.

Для минимизации строительных отходов и повторного их использования в производстве необходима сортировка отходов производства и потребления по типу материала [11]. Существуют различные способы демонтажа здания: ручной, с привлечением спецтехники и комбинированный. Выбор способа демонтажа может значительно упростить процесс сортировки строительных отходов.

В России имеется дефицит предприятий, занимающихся переработкой отходов производства и потребления, есть, например, площадка для переработки отходов в Москве, фирма «Сатори» производит рециклинг строительных отходов, их повторное промышленное потребление, но таких компаний в нашей стране недостаточно³. Необходимо развивать эту производственную отрасль и строить большее количество мусороперерабатывающих заводов по всей стране.

Следуя примеру зарубежных стран, некоторые виды ТКО, отходов производства и потребления можно рассматривать, как вторичное сырье для строительства [12]. Применение строительных элементов (блоков, бетона, арматуры), автомобильных покрышек, стеклянных и пластиковых емкостей — рациональный и экологичный подход [13]. При этом можно значительно сократить объемы производства нового сырья, энергию и уменьшить масштабы отходов [14], что является одной из главных целей «зеленого» строительства.

² Строительные отходы — это отходы, образующиеся в результате демонтажа конструкций, капитального ремонта здания, при его сносе или возведении нового объекта недвижимости.

³ Сатори. URL: <https://satori.ru/>

¹ Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: <https://www.mnr.gov.ru/>

«Зеленое» строительство — это современная практика строительства, направленная на уменьшение использования энергетических и материальных ресурсов в течение всего периода существования объекта недвижимости (строительство, эксплуатация, утилизация) и стремление создать условия повышенного качества для комфорта обитателей внутри здания. На текущий момент «зеленое» строительство структурируется экологическими стандартами, способствующими ускоренному переходу от традиционного проектирования зданий к устойчивому⁴.

Экологический стандарт — набор критериев и требований, обеспечивающих полный комплексный анализ всех систем здания с позиций: расположения, водоэффективности, энергосбережения, экологичности материалов, благоприятного микроклимата, здоровья и социального благополучия путем начисления баллов и присуждения соответствующего сертификата строению. Это — свод правил, по которым должно проектироваться и строиться здание, претендующее на звание экологического⁵. Экологические стандарты опираются на экологические нормативы.

Экологические нормативы — правовые законодательные акты, закрепляющие общественные отношения в сфере взаимодействия общества и природы, устанавливающие право граждан на благоприятную окружающую среду. Экологические нормативы также регулируют влияние зданий на самочувствие человека, природу и рациональное потребление природных ресурсов.

Объекты исследования: 1) виды и характеристики материалов повторного применения на основе вторичного сырья для строительства; 2) экологические нормативы по обращению с отходами; 3) экологические стандарты (системы экологической сертификации) в строительстве.

Предмет изучения — качественная оценка возможности строительства зданий из вторичного сырья с учетом требований систем экологической сертификации для зданий.

Цель исследования — анализ возможности строительства зданий из материалов на основе вторичного сырья с учетом требований экологических стандартов в строительстве.

В рамках данной темы определены следующие задачи:

- оценить возможность строительства зданий и сооружений из материалов повторного применения на основе вторичного сырья;
- предложить классификацию материалов на основе вторичного сырья;

⁴ «Зеленое» строительство. URL: <http://ecorussia.info/ru>

⁵ Сухина Е.А. Основные положения и сравнение международных экологических стандартов в строительной сфере // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. Т. 4. № 1 (73). С. 209–215.

- проанализировать российские экологические нормативы по обращению с отходами и требования экологических стандартов в строительстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучением вопросов экологического строительства зданий, производства материалов на основе вторичного сырья занимались российские и зарубежные исследователи: Р.А. Дяркин, И.А. Прошин, А.А. Горячева, Г.В. Ильиных, О.Е. Колчина, Г.Г. Лунев, В.В. Макаров, О.А. Максимова, К.Ю. Михайличенко, А.И. Курбатова, А.Ю. Коршунова, А.В. Климакина, М.С. Сайдумов, С.О. Jason Maximino, В. John, С. Kristin, S. Christian, J.Yu. Julienne и др.

В рассмотренных работах не определена связь между применением вторичного сырья для строительства и системами экологической сертификации объектов недвижимости. По мнению автора, в российских экологических стандартах следует увеличить ряд требований относительно обязательного использования материалов на основе вторичного сырья при экологически устойчивом проектировании и строительстве с целью снижения негативного влияния на природу и экологию.

В статье проанализированы существующие материалы из вторичного сырья, экологические нормативы по обращению с отходами и экологические стандарты в строительстве.

Требования экологических нормативов и стандартов в первую очередь направлены на создание здоровых условий внутри здания и на прилегающей территории, снижение вредных воздействий на природу в результате строительной деятельности и эксплуатации.

В России принят ряд документов, относительно обращения с отходами^{6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24}, значительная часть экологических

⁶ О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения : Федеральный закон от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ (ст. 22).

⁷ Об охране окружающей среды : Федеральный закон от 10.01.2002 г. (ред. от 30.12.2020 г.) № 7-ФЗ (ст. 51).

⁸ Об отходах производства и потребления : Федеральный закон от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ (ст. 11–13).

⁹ О порядке ведения государственного кадастра отходов и проведения паспортизации опасных отходов : Постановление Правительства Российской Федерации от 26.10.2000 г. № 818.

¹⁰ Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов : Приказ Минприроды России от 02.12.2002 г. № 786.

¹¹ СанПиН 2.1.7-95. Правила очистки населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почв. Порядок хранения, транспортировки, захоронения и утилизации (токсичных) промышленных отходов.

¹² СП 2.1.7.1386-03. Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления.

нормативов посвящена регулированию вредных выбросов в производственной сфере, меньше документов по рациональному обращению с ТКО и отходами производства и потребления.

Особенно важным становится применение экологических стандартов в строительстве, подкрепленных экологическими законодательными актами страны-разработчика документа.

После укрепления на мировом строительном рынке трех базовых систем экологической сертификации в развитых государствах стали разрабатываться национальные или адаптироваться международные экологические стандарты BREEAM (Великобритания, 1990 г.), LEED (США, 1998 г.), DGNB (Германия, 2010 г.).

В нашей стране с 2008 г. Советом по экологическому строительству RuGBC адаптированы стандарты BREEAM и LEED²⁵, в 2010 г. Советом по «зе-

¹³ ГОСТ Р 51769-2001. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Документирование и регулирование деятельности по обращению с отходами производства и потребления. Основные положения.

¹⁴ ГОСТ 30775-2001. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов. Основные положения.

¹⁵ ГОСТ Р 53691-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Паспорт отхода I–IV класса опасности. Основные требования.

¹⁶ ГОСТ Р 53692-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов.

¹⁷ ГОСТ Р 53791-2010. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения.

¹⁸ ГОСТ Р 54099-2010. Ресурсосбережение. Вторичные материальные ресурсы. Основная номенклатура вторичного сырья.

¹⁹ ГОСТ Р 54964-2012. Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости.

²⁰ ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению.

²¹ ГОСТ Р 57742-2017. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Требования безопасности при обращении с опасными твердыми коммунальными отходами при их сборе.

²² ГОСТ Р 56828.40-2018. Наилучшие доступные технологии. Размещение отходов. Термины и определения.

²³ ГОСТ Р 113.15.01-2019. Наилучшие доступные технологии. Рекомендации по обработке, утилизации и обезвреживанию органических отходов сельскохозяйственного производства.

²⁴ ПНСТ 352-2019. «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Оценка соответствия требованиям «зеленых» стандартов. Общие положения.

²⁵ RuGBC. Совет по экологическому строительству в России. URL: <https://www.rugbc.org/>

леному» строительству САР-СПЗС адаптирован немецкий экостандарт DGNB²⁶.

К 2021 году разработаны национальные российские экостандарты: Корпоративный олимпийский зеленый стандарт; «Зеленые стандарты», НП-СПЗС 1.1.М-2011 «Малоэтажное строительство»; САР-СПЗС «Административные здания; СТО-НОСТРОЙ 2.35.4-2011; ГОСТ Р 54964-2012; СДС «РУСО. Футбольные стадионы»; Eco Village; GREEN ZOOM; ПНСТ 352-2019 «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Оценка соответствия требованиям «зеленых» стандартов. Общие положения» и другие документы.

Системы экологической сертификации для зданий регулируют многие аспекты проектирования и функционирования — снижение эксплуатационных затрат на энерго- и водопотребление, сохранение трудно возобновляемых природных ресурсов, уменьшение выбросов CO₂ в атмосферу, выбор безопасных материалов, рациональное обращение с ТКО и отходами производства и потребления, возможное строительство из материалов на основе вторичного сырья.

Вторичное сырье — это изделия и материалы, которые после длительного использования и износа применяются повторно без преобразования или после производственной обработки сырья.

Выделяют следующие типы вторичного сырья: макулатура (бумага, картон, газеты, текстиль, TetraPak); стекло (стеклотара, стеклобой); металлолом (черный, цветной, драгоценный); химикаты (кислоты, щелочи, органика); нефтепродукты (масла, битум, асфальт); электроника (изделия, платы, аккумуляторы, ртутные лампы, провода); пластмассы (ПЭТ, ПВХ, ПВД, АБС, ПС, ПНД); резина (шины, резина); биологические (пищевые отходы, жиры, ассенизация); древесина (сучья, стружка, листья); строительные элементы (кирпич, бетон, арматура); сточные воды (рис. 1).

При использовании для строительства нескольких видов отходов и вторсырья стоимость построек может быть существенно снижена. При тщательно продуманном дизайне возможно обойтись без внутренней отделки стен, достаточно аккуратно разобрать старые строения и дать изделию «вторую жизнь» [15].

Номенклатура вторичного сырья, установленная ГОСТ Р 54099-2010, выглядит таким образом: вторичное древесное сырье, вторичное пищевое сырье, вторичное полимерное сырье, вторичное строительное сырье, вторичное текстильное сырье, макулатура²⁷.

²⁶ СПЗС. Совет по «зеленому» строительству. URL: <http://rsabc.ru/>

²⁷ ГОСТ Р 54099-2010. Ресурсосбережение. Вторичные материальные ресурсы. Номенклатура вторичного сырья.



Рис. 1. Дома и сооружения из вторичного сырья

Fig. 1. Buildings and structures made of recycled materials

Строительные материалы на основе вторичного сырья можно классифицировать по следующим категориям:

1. Не перерабатываемое мелкогабаритное вторичное сырье.

Возможным строительным материалом могут стать автомобильные покрышки, известны примеры их использования для фундаментов и стен. Каждую из шин при этом заполняют землей, укладывают друг на друга в шахматном порядке, а пространство между ними плотно заполняют смесью из воды, цемента и земли [16].

Стены снаружи и изнутри покрывают цементным раствором, что значительно улучшает их изоляционные свойства — накапливается тепло в течение дня, постепенно отдается внутрь помещения в ночное время суток.

Распространенным сырьем для строительства без дополнительной переработки являются пластиковые и стеклянные емкости²⁸. Прозрачные бутылки улучшают освещенность помещений, позволяя экономить энергию, а воздушная прослойка внутри них служит хорошим теплоизолятором, благодаря

чему комфортная температура достигается с меньшими затратами [17–19].

Заполненные сыпучим материалом (песком или грунтом) пустые бутылки становятся эффективным «кладочным элементом». Процесс возведения стеновых конструкций предусматривает установку опорных столбов (из кирпича, дерева, металла) толщиной, равной высоте используемых бутылок. Для герметизации отверстий используется цементно-песчаный раствор²⁹.

2. Перерабатываемое вторичное сырье.

Переработанные материалы являются наиболее распространенным типом изделий. К одному из вариантов переработанного сырья можно отнести термополикамень, сделанный из измельченных в крошку проводов, микросхем, телевизоров, маг-

²⁸ Первый дом из 30 тыс. бутылок был построен в Неваде в начале XX в.

²⁹ Как пример можно привести «мусорный» отель, построенный в Мадриде как часть проекта «Спаси пляж». Группе энтузиастов удалось возвести двухэтажное здание из деревянного каркаса, а внутреннюю и внешнюю отделку отеля выполнить из разнообразных ТКО, найденных на пляже и в океане. Отель стал хорошим способом привлечь внимание общественности к важным экологическим проблемам и показать, что отбросы — зеркало того, во что может превратиться жизнь людей при халатном отношении к отходам.

нитофонов и телефонов. Материал — водостойкий и не поддается гниению, не обладает специфическим запахом. Для безопасности здоровья при производстве строительных блоков применяется только нетоксичное вторичное сырье³⁰.

В европейских компаниях практикуется использование золы после сжигания остатков продукции деревообработки для строительства дорог и удобрения лесов³¹.

В России развито производство шлакопортландцемента и заполнителей, крупных и мелких, на основе шлаков. Добавление шлака в цементный клинкер и производство заполнителей на шлаках обеспечивает повышенную прочность, снижает вес, уменьшает давление на грунт, повышает теплофизические характеристики и пожаростойкость. Наиболее существенно то, что на 20–30 % снижается стоимость конструкций, т.е. каждый шестой дом строится бесплатно. Шлака в шлакопортландцементе может быть до 50 %, и добавлять его в цемент можно на домостроительных комбинатах. При этом не потребуется открывать новые карьеры по изъятию известняка, глины для цемента, гравия и щебня как заполнителей для бетона, поскольку в настоящее время в России цемент делается практически из чистого клинкера. Есть практика изготовления керамзита из шлама очистных сооружений.

Зарубежными учеными много лет проводятся опыты о влиянии различных типов и количества дополнительных вяжущих материалов и заполнителя из переработанного бетона на повышение прочности и долговечности материала. Сырье может включать опасные отходы, легучую золу, формовочный песок и не перерабатываемые стеклянные бутылки [20]. Исследователями рассматриваются различные бетонные смеси, которые могут быть использованы при экологичном строительстве зданий [21].

Уже сегодня российские компании из полимерных отходов (полиэтилена, поливинилхлорида, полистирола, полипропилена) производят следующие виды изделий: тротуарную, тактильную, облицовочную плитку; ограничители парковки, дорожные столбики; стеновой и бордюрный камень; газонные, дренажные георешетки; крышки люков, кольца колодцев, водоотводные лотки; стеновые бло-

ки; перегородочные плиты; матричные композиты с полимерными включениями (полистиролбетон, гипсополистиролбетон, гипсопенопластбетон); измельченные полимерные отходы применяются для бетона повышенной ударной прочности, бетонов повышенной коррозионной стойкости; полимерные композиты на основе отходов полистирола (PS) (органорастворимые лакокрасочные материалы, прессованные полимерные композиты на основе отходов PS, теплоизоляционные полимерные композиты на основе растворов полистирола) и т.п.

3. Прессованное вторичное сырье.

В качестве прессованных отходов возможно использовать бумагу, солому и другое растительное сырье [22]. При строительстве деревянный каркас обкладывается по всему периметру блоками, являющимися основой для стен и эффективным утеплителем. При возведении стен из соломенных блоков для повышения их прочности и огнестойкости на поверхность блоков внутри и снаружи наносится три слоя штукатурки.

Низкая стоимость, небольшие трудовые затраты, легкость стеновых конструкций, не требующих мощного фундамента, — основные преимущества данного вида строительства³².

4. Не перерабатываемое крупногабаритное вторичное сырье.

К крупногабаритным отходам относят некоторые виды строительных элементов (блоки, камни), сборные строительные элементы (трубы, балки), серийные изделия (панели, фермы и т.п.)³³.

Возможным материалом для строительства могут стать использованные транспортные контейнеры, обладающие прочностью и устойчивостью к воздействию агрессивной среды. Для уменьшения нагрева и улучшения теплоизоляции металлических элементов следует применять дополнительную изоляцию.

³² Необычным сырьем для строительства можно считать спрессованные измельченные купюры. Ирландец Фрэнк Бакли взял в Центральном банке измельченные купюры номиналом в 1,4 млрд евро, предназначенные для утилизации, и построил из этого сырья дом. В доме не только стены, но и полы сделаны из прессованных купюр. Сам мужчина уверяет, что жильё получилось необычайно теплым, кроме того, такой вид строительного материала имеет хорошие изоляционные свойства. Помимо экологических и экономических преимуществ, этот дом — целый философский трактат о том, что такое деньги и что на самом деле важно для человека.

³³ В парке Rodlpark в Австрии из труб возведен отель, который сразу же стал популярным среди туристов. Однако это сооружение имеет ряд недостатков: оно не отапливается и не вмещает ничего, кроме кровати.

Необычный фасад получился из утилизированных бетонных труб в пабе г. Мельбурн. Вторичные элементы прикреплены один к другому, образуя четырехэтажное здание.

³⁰ Архитекторы компании Lendager Group используют для воплощения своих проектов отходы, собранные с различных производств, а также оставшиеся после сноса зданий. Одна из их последних работ — пять блокированных прямоугольных зданий, конструкция которых выполнена из древесных отходов и старого кирпича. Стены и перегородки возведены из древесины повторного использования, каркас дома и стропила изготовлены из переработанного дерева, оставшегося после сноса зданий. Кирпич, которым выложен пол в некоторых частях коттеджа, нашли при демонтаже других строений.

³¹ Финская компания UPM Biofore — Beyond fossils.

Для строительства также используют вышедшие из строя силосы из оцинкованной стали (бункеры для хранения) с плоским или аэрационным дном с обязательным устройством внутренней вентиляции. Высота 9 м позволяет использовать их в качестве двух- или трехэтажного жилья [23].

Выделим возможные *технологии строительства из вторичного сырья*:

- кладка из блоков, камней и других элементов, уложенных в определенном порядке и связанных строительным раствором (покрышки, бутылки, прессованные блоки, камни и кирпич повторного использования);
- каркасное строительство из дерева или металла с наполнителем стен блоками из переработанных вторичных элементов или прессованных отходов;
- модульное строительство с использованием крупногабаритных отходов (к примеру, железобетонных труб), транспортных контейнеров, бункеров для хранения, корпусов самолетов.

Для сооружений из отходов наиболее экономичным и экологичным способом является строительство с применением бутылок и крышек в качестве кладочных блоков. Этот способ возведения зданий имеет ряд преимуществ: ускоряет процесс строительства; не подразумевает использование дополнительных опор, помогая значительно снизить применение традиционного сырья; данная технология обеспечивает теплоизоляцию и теплоемкость,

что способствует снижению расходов на отопление здания [23].

Сегодня широкий выбор материалов повторного применения на основе вторичного сырья дает возможность удешевить строительство и уменьшить негативное влияние на окружающую среду [24–30].

В России в качестве примера проекта жилого дома с использованием вторичного сырья, сертифицированного по американскому стандарту LEED и системе добровольной сертификации «Зеленые стандарты», можно привести «Дом Надежды» в Тульском регионе. Проект энергоэффективного жилого дома на 17 квартир в рамках модернизации ветхого фонда ЖКХ — тиражируемый проект для регионов, проект государственно-частного партнерства (рис. 2).

В «Доме Надежды» применен целый ряд уникальных технологических решений: более десяти нанотехнологий; энергоэффективные материалы; светодиодное освещение; солнечные коллекторы; воздушные тепловые насосы; поквартирная рекуперация тепла; вентиляция с помощью мобильных установок УВРК-50; теплые полы Rehau; фасадные материалы из фиброцемента Eternit; аквапанели Knauf³⁴. Для строительства здания использовались

³⁴ Российский рынок экологического строительства // RuGBC News. Ноябрь. 2013. № 2. 44 с.



Рис. 2. «Дом Надежды» в Тульской области

Fig. 2. The House of Hope in the Tula Region

четыре вида экологических изоляционных материалов: эковата (ecowool), изготовленная из бумаги вторичной переработки (изоляция помещений в верхней части здания); изоляция для защиты (Shelter) — материал изготавливается из пластиковых бутылок (изоляционный материал для заполнения пустот в стенах); пеностекло (foamcrete) для фундаментов здания (изготавливается из стекла вторичной переработки); пенобетон.

Прочностные характеристики экологически сертифицированного здания, показатели по энергоэффективности и комфортности жилой среды полностью удовлетворяют современным требованиям экологических нормативов и экологических стандартов в строительстве, в частности американского LEED и российской системы добровольной сертификации «Зеленые стандарты».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важность вопроса по рациональному обращению с ТКО и отходами производства и потребления создает необходимость проанализировать российские экологические нормативы по обращению с отходами и требования экологических стандартов в строительстве.

Для выявления процентного количества нормативов в России по обращению с отходами предложено деление российской законодательной базы в области экологии и энергосбережения в соответствии с основными аспектами, рассматриваемыми в экологических стандартах, — это прилегающая территория, охрана природы, водоэффективность, энергосбережение, материалы, отходы, здоровье и социальное благополучие [31]. Данные разделы экологической оценки определены в научном исследовании как наиболее часто используемые при экосертификации объектов недвижимости в России и зарубежных странах (табл. 1).

При анализе законодательной российской базы по экологическому проектированию количество документов по рациональному обращению с отходами в строительстве относительно других законодательных актов составляет всего лишь 5,1 % [31].

Определено, что в международных и российских экологических стандартах рассматриваются вопросы хранения и сбора вторсырья, сортировки и переработки отходов, утилизации строительных отходов, использования материалов с переработанной составляющей, повторного применения элементов здания. Рассмотрим требования некоторых из систем сертификации подробнее (табл. 2).

Табл. 1. Анализ законодательной базы Российской Федерации по экологическому проектированию

Table 1. The analysis of the Russian Federation legal framework governing environmental design

Основные разделы экологических стандартов Principal sections of environmental standards	Форма документов Legal form of regulatory acts	Период введения, годы Effective term, years	Количество документов, % Number of documents, %
1. Прилегающая территория Adjacent territory	Закон РФ, ФЗ, Приказ, Указ, Постановление, СНиП, СанПиН, ГОСТ,	1976–2020	14,5
2. Охрана природы Nature protection	ГОСТ Р ИСО, СП, П, ВСН, Р, ЭПП, ГН, МУ	1977–2020	10,9
3. Водоэффективность Water efficiency	Law of the Russian Federation, Federal Law, order, decree, resolution, building regulations, sanitary and epidemiological rules and regulations, state standard,	1983–2018	9,7
4. Энергосбережение Energy saving	state standard of Russia ISO, construction rules, industry-specific code of construction practice, hygienic standards, methodological guidelines	1979–2017	33,9
5. Материалы Materials		1977–2020	4,5
6. Отходы Waste		1998–2019	5,1
7. Здоровье и социальное благополучие Health and social well-being		1977–2020	21,4

Примечание: таблица составлена автором на основе исследования экологических нормативов в Российской Федерации
Note: the table was compiled by the author on the basis of the research on environmental standards in the Russian Federation

Табл. 2. Требования международных и российских экологических стандартов по обращению с отходами
Table 2. Requirements of international and Russian environmental standards applying to waste management

Название экологического стандарта Environmental standard title	Раздел и требование системы Section and system requirement
Международные экологические стандарты <i>International environmental standards</i>	
BREEAM Международное Новое Строительство — 2016, Великобритания BREEAM International New Construction — 2016, Great Britain	<p>Раздел «Отходы»:</p> <ul style="list-style-type: none"> • управление отходами производства и потребления; • переработанные составляющие; • отходы после эксплуатации; • специальная отделка пола и потолка; • адаптация к изменению климата; • функциональная адаптивность <p>“Waste” section:</p> <ul style="list-style-type: none"> • production and consumption waste management; • recycled ingredients; • post-operational waste; • special finishing of flooring and ceiling; • adaptation to climate change; • functional adaptability
LEED v4 для проектирования и строительства — 2018, США LEED v4 for Building Design and Construction — 2018, USA	<p>Раздел «Материалы и ресурсы»:</p> <ul style="list-style-type: none"> • хранение и сбор вторсырья; • планирование управления отходами при строительстве и сносе; • повторное использование здания — поддержание существующих стен, полов и крыши; • повторное использование здания — поддержание внутренних неструктурных элементов; • управление отходами строительства и сноса <p>“Materials and Resources” section:</p> <ul style="list-style-type: none"> • storage and collection of recyclable materials; • waste management planning during construction and demolition; • building reuse: maintenance of existing walls, floors and roofs; • building reuse: maintenance of internal non-structural elements; • management of construction and demolition waste
DGNB стандарт — 2018, Германия DGNB system — 2018, Germany	<p>Раздел «Техническое качество»:</p> <ul style="list-style-type: none"> • простота демонтажа, утилизация и демонтаж <p>“Technical quality” section:</p> <ul style="list-style-type: none"> • simple dismantling, disposal and dismantling
Российские экологические стандарты <i>Russian environmental standards</i>	
«Зеленые стандарты» — 2017 “Green Standards” — 2017	<p>Раздел «Материалы и ресурсы»:</p> <ul style="list-style-type: none"> • вторичное использование строительных отходов; • использование материалов вторичной переработки на основе отходов потребления и отходов производства. <p>Раздел «Качество и комфорт среды внутри помещений»:</p> <ul style="list-style-type: none"> • обеспечение герметичности мест хранения пищевых продуктов и мест сбора пищевых отходов с последующей переработкой. <p>Раздел «Отходы, выбросы и хранение опасных материалов»:</p> <ul style="list-style-type: none"> • организация отдельного сбора отходов по категориям <p>“Materials and Resources” section:</p> <ul style="list-style-type: none"> • secondary use of construction waste; • use of recycled materials made of consumption and production waste. <p>“Quality and comfort of the indoor environment” section:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ensuring the insulation of food storage areas and food waste collection areas and their subsequent processing. <p>“Waste, removal and storage of hazardous materials” section:</p> <ul style="list-style-type: none"> • organization of separate waste collection broken down by categories

Продолжение табл. 2 / Continuation of Table 2

Название экологического стандарта Environmental standard title	Раздел и требование системы Section and system requirement
САР-СПЗС. Административные здания — 2013 SAR-GBC.Office buildings — 2013	<p>Раздел «Отходы»:</p> <ul style="list-style-type: none"> • организация вывоза отходов; • оборудование площадок для сбора отходов; • управление отходами при строительстве; • управление отходами при эксплуатации <p>“Waste” section:</p> <ul style="list-style-type: none"> • organization of waste removal; • arrangement of waste collection sites; • waste management during construction; • waste management during operation
GREEN ZOOM «Практические рекомендации по снижению энергоемкости и повышению экологичности объектов гражданского и промышленного строительства. Новое строительство» — 2019 GREEN ZOOM “Practical recommendations aimed at energy capacity reduction and rising environmental friendliness of civil and industrial construction facilities. New construction” — 2019	<p>Раздел «Экологически рациональный выбор строительных материалов и управление отходами»:</p> <ul style="list-style-type: none"> • сбор и хранение утилизируемых отходов; • использование материалов с переработанной составляющей; • управление строительными отходами <p>“Sustainable selection of building materials and waste management” section:</p> <ul style="list-style-type: none"> • collection and storage of recyclable waste; • using materials containing recycled elements; • construction waste management
ПНСТ 352-2019 «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Оценка соответствия требованиям «зеленых» стандартов. Общие положения» PNST 352-2019 Green standards. Green technologies of the living environment. Assessment of compliance with the requirements of green standards. General Provisions	<p>Раздел «Отходы среды жизнедеятельности»:</p> <ul style="list-style-type: none"> • разработка на этапе проектирования технологии среды жизнедеятельности плана по управлению отходами; • сокращение потока образования мусора на территории реализации технологии среды жизнедеятельности; • сокращение объема неопасных отходов, направляемых на полигон для захоронения (на территориях реализации и производства), отходов сноса и земляных работ (если применимо), образующихся во время реализации проекта; • увеличение количества переработанных отходов для повторного использования, выраженное в процентах и указанное в соответствии с целевым уровнем; • предоставление подходящего помещения и оборудования для обеспечения раздельного сбора и хранения объемов операционных отходов, подлежащих переработке, образующихся от рассматриваемой технологии среды жизнедеятельности, людей и их операционной деятельности; • выбор определенных видов материалов для технологии среды жизнедеятельности, которые способствуют уменьшению возможных отходов; • исследование и реализация мер по смягчению последствий более экстремальных погодных условий, вызванных изменением климата, в течение всего срока службы технологии среды жизнедеятельности; • рассмотрение и внедрение мероприятий для будущих изменений функционального назначения технологии среды жизнедеятельности и ее систем в течение всего срока службы³⁵ <p>“Waste of the living environment” section:</p> <ul style="list-style-type: none"> • development of a waste management plan at the stage of design of the living environment technology; • reducing the waste generation flow in the territory of the implementation of the technology of the living environment;

³⁵ ПНСТ 352-2019. «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Оценка соответствия требованиям «зеленых» стандартов. Общие положения. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293732/4293732488.pdf>

Название экологического стандарта Environmental standard title	Раздел и требование системы Section and system requirement
PNST 352-2019 Green standards. Green technologies of the living environment. Assessment of compliance with the requirements of green standards. General Provisions	<ul style="list-style-type: none"> reducing the amount of non-hazardous waste delivered to landfills for disposal (in the areas of sale and production), demolition and earthwork waste (if applicable) generated during the project implementation; increasing the amount of recycled waste to be reused, expressed as a percentage and indicated in accordance with the target level; providing suitable premises and equipment to ensure the separate collection and storage of operational waste to be processed, as this waste is generated by the technology discussed here, by people and their day-to-day activities; selecting certain types of materials for the technology of the living environment, which contribute to the reduction of potential waste amounts; research and implementation of measures aimed at the mitigation of effects of harsher weather conditions caused by climate change throughout the life of the environment technology; consideration and implementation of measures aimed at implementing future changes in the functional purpose of the technology of the living environment and its systems during the entire service life³⁵

Из табл. 2 видно, что и зарубежные, и российские системы экологической сертификации в требованиях разделов учитывают мероприятия относительно рационального обращения с ТКО и отходами производства и потребления, поощряется повторное применение элементов и использование материалов с переработанной составляющей.

В процессе исследования в статье применяется математический метод анализа экологических нормативов и требований экологических стандартов в строительстве.

Автором предложен алгоритм анализа экологических стандартов, т.е. выделение в каждом документе процентного содержания критериев по базовым аспектам, учитывающим основы экологического проектирования: экология A_n ; территория B_n ; водоэффективность C_n ; энергосбережение D_n ; материалы E_n ; отходы F_n ; микроклимат G_n .

Для выявления процентного содержания критериев по каждому разделу используется следующая формула:

$$A^n = \frac{100\%}{n} \varepsilon^n, \quad (1)$$

где A^n — число критериев в %, относящихся к определенному аспекту экологичности; n — общее количество требований стандарта; ε^n — емкость стандарта по определенному аспекту.

При сравнительном анализе экологических стандартов: BREEAM, LEED, DGNB, «Зеленые стандарты», CAP-СПЗС, GREEN ZOOM, ПНСТ 352-2019 по предложенному автором алгоритму определена доля требований в процентном соотношении критериев и мероприятий, установленных в системах экологической сертификации для зданий, относительно обращения с отходами (табл. 3).

Табл. 3. Сравнительный анализ международных и российских экологических стандартов по количеству требований относительно обращения с ТКО и отходами производства и потребления

Table 3. Comparative analysis of international and Russian environmental standards in terms of the number of requirements concerning the management of municipal solid waste, production and consumption waste

Название экологического стандарта Environmental standard name	Количество требований в экологическом стандарте относительно обращения с отходами, % The number of requirements in the environmental standard concerning waste management, %
<i>Международные экологические стандарты / International environmental standards</i>	
BREEAM Международное Новое Строительство — 2016, Великобритания BREEAM International New Construction — 2016, Great Britain	10,92
LEED v4 для проектирования и строительства — 2018, США LEED v4 for Building Design and Construction — 2018, USA	6,00

Окончание табл. 3 / End of Table 3

Название экологического стандарта Environmental standard name	Количество требований в экологическом стандарте относительно обращения с отходами, % The number of requirements in the environmental standard concerning waste management, %
DGNB стандарт — 2018, Германия DGNB system — 2018, Germany	2,04
Среднее: Average:	6,32
<i>Российские экологические стандарты / Russian environmental standards</i>	
«Зеленые стандарты» — 2017 «Green Standards» — 2017	2,80
САР-СПЗС. Административные здания — 2013/SAR-GBC Office buildings — 2013	7,15
GREEN ZOOM «Практические рекомендации по снижению энергоемкости и повышению экологичности объектов гражданского и промышленного строительства. Новое строительство» — 2019 GREEN ZOOM “Practical recommendations aimed at the reduction of the energy capacity and increase in the environmental friendliness of civil and industrial buildings. New construction” — 2019	4,26
ПНСТ 352-2019. «Зеленые» стандарты. «Зеленые» технологии среды жизнедеятельности. Оценка соответствия требованиям «зеленых» стандартов. Общие положения» PNST 352-2019. Green standards. Green technologies for the living environment. Assessment of compliance with the requirements of green standards. General provisions	6,50
Среднее: Average:	5,18

При комплексном анализе критериев зарубежных и российских экологических стандартов в процессе научного исследования выявлено, что меньше оценочных категорий по отходам в российских экологических стандартах (5,18 %), чем в зарубежных (6,32 %). Это прежде всего связано с недостаточным количеством действующих российских нормативов в данной области (около 5,1 %, см. табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе научного исследования предложена классификация материалов на основе вторичного сырья по следующим категориям:

- не перерабатываемое мелкогабаритное вторичное сырье;
- перерабатываемое вторичное сырье;
- прессованное вторичное сырье;
- не перерабатываемое крупногабаритное вторичное сырье.

При изучении объектов с использованием вторичного сырья в строительстве можно сделать выводы о том, что дома из переработанных вторичных элементов и крупногабаритного вторичного сырья не требуют больших экономических вложений, а технология их строительства практически не отличается от традиционного возведения зданий.

Определено, что строительство из материалов на основе вторичного сырья имеет ряд преимуществ:

- вторичное использование ТКО и отходов производства и потребления, позволяющее уменьшить количество мусора на городских свалках;
- «вторая жизнь» ТКО и отходов производства и потребления, которая помогает сберечь значительное количество сырья и энергии;
- возможность удешевления строительства для социального жилья;
- значительная экологическая роль в защите и сохранении природных ресурсов.

Сегодня становятся необходимыми доработка экологических нормативов в России и стимулирование экологического строительства на законодательном уровне:

- недостаточно нормативов по рациональному обращению с ТКО и отходами производства и потребления;
- следует увеличить количество нормативных документов по применению экологичных материалов, материалов с переработанной составляющей и материалов из вторичного сырья, что будет проанализировано в дальнейших исследованиях автора.

Увеличение количества экологических нормативов относительно рационального обращения с ТКО и отходами производства и потребления, разделение

их по категориям позволит значительно снизить выделение CO₂ при производстве новых материалов и продлить жизненный цикл существующих изделий.

Требования российских экологических стандартов в строительстве способны повлиять на: отдельный сбор ТКО и отходов производства и потребления с последующей его переработкой и повторным использованием; увеличение повторного применения

конструкций здания и материалов после их демонтажа; борьбу с загрязнением окружающей среды.

Сегодня необходимо в российских экостандартах увеличить количество мероприятий относительно рационального обращения с отходами и использования материалов из вторичного сырья с присуждением соответствующего количества баллов по данным пунктам экооценки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Di Maria F., Beccaloni E., Bonadonna L., Cini C., Confalonieri E., La Rosa G. et al. Minimization of spreading of SARS-CoV-2 via household waste produced by subjects affected by COVID-19 or in quarantine // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 743. P. 140803. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140803
2. Kleszcz J., Maciejko A. Impact of the municipal waste collection system in cities on urban space and the functioning of their inhabitants // *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2020. Vol. 30. Issue 1. Pp. 33–42. DOI: 10.2478/ceer-2020-0003
3. Hernandez D., Fernandez-Puratich H., Cataldo F., Gonzalez J. Particle boards made with *Prunus avium* fruit waste // *Case Studies in Construction Materials*. 2020. Vol. 12. P. e00336. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00336
4. Ongpeng J.M.C., Barra J., Carampatana K., Sebastian C., Yu J.J., Aviso K.B. et al. Strengthening rectangular columns using recycled PET bottle strips // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020. DOI: 10.1016/j.jestch.2020.07.006
5. Marcellus-Zamora K.A., Gallagher P.M., Spatari S. Can public construction and demolition data describe trends in building material recycling? Observations from Philadelphia // *Frontiers in Built Environment*. 2020. Vol. 6. DOI: 10.3389/fbuilt.2020.00131
6. Sondhi S., Kaur P.S., Kaur M. Techno-economic analysis of bioethanol production from microwave pretreated kitchen waste // *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. P. 1558. DOI: 10.1007/s42452-020-03362-1
7. Van Zanten J.A., van Tulder R. Towards nexus-based governance: defining interactions between economic activities and Sustainable Development Goals (SDGs) // *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 2020. Pp. 1–17. DOI: 10.1080/13504509.2020.1768452
8. Umar U.A., Shafiq N., Ahmad F.A. A case study on the effective implementation of the reuse and recycling of construction & demolition waste management practices in Malaysia // *Ain Shams Engineering Journal*. 2020. DOI: 10.1016/j.asej.2020.07.005
9. Rocco M.V., Colombo E. Exergy life cycle assessment of a waste-to-energy plant // *Energy Procedia*. 2016. Vol. 104. Pp. 562–567. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.12.095
10. Mahayuddin S.A., Ishak N.R., Wan Zaharuddin W.A.Z., Ismam J.N. Assessment on the reuse and recycling of domestic solid waste in Malaysia // *Geographia Technica*. 2020. Pp. 74–82. DOI: 10.21163/gt_2020.151.24
11. Tazi N., Idir R., Fraj A.B. Sustainable reverse logistic of construction and demolition wastes in French regions: Towards sustainable practices // *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 90. Pp. 712–717. DOI: 10.1016/j.procir.2020.01.126
12. Silva M.F., Jayasinghe L.B., Waldmann D., Hertweck F. Recyclable architecture: Prefabricated and recyclable typologies // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 4. P. 1342. DOI: 10.3390/su12041342
13. Canales K.S., Dávila J.A.G. Gobernanza y movilidad urbana hacia la sustentabilidad. Comunidad educativa en Monterrey, México // *Bitacora Urbano Territorial*. 2020. Vol. 30. Issue 3. Pp. 95–107. DOI: 10.15446/bitacora.v30n3.80196
14. Durr J.F.W., Hagedorn-Hansen D., Oosthuizen G.A. Waste to resource process chain strategies for global manufacturers // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 8. Pp. 595–602. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.076
15. Seunghwan W., Sungwoong Ya., Umberto B., Sumin K. Assessment of recycled ceramic-based inorganic insulation for improving energy efficiency and flame retardancy of buildings // *Environment International*. 2019. Vol. 130. P. 104900. DOI: 10.1016/j.envint.2019.06.010
16. Hazarika H., Pasha S.M.K., Ishibashi I., Yoshimoto N., Kinoshita T., Endo S. et al. Tire-chip reinforced foundation as liquefaction countermeasure for residential buildings // *Soils and Foundations*. 2020. Vol. 60. Issue 2. Pp. 315–326. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.12.013
17. Adefila A., Abuzeinab A., Whitehead T., Oyinlola M. Bottle house: Utilising appreciative inquiry to develop a user acceptance model // *Built Environment Project and Asset Management*. 2020. Vol. 10. Issue 4. Pp. 567–583. DOI: 10.1108/BEPAM-08-2019-0072

18. Dadzie D.K., Kaliluthin A.K., Kumar D.R. Exploration of waste plastic bottles use in construction // *Civil Engineering Journal*. 2020. Vol. 6. Issue 11. Pp. 2262–2272. DOI: 10.28991/cej-2020-03091616
19. Solaja O.M., Awobona S., Omodehin A.O. Knowledge and practice of recycled plastic bottles (RPB) built homes for sustainable community-based housing projects in Nigeria // *Cogent Social Sciences*. 2020. Vol. 6. Issue 1. P. 1778914. DOI: 10.1080/23311886.2020.1778914
20. Gonnade E.M., Joshi S.V., Kulkarni P.B., Tiwari M.S. Reuse of synthetic plastic fibres and plastic granules in concrete // *HELIX*. 2020. Vol. 10. Issue 1. Pp. 125–128. DOI: 10.29042/2020-10-1-125-128
21. Ameen R.F.M., Mourshed M., Li H. A critical review of environmental assessment tools for sustainable urban design // *Environmental Impact Assessment Review*. 2015. Vol. 55. Pp. 110–125. DOI: 10.1016/j.eiar.2015.07.006
22. Mutani G., Azzolino C., Macri M., Mancuso S. Straw buildings: a good compromise between environmental sustainability and energy-economic savings // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Issue 8. P. 2858. DOI: 10.3390/app10082858
23. Сухинина Е.А., Степанова А.С. Современные тенденции экологичности: строительство домов из отходов // *Творчество и современность*. 2020. № 1 (12). С. 93–99.
24. Дярькин Р.А., Прошин И.А., Горячева А.А. Применение изоляционных материалов из отходов синтетических каучуков в основании полигона твердых бытовых отходов // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1–1. С. 36.
25. Ильиных Г.В. Оценка потенциала твердых бытовых отходов при использовании продуктов их переработки в строительной отрасли // *Строительные материалы*. 2012. № 8. С. 49–51.
26. Колчина О.Е. Технологии переработки отходов полимерных материалов // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. 2019. № 3 (22). С. 199–203.
27. Лунев Г.Г., Макаров В.В. Оценка экологической безопасности процессов переработки и материалов из вторичных строительных ресурсов // *Экологические системы и приборы*. 2016. № 12. С. 42–50.
28. Максимова О.А., Михайличенко К.Ю., Курбатова А.И., Коршунова А.Ю., Климакина А.В. Экологическая безопасность строительных материалов, при производстве которых используются отходы производства и потребления (на примере экобетона) // *Экология и промышленность России*. 2017. Т. 21. № 9. С. 58–63. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-9-58-63
29. Сайдумов М.С., Муртазаев С.-А.Ю., Алаханов А.Х., Дагин И.С., Нахаев М.Р. Техногенные отходы как сырьевая база для получения современных строительных композитов // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 7. С. 31–35. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-7-31-35
30. Wang W., Tian Z., Xi W., Tan Y.R., Deng Y. The influencing factors of China's green building development: An analysis using RBF-WINGS method // *Building and Environment*. 2020. Vol. 188. P. 107425. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107425
31. Сухинина Е.А. Экологические нормативы в архитектурно-градостроительном проектировании. Саратов : Саратовский государственный технический университет, 2017. 191 с.

Поступила в редакцию 18 января 2021 г.

Принята в доработанном виде 16 февраля 2021 г.

Одобрена для публикации 18 февраля 2021 г.

О Б АВТОРЕ: Елена Александровна Сухинина — кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектуры; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (СГТУ имени Гагарина Ю.А.); 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77; РИНЦ ID: 701984; arx-art-lena@yandex.ru.

REFERENCES

1. Di Maria F., Beccaloni E., Bonadonna L., Cini C., Confalonieri E., La Rosa G. et al. Minimization of spreading of SARS-CoV-2 via household waste produced by subjects affected by COVID-19 or in quarantine. *Science of The Total Environment*. 2020; 743:140803. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140803
2. Kleszcz J., Maciejko A. Impact of the municipal waste collection system in cities on urban space and the functioning of their inhabitants. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2020; 30(1):33-42. DOI: 10.2478/ceer-2020-0003
3. Hernandez D., Fernandez-Puratich H., Cataldo F., Gonzalez J. Particle boards made with Prunus avium fruit waste. *Case Studies in Construction Materials*. 2020; 12:e00336. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00336
4. Ongpeng J.M.C., Barra J., Carampatana K., Sebastian C., Yu J.J., Aviso K.B. et al. Strengthening

- rectangular columns using recycled PET bottle strips. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020. DOI: 10.1016/j.jestech.2020.07.006
5. Marcellus-Zamora K.A., Gallagher P.M., Spatari S. Can public construction and demolition data describe trends in building material recycling? Observations from Philadelphia. *Frontiers in Built Environment*. 2020; 6. DOI: 10.3389/fbuil.2020.00131
 6. Sondhi S., Kaur P.S., Kaur M. Techno-economic analysis of bioethanol production from microwave pretreated kitchen waste. *SN Applied Sciences*. 2020; 2:1558. DOI: 10.1007/s42452-020-03362-1
 7. Van Zanten J.A., van Tulder R. Towards nexus-based governance: defining interactions between economic activities and Sustainable Development Goals (SDGs). *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 2020; 1-17. DOI: 10.1080/13504509.2020.1768452
 8. Umar U.A., Shafiq N., Ahmad F.A. A case study on the effective implementation of the reuse and recycling of construction & demolition waste management practices in Malaysia. *Ain Shams Engineering Journal*. 2020. DOI: 10.1016/j.asej.2020.07.005
 9. Rocco M.V., Colombo E. Exergy Life Cycle Assessment of a Waste-to-Energy plant. *Energy Procedia*. 2016; 104:562-567. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.12.095
 10. Mahayuddin S.A., Ishak N.R., Wan Zaharuddin W.A.Z., Ismam J.N. Assessment on the reuse and recycling of domestic solid waste in Malaysia. *Geographia Technica*. 2020; 74-82. DOI: 10.21163/gt_2020.151.24
 11. Tazi N., Idir R., Fraj A.B. Sustainable reverse logistic of construction and demolition wastes in French regions: Towards sustainable practices. *Procedia CIRP*. 2020; 90:712-717. DOI: 10.1016/j.procir.2020.01.126
 12. Silva M.F., Jayasinghe L.B., Waldmann D., Hertweck F. Recyclable Architecture: Prefabricated and Recyclable Typologies. *Sustainability*. 2020; 12(4):1342. DOI: 10.3390/su12041342
 13. Canales K.S., Dávila J.A.G. Gobernanza y movilidad urbana hacia la sustentabilidad. Comunidad educativa en Monterrey, México. *Bitacora Urbano Territorial*. 2020; 30(3):95-107. DOI: 10.15446/bitacora.v30n3.80196
 14. Durr J.F.W., Hagedorn-Hansen D., Oosthuizen G.A. Waste to Resource Process Chain Strategies for Global Manufacturers. *Procedia Manufacturing*. 2017; 8:595-602. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.076
 15. Seunghwan W., Sungwoong Ya., Umber-to B., Sumin K. Assessment of recycled ceramic-based inorganic insulation for improving energy efficiency and flame retardancy of buildings. *Environment International*. 2019; 130:104900. DOI: 10.1016/j.envint.2019.06.010
 16. Hazarika H., Pasha S.M.K., Ishibashi I., Yoshimoto N., Kinoshita T., Endo S. et al. Tire-chip reinforced foundation as liquefaction countermeasure for residential buildings. *Soils and Foundations*. 2020; 60(2):315-326. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.12.013
 17. Adefila A., Abuzeinab A., Whitehead T., Oyinlola M. Bottle house: Utilising appreciative inquiry to develop a user acceptance model. *Built Environment Project and Asset Management*. 2020; 10(4):567-583. DOI: 10.1108/BEPAM-08-2019-0072
 18. Dadzie D.K., Kaliluthin A.K., Kumar D.R. Exploration of waste plastic bottles use in construction. *Civil Engineering Journal*. 2020; 6(11):2262-2272. DOI: 10.28991/cej-2020-03091616
 19. Solaja O.M., Awobona S., Omodehin A.O. Knowledge and practice of recycled plastic bottles (RPB) built homes for sustainable community-based housing projects in Nigeria. *Cogent Social Sciences*. 2020; 6(1):1778914. DOI: 10.1080/23311886.2020.1778914
 20. Gonnade E.M., Joshi S.V., Kulkarni P.B., Tiwari M.S. Reuse of synthetic plastic fibres and plastic granules in concrete. *HELIX*. 2020; 10(1):125-128. DOI: 10.29042/2020-10-1-125-128
 21. Ameen R.F.M., Mourshed M., Li H. A critical review of environmental assessment tools for sustainable urban design. *Environmental Impact Assessment Review*. 2015; 55:110-125. DOI: 10.1016/j.eiar.2015.07.006
 22. Mutani G., Azzolino C., Macri M., Mancuso S. Straw buildings: A good compromise between environmental sustainability and energy-economic savings. *Applied Sciences*. 2020; 10(8):2858. DOI: 10.3390/app10082858
 23. Sukhinina E.A., Stepanova A.S. Current ecological trends: construction of waste houses. *Creativity and Modernity*. 2020; 1(12):93-99. (rus.)
 24. Dyarkin R.A., Proshin I.A., Goryacheva A.A. The use of insulation materials from waste synthetic rubber at the base of the solid waste landfill. *Modern Problems of Science and Education*. 2015; 1-1:36. (rus.)
 25. Ilinykh G.V. Assessment of the potential of solid household waste when using products of their processing in the construction industry. *Construction Materials*. 2012; 8:49-51. (rus.)
 26. Kolchina O.E. Technology recycling polymeric materials. *Education and Science in the Modern World. Innovation*. 2012; 3(22):199-203. (rus.)
 27. Lunev G.G., Makarov V.V. Environmental assessment process safety perera-processing and material from secondary building resources. *Environmental Systems and Devices*. 2016; 12:42-50. (rus.)
 28. Maksimova O.A., Mikhailichenko K.Yu., Kurbatova A.I., Korshunova A.Yu., Klimakina A.V. Environmental safety of building materials, in the production of which production and consumption wastes are used (for example, eco-concrete). *Ecology and Industry of Russia*. 2017; 21(9):58-63. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-9-58-63 (rus.)
 29. Saydumov M.S., Murtazaev S.-A.Yu., Alaskhanov A.Kh., Dagin I.S., Nakhaev M.R. Man-made

waste as a raw material base for the production of modern construction composites. *Ecology and Industry of Russia*. 2019; 23(7):31-35. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-7-31-35 (rus.).

30. Wang W., Tian Z., Xi W., Tan Y.R., Deng Y. The influencing factors of China's green building

development: An analysis using RBF-WINGS method. *Building and Environment*. 2020; 188:107425. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107425

31. Sukhinina E.A. *Environmental standards in architectural and urban planning*. Saratov, Saratov State Technical University, 2017; 191. (rus.).

Received January 18, 2021.

Adopted in revised form on February 16, 2021.

Approved for publication on February 18, 2021.

BIONOTES: **Elena A. Sukhinina** — Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of Architecture; **Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU)**; 77 Polytechnic st., Saratov, 410054, Russian Federation; ID RISC: 701984; arx-art-lena@yandex.ru.

Сравнение работоспособности типов грунтовой плотины для условий Муллалакской ГЭС

А.А. Подвысоцкий¹, М.П. Саинов², А.Ю. Кириченко²

¹ Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука»;
г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В практике гидротехнического строительства применяются несколько типов грунтовых плотин. При этом выбор типа плотины осуществляется отдельно для каждого гидроузла применительно к его особенностям и природным условиям. Выполнено сравнение двух типов каменно-набросной плотины с бетонным экраном (БЭ) и асфальтобетонной диафрагмой (АФД) для условий Муллалакской ГЭС на р. Пскем в Республике Узбекистан, высота плотины которой составляет 85 м. Сравнение производилось с точки зрения работоспособности плотины как при статических силах, так и в условиях высокой сейсмичности.

Материалы и методы. Для плотин двух типов выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС), устойчивости откосов при основном и особом сочетаниях нагрузок. Все расчеты проводились в плоской постановке. Расчеты НДС производились с учетом нелинейности поведения грунтовой среды и контактного взаимодействия конструкций. Входящие в особые сейсмические нагрузки определялись по линейно-спектральной методике через периоды и формы собственных колебаний. Расчеты устойчивости откосов осуществлялись с учетом напряженного состояния грунтов, полученного из расчетов НДС.

Результаты. Каждый из рассмотренных типов грунтовой плотины обладает своими особенностями. Плотина с АФД хуже приспособлена к восприятию высоких сейсмических нагрузок, ее НДС при землетрясении характеризуется развитием зон потери прочности и нарушения сплошности грунта. Минусом плотины с БЭ является недостаточная надежность ее противофильтрационного элемента, требуются дополнительные меры по обеспечению благоприятного напряженного состояния экрана. Еще один результат исследования — то, что откосы обоих типов плотины не обладают необходимым запасом устойчивости при заложении откосов 1,5 при землетрясении интенсивностью 9 баллов.

Выводы. В условиях района с высокой сейсмичностью плотина с БЭ — более работоспособная, чем плотина с АФД, как при действии статических, так и сейсмических сил.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Муллалакская ГЭС, каменно-набросная плотина с бетонным экраном, каменно-набросная плотина с асфальтобетонной диафрагмой, напряженно-деформированное состояние, сейсмостойкость, устойчивость откосов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Подвысоцкий А.А., Саинов М.П., Кириченко А.Ю. Сравнение работоспособности типов грунтовой плотины для условий Муллалакской ГЭС // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 202–219. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.202-219

Performance comparison of various types of embankment dams in relation to the conditions of the Mullalakh HPP

Aleksei A. Podvysotckii¹, Mikhail P. Sainov², Andrey Yu. Kirichenko²

¹ Design and survey and research Institute Hidroproekt named after S.Ya. Zhuk; Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. Several types of embankment dams are used in the hydraulic engineering practice. However, the choice of a dam is individual for each hydraulic engineering project, as it takes account of specific features and natural conditions. This paper compares two types of rockfill dams (the one having a concrete face and the other having an asphalt-concrete diaphragm) in relation to the Mullalakh HPP on the Pskem River in the Republic of Uzbekistan. The dam height is 85 m. The comparison was performed from the standpoint of the dam performance in case of exposure to static forces and high seismicity.

Materials and methods. The analysis of (1) the stress-strain state (SSS), (2) the stability of slopes exposed to regular and irregular load combinations was conducted for two types of dams. All calculations were performed in the two-dimensional domain. The analysis of the stress-strain state took account of the non-linear behavior of the soil ground and the contact interaction between structural elements. Seismic loads, included into the scope of irregular loads, were identified using

the response spectrum method applied to particular periods and self-oscillation modes. Slope stability was analyzed with regard for the stress state of soils identified in the course of SSS calculations.

Results. Each type of embankment dams has its specific features. The asphalt diaphragm dam is worse at perceiving high seismic loads. Its SSS during an earthquake features strength loss and emergence of soil discontinuity zones. The disadvantage of a concrete face dam is the insufficient safety of its anti-seepage element. Supplementary measures are needed to ensure the appropriate stress state of the face. Another finding is that the slopes of both types of dam do not demonstrate a sufficient stability factor, if the slope ratio equals to 1.5 during a 9-point earthquake.

Conclusions. In high seismicity regions, a concrete faced dam demonstrates better performance than the asphalt diaphragm dam if both are exposed to static and seismic forces.

KEYWORDS: Mullalakh HPP, concrete faced rockfill dam, asphalt diaphragm rockfill dam, stress-strain state, seismic stability, stability of slopes

FOR CITATION: Podvysotckii A.A., Sainov M.P., Kirichenko A.Yu. Performance comparison of various types of embankment dams in relation to the conditions of the Mullalakh HPP. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(2):202-219. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.202-219 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Одна из важных инженерных задач проектирования речных гидроузлов и гидроэлектростанций (ГЭС) — выбор типа плотины, поскольку, как правило, именно плотина является наиболее дорогостоящим сооружением. У каждого из типов плотин есть свои преимущества и недостатки, однако рациональная область применения каждого из них не определена. Бетонные плотины в сравнении с грунтовыми обладают большей надежностью и лучше приспособлены для пропуска воды, но они более дорогие, поэтому плотины из местных материалов (грунтовые плотины) во многих случаях — вполне конкурентоспособны.

Класс грунтовых плотин имеет большое разнообразие, получили распространение несколько типов грунтовых плотин, отличающихся по своему устройству. Наиболее распространенные и универсальные типы грунтовых плотин, применимые практически в любых условиях, — каменно-земляные плотины с глинистым ядром и каменно-набросные плотины с бетонным (железобетонным) экраном (БЭ). Эти типы плотин используются для строительства гидроузлов со сверхвысокими напорами (более 150 м).

В настоящее время в Таджикистане строится самая высокая грунтовая плотина в мире — каменно-земляная плотина Рогунской ГЭС, ее высота превысит 300 м [1]. Там же находится самая высокая из действующих каменно-земляных плотин — плотина Нурекской ГЭС.

Максимальная высота каменно-набросной плотины с БЭ несколько меньше. В Китае построена самая высокая в мире такого типа плотина — Shuibuya высотой 233 м. Несмотря на значительные осадки (до 280 см) и смещения (до 70 см) ее каменной насыпи, измеренные в натурных условиях [2], надежность ее противофильтрационного экрана опасений не вызывает. Китайскими инженерами выдвигаются планы строительства плотин с БЭ высотой 250–300 м [3, 4].

Для гидроузлов с меньшими напорами применяется более широкий ряд типов грунтовых плотин. Один из распространенных типов — плотины с ас-

фальтобетонной диафрагмой (АФД). Этот тип плотин относительно «молодой» в сравнении с каменно-земляными и каменно-набросными с БЭ: первая плотина с АФД была построена в Германии в 1961–1962 гг. Однако теперь плотины с АФД составляют конкуренцию традиционным типам грунтовых плотин. Они применяются все чаще в самых сложных условиях, область их использования значительно расширилась, выросла и максимально возможная высота. В 1997 г. в Норвегии у полярного круга была построена плотина Storglomvatn высотой 126 м¹ [5], а в 2005 г. в Китае в сейсмоопасном районе построена плотина Yele высотой 125 м [6]. В Канаде строится целый комплекс плотин с АФД для создания ГЭС La Romaine 2 [7]. Высота основной плотины составит 109 м. Это — первый опыт применения плотин с АФД в Северной Америке.

В XXI в. рост максимальной высоты плотин с АФД продолжился. В 2017 г. в Эфиопии возведена плотина Zarema May Day высотой 152 м, в 2019 г. — плотина Moglice высотой 167 м в Албании [8]. Самая высокая в мире плотина с АФД построена в 2017 г. в Китае. Это — плотина Qixue, высота которой составляет 174 м, однако АФД воспринимает лишь часть полного напора [8, 9]. Тем не менее в Китае рассматриваются планы строительства сверхвысоких каменно-набросных плотин с АФД высотой порядка 200 м [10, 11].

Таким образом, вопрос о выборе типа высокой грунтовой плотины является актуальным и дискуссионным. Конкуренция в основном разворачивается между тремя вышеперечисленными типами плотины: каменно-земляная с глинистым ядром, каменно-набросная с БЭ и каменно-набросная с АФД. При проектировании плотины Yele проводилось сравнение именно между указанными тремя вариантами [6]. При этом из трех вариантов самой дешевой оказалась плотина с БЭ (на 10 % дешевле плотины с АФД), а самой дорогой — каменно-земляная плотина (на 10 % дороже плотины с АФД). Предпочтение было отдано плотине с АФД по соображениям технического

¹ Høeg K. Asphaltic Concrete Cores for Embankment Dams. Stikka Press, Norway, 1993. 88 p.

характера. Выбор типа плотины определяется множеством факторов, а не только стоимостью. Но, как правило, решающим фактором служат особенности природных условий.

В данной статье рассматриваются результаты исследования по выбору типа грунтовой плотины применительно к условиям Муллалакской ГЭС, возможность строительства которой обсуждается в настоящее время в Узбекистане. Муллалакская ГЭС будет располагаться ниже по течению по отношению к уже строящейся Пскемской ГЭС. Предполагается, что высота плотины Муллалакской ГЭС составит 85 м.

Сравнение типов плотины производилось только с точки зрения параметров работоспособности. У природных условий района Муллалакской ГЭС есть несколько особенностей. Одна из них — высокая сейсмичность района строительства, интенсивность землетрясения составляет 9 баллов по шкале MSK-64. Еще одна важная характеристика — строение и свойства основания. Основание плотины представляет собой чередование пачек алевролитов, аргиллитов, песчаников, конгломератов. Сейчас, вследствие отсутствия полномасштабных изысканий, свойства грунтов основания достоверно не изучены. Поскольку нет гарантий в прочности грунтов основания предпочтительно строительство в данном створе грунтовой плотины.

Рассматриваются только два вида каменно-набросных плотин с негрунтовыми противофильтрационными элементами (ПФЭ): с БЭ и АФД. Вариант каменно-земляной плотины не обсуждается из-за отсутствия инженерно-геологических изысканий о наличии карьеров глинистых грунтов. Упорные призмы каменно-набросной плотины будут изготавливаться из галечниковых грунтов.

В качестве основного варианта проектной организацией (Гидропроект, г. Москва) признается вариант с АФД. Аналогом для применения послужила плотина Богучанской ГЭС на р. Ангара, которая построена в 2012 г. и имеет высоту 78 м [12]. Преимуществом плотины с АФД является вертикальное расположение ПФЭ, которое позволит в случае необходимости производить ремонт плотины путем выполнения инъекций цементных растворов с гребня плотины. Кроме того, АФД может быть удобно сопряжена с противофильтрационным устройством в основании. Для борьбы с фильтрацией в основании Муллалакской плотины проектируется противофильтрационная стена.

Вариант плотины с БЭ рассматривается как альтернативный.

Оба варианта негрунтового ПФЭ обладают преимуществами и недостатками, поэтому заранее определить, какой из них станет оптимальным, невозможно без расчетного обоснования. Данному вопросу посвящено исследование, в котором сравниваются два типа плотин на основе расчетной оценки их работоспособности.

Расчетное обоснование плотин с негрунтовыми ПФЭ включает изучение напряженно-деформированного состояния (НДС). Исследования НДС плотин с АФД освещаются в работах [13–17], показан высокий запас прочности этого типа ПФЭ с точки зрения опасности гидравлического разрыва.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка работоспособности конструкций грунтовой плотины проводилась на основе расчетов НДС и запаса устойчивости откосов плотины. Эти расчеты осуществлялись для двух сочетаний нагрузок: основного и особого. Основное сочетание нагрузок включало в себя статические силы от собственного веса плотины и гидростатического давления на напорную грань сооружения. Особое сочетание нагрузок — указанные статические, а также сейсмические силы.

Для корректности оценки при сравнении вариантов типов плотины использовались профили с одинаковым наклоном откосов (в верхней части), однако в целом плотина с АФД имела немного более широкий профиль из-за наличия берм на верховом откосе и включения в состав плотины верховой перемычки с грунтовым экраном.

Проектные профили плотины были приняты максимально обжатыми: заложение верхового и низового откосов составило $m = 1,5$. Для плотины с АФД рассматривался дополнительно второй вариант наклона откосов. В этом варианте в верхней части плотины заложение откосов было увеличено до 1,8. Так как район строительства — сейсмоопасный, конструкция плотин обоих типов предполагает устройство на откосах антисейсмической пригрузки из каменной наброски.

Конструкция АФД разработана проектной организацией с постоянной по высоте толщиной (0,9 м), однако в зоне опоры на бетонную плиту учтено ее уширение. АФД окружена с двух сторон слоями гравийно-песчаного грунта.

Конструкция БЭ принята неразрезной по высоте, с переменной толщиной. Вверху толщина БЭ составляет 0,3 м, внизу — 0,5 м. Было предусмотрено, что БЭ укладывается на тонкий слой подготовки из малоцементного бетона, а между экраном и подготовкой для снижения трения устраивается слой битумной эмульсии. Ниже слоя подготовки — подэкрановая зона из щебенистого грунта. В зоне контакта с основанием БЭ переходит в бетонный пунур. От него БЭ отделяется периметральным швом. Нижняя часть БЭ укрыта грунтовой защитной призмой высотой 21,1 м.

Для каждого из вариантов типа плотины выполнялись следующие расчеты:

- НДС при основном сочетании нагрузок;
- сейсмических сил;
- НДС при особом сочетании нагрузок;

- устойчивости откосов при основном и особом сочетании нагрузок.

Все расчеты проводились методом конечных элементов с помощью вычислительных программ, созданных кандидатом технических наук М.П. Саиновым. В каждом использовались разные конечно-элементные модели (КЭМ), однако все они увязаны друг с другом для удобной и точной передачи информации от одной модели к другой.

Методика расчетов напряженно-деформированного состояния сооружения

В соответствии с требованиями СП 39.1330-2012² расчеты НДС плотины осуществлялись с применением нелинейной модели грунта и с учетом поэтапности ее возведения и наполнения водохранилища. Предполагаемая схема последовательности возведения сооружения учитывалась при создании КЭМ конструкций плотины, используемых для расчетов НДС.

Кроме того, при создании КЭМ плотины применялись следующие принципы:

1. В модель включалась не только конструкция плотины, но и блок полускального основания. Это было необходимо для того, чтобы более точно определить сейсмические нагрузки на сооружение и НДС нижней части негрунтовых конструкций.

2. Для создания модели использовались конечные элементы высокого порядка. Это позволило смо-

делировать сложный характер тонкостенных ПФЭ. По толщине ПФЭ было выделено 4 ряда конечных элементов.

3. Учитывалась возможность проявления нелинейных эффектов контактного взаимодействия негрунтовых конструкций с телом плотины и основанием. Для этого использовались контактные конечные элементы.

Созданная модель плотины с АФД состоит из 1207 конечных элементов сплошной среды и 131 контактного конечного элемента (рис. 1, *a*). Модель плотины с БЭ состоит из 1088 конечных элементов сплошной среды и 105 контактных конечных элементов (рис. 1, *b*).

В качестве конечных элементов высокого порядка использовались элементы с кубической степенью аппроксимации перемещений внутри элемента. Модель плотины с АФД включает 12 729, а модель с БЭ — 11 367 степеней свободы.

Принятая при расчетах НДС последовательность возведения и загрузки плотины предусматривает, что полное наполнение водохранилища выполняется только после завершения возведения плотины. Отдельным, последним этапом расчета для двух вариантов плотины исследовано НДС при особом сочетании нагрузок.

При расчетах НДС плотины с АФД рассматривались 46 этапов расчета. Сначала моделировалось возведение перемычки, затем наполнение водохранилища до $\nabla 912,5$ м. Затем воспроизводилась послышная отсыпка тела плотины до гребня и наполнение водохранилища до нормального подпорного уровня (НПУ) 978 м.

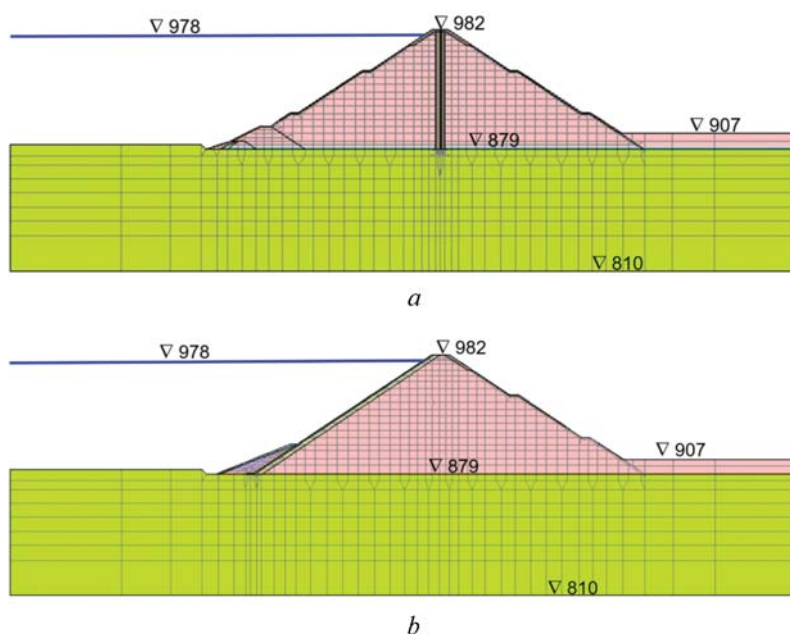


Рис. 1. Конечно-элементные модели вариантов конструкции грунтовой плотины: *a* — каменно-набросная плотина с АФД (заложение откосов $m = 1,5$); *b* — каменно-набросная плотина с бетонным экраном

Fig. 1. Finite element models of embankment dam designs: *a* — a rockfill dam with an asphalt concrete diaphragm (slope $m = 1.5$); *b* — a concrete faced rockfill dam

В расчетах НДС плотины с БЭ было 43 расчетных этапа. Сначала моделировалась послойная отсыпка тела плотины, затем — устройство БЭ и защитной призмы, а потом — наполнение водохранилища. Использовались разные модели материалов. Жесткие материалы (бетон, малоцементный бетон, полускальный грунт основания) принимались упругими. Их расчетные физико-механические свойства приведены в табл. 1.

Считалось, что БЭ выполнен из бетона класса В30. Значение модуля линейной деформации бетона принято в соответствии с СП 41.13330.2012³. Оно соответствует кратковременному восприятию нагрузок и не учитывает влияние ползучести бетона и релаксации напряжений. Этот расчетный случай является более опасным из возможных и создает некоторый запас прочности бетона. В соответствии с СП 41.13330.2012³ расчетное сопротивление бетона класса В30 на осевое растяжение равно: 1,4 МПа по предельным состояниям первой группы и 1,8 МПа по предельным состояниям второй группы. Расчетное сопротивление бетона на сжатие по первой группе предельных состояний — 17 МПа.

Для грунтов и асфальтобетона принималась нелинейность деформирования. Использовалась простая модель среды, которая учитывает следующие основные нелинейные эффекты:

- наличие у грунтов двух ветвей нагружения (активное нагружение и разгрузка);
- возможность потери прочности на сдвиг или растяжение;
- снижение деформируемости при увеличении бокового обжатия.

Для разграничения траекторий нагружения применялись простые условия. Для определения сопротивления сдвигу использовалось условие прочности Кулона – Мора; с целью учета снижения деформируемости грунта при увеличении бокового обжатия —

степенная зависимость, модуль линейной деформации определялся по формуле:

$$E = E_1 (\sigma_3)^k,$$

где E_1 — модуль линейной деформации при напряжении обжатия 1 тс/м^3 (0,01 МПа); σ_3 — максимальное главное напряжение, характеризующее минимальный уровень бокового обжатия; k — показатель степени.

Коэффициент Пуассона грунтов и асфальтобетона в прочном состоянии принимался неизменным.

Использованная математическая модель в целом похожа на известную модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil), широко применяемую при геотехнических расчетах.

При определении сопротивления крупнообломочных грунтов сдвигу учитывалось уменьшение значения угла внутреннего трения φ с ростом сжимающих напряжений σ . Зависимость φ от σ принималась линейной на участке от φ_0 (при $\sigma = 0$) до φ_k (при $\sigma = 150/200 \text{ тс/м}^2$).

Расчеты проводились только для одного варианта распределения деформативных свойств материалов грунтовой плотины. Расчетные параметры модели для грунтов и асфальтобетона приведены в табл. 2. Параметры деформируемости каменной наброски примерно соответствуют секущему модулю деформации 100 МПа, что соответствует деформируемости уплотненного грунта.

Свойства асфальтобетона принимались на основе анализа результатов экспериментов, выполненных Х.С. Шеримбетовым. Считалось, что асфальтобетон будет работать при низкой температуре (близкой к температуре воды) и иметь низкую сжимаемость.

Модуль линейной деформации при разгрузке учитывался условно в 5 раз выше, чем при активном нагружении.

При расчетах НДС сооружения при действии сейсмических нагрузок модули деформации грунтов и асфальтобетона условно принимались в 2 раза выше, чем при восприятии статических сил. Однако они много меньше, чем модули деформации при упругом деформировании, что характеризует воз-

³ СП 41.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений». Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87. М. : ФАУ «ФЦС», 2012. 67 с.

Табл. 1. Физико-механические свойства жестких материалов

Table 1. Physical-mechanical properties of hard materials

Наименование материала Type of material	Плотность, т/м ³ Density, t/m ³	Модуль линейной деформации, МПа Modulus of linear deformation, MPa	Коэффициент Пуассона Poisson ratio
Бетон (экрана) Concrete (screen material)	2,4	29 000	0,20
Малоцементный бетон Low-cement concrete	2,4	5000	0,20
Полускальный грунт основания Semi-rocky foundation soil	2,55	5000	0,25

Табл. 2. Параметры физико-механической модели материалов

Table 2. Parameters of the physical-mechanical model of materials

Наименование материала Type of material	Плотность, т/м ³ Density, t/m ³		Параметры деформируемости Deformability parameters			Прочностные показатели Strength indicators		
	$\rho_{гр}$ ρ_s	$\rho_{нас}$ $\rho_{w,s}$	E_1 , МПа E_1 , МПа	k	ν	φ_0	φ_k	c , кПа / c , kPa
Каменная наброска Rockfill blanket	2,00	2,25	36,5	0,35	0,25	49...53°	35	–
Асфальтобетон Asphalt concrete	2,35	2,35	120	0,20	0,10	20	20	20
Гравийно-песчаный грунт Gravel and sand	1,70	2,07	26	0,35	0,25	39	39	–

Примечание: $\rho_{гр}$, $\rho_{нас}$ — плотность грунта соответственно при укладке (с учетом влажности) и в насыщенном состоянии; ν — коэффициент Пуассона (относительной поперечной деформации); φ_0 , φ_k — углы внутреннего трения, соответственно, начальный и конечный; c — удельное сцепление.

Note: ρ_s , $\rho_{w,s}$ — the density of the soil, respectively, when laying (taking into account humidity) and in a saturated state; ν — poisson's ratio (relative transverse deformation); ν — angles of internal friction, respectively, initial and final; c — specific cohesion.

возможность проявления пластических деформаций при восприятии сейсмических сил. Перемещения плотины, полученные с использованием указанных модулей деформации, соответствуют возможным остаточным деформациям после перенесенного землетрясения.

Расчеты НДС проводились с помощью созданной М.П. Саиновым вычислительной программы NDS_N.

Методика расчета сейсмических нагрузок

Расчет сейсмических сил выполнялся для землетрясения силой 9 баллов по шкале MSK-64. В соответствии с СП 358.1325800.2017⁴ ускорение основания принималось равным 0,4 g. Направление сейсмического воздействия считалось строго горизонтальным. Расчет сейсмических сил осуществлялся для полностью заполненного водохранилища.

Расчет проводился с помощью линейно-спектральной методики, изложенной в СП 358.1325800.2017. Сначала определялись 30 низших форм собственных колебаний (ФСК) сооружения, а затем по ним устанавливались сейсмические ускорения. Подробнее методика описана в работе [18].

В расчетах ФСК сооружения использовались КЭМ с простыми конечными элементами (с квазилинейной аппроксимацией перемещений).

Участие воды водохранилища в вынужденных колебаниях плотины учитывалось путем добавления к степеням свободы, расположенным на на-

порной грани, присоединенной массы воды. Собственный вес блока полускального основания при расчетах не учитывался, так как принималось, что расчетное сейсмическое воздействие приложено к подошве плотины.

В расчетах ФСК учитывалось влияние НДС на динамические характеристики грунтов плотины и то, что динамический модуль каменной наброски увеличивается с глубиной. Условные глубины вычислялись по вертикальным напряжениям, определенным из расчета НДС. Полученное распределение значений динамического модуля грунтов показано на рис. 2. В каменной наброске плотины с АФД величина динамического модуля достигала: 2,4 ГПа в низовой упорной призме и 1,8 ГПа в верховой упорной призме (рис. 2, а). В каменной наброске плотины величина динамического модуля достигала 2,5 ГПа (рис. 2, б).

Расчеты устойчивости отколов

Расчеты проводились методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Использовалась вычислительная программа, составленная М.П. Саиновым. Особенностью реализованной в программе методики расчетов является то, что при определении сил сопротивления сдвигу учитывалось сложное напряженное состояние [19]. Это очень важно, особенно при оценке сейсмостойкости плотины. Предельное сопротивление сдвигу определялось по формуле Кулона.

В каждом из конечных элементов напряжения определялись из расчетов НДС. Они принимались постоянными в рамках одного конечного элемента. Поэтому в расчетах применялась более подробная

⁴ СП 358.1325800.2017 «Гидротехнические сооружения. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах». М.: Стандартинформ, 2018. 58 с.

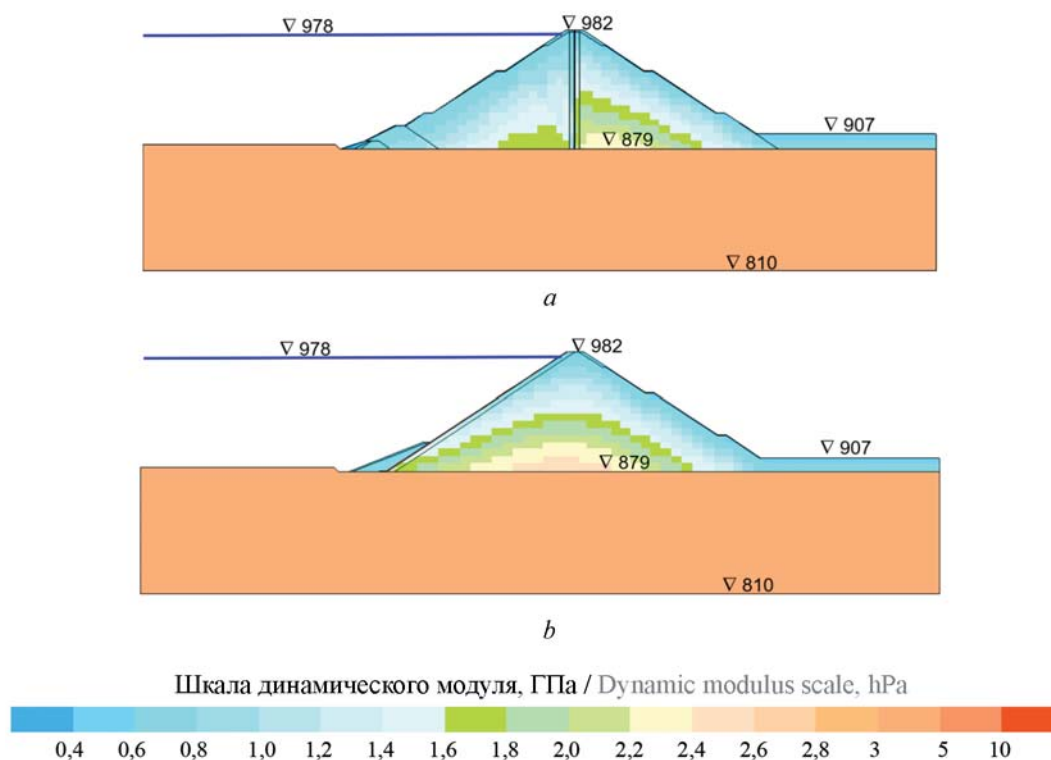


Рис. 2. Распределение величины динамического модуля в теле и основании плотины: *a* — каменно-набросная плотина с АФД; *b* — каменно-набросная плотина с БЭ

Fig. 2. Distribution of the dynamic modulus value over the dam body and base: *a* — rockfill dam with an asphalt concrete diaphragm (slope $m = 1.5$); *b* — concrete faced rockfill dam

КЭМ. Каждый из конечных элементов сплошной среды в модели, использованной в расчетах НДС, разбивался на 25 частей. Общее количество конечных элементов модели, использованной в расчетах устойчивости, составило: для плотины с АФД — 30 175, для плотины с БЭ — 27 200.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчета НДС плотины при основном сочетании нагрузок

Результаты расчета НДС двух вариантов плотины приведены на рис. 3, 4 на момент окончания наполнения водохранилища.

Сравнение величин максимальных осадок и смещений плотины (табл. 3) показывает, что в альтернативном варианте с БЭ (рис. 4) они примерно в 2 раза меньше, чем в основном, с АФД (рис. 3). Это объясняется различием в напряженном состоянии тела плотины.

Из анализа следует, что условия работы плотины с БЭ более благоприятны, чем плотины с АФД. Это объясняется особенностями работы тела грунтовой плотины при восприятии сил гидростатического давления. В плотине с АФД оно приложено на вертикальную напорную грань, расположенную внутри тела плотины, а в плотине с БЭ действует на наклонную грань верхового откоса. В обоих слу-

чаях оно вызывает дополнительные смещения плотины в сторону нижнего бьефа (НБ), а также изменение вертикальных перемещений, но характер их распределения сильно различается.

В плотине с БЭ напорная грань расположена так, что при наполнении водохранилища весь объем каменной наброски работает на сжатие. Гидростатическое давление способствует обжатю каменной наброски и снижению ее деформируемости. Это создает благоприятное НДС каменной наброски.

В плотине с АФД на сжатие работает только низовая упорная призма, а грунт верховой упорной призмы испытывает разуплотнение. Разуплотнение грунта ведет к потере сопротивления сдвигу на контакте верховой грани АФД с грунтом, а также части грунта в верховой призме, формированию нескольких наклонных поверхностей скольжения. Разуплотнение и потеря сопротивления сдвигу грунта верховой упорной призмы вызывает ее дополнительные осадки. По результатам расчета дополнительная осадка верховой части гребня составляет 3,5 см (рис. 3, *b*).

Для улучшения прочностного состояния тела плотины с АФД требуется значительно уменьшить деформируемость каменной наброски и/или уширить профиль плотины. Расчеты показали, что при увеличении ширины подошвы плотины на 17 м перемещения плотины с АФД существенно уменьшаются (табл. 3).

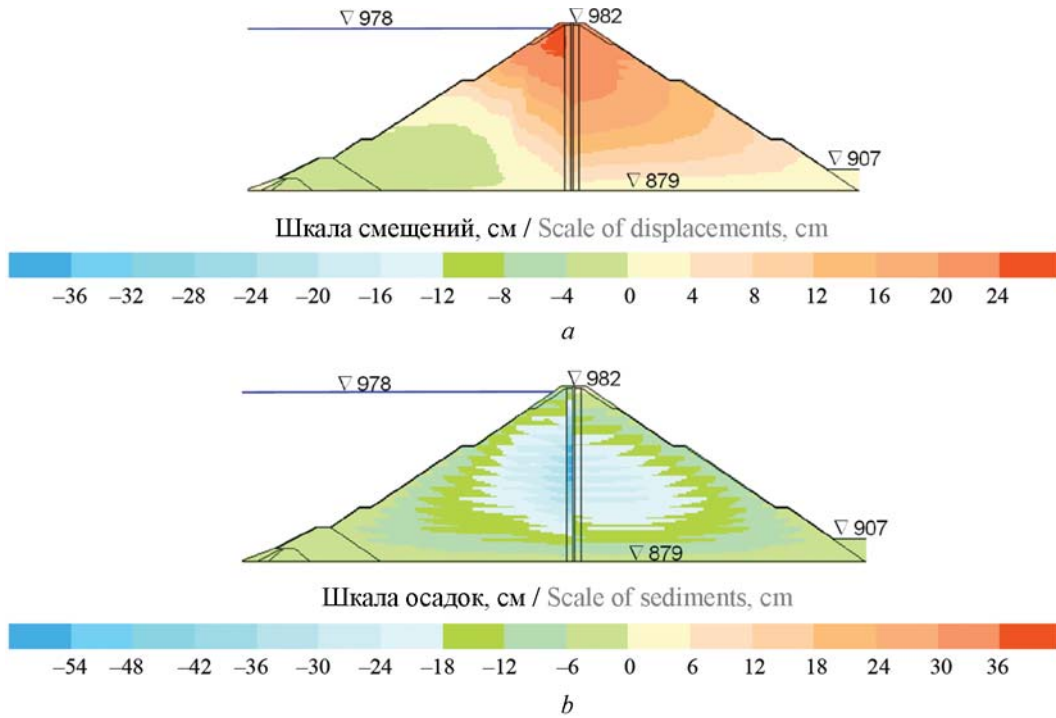


Рис. 3. Перемещения плотины с АФД (при $m = 1,5$) на момент окончания наполнения водохранилища: a — горизонтальные смещения U_x ; b — осадки U_y

Fig. 3. Displacement of the dam that has an asphalt concrete diaphragm (at $m = 1.5$) at the time when the reservoir is filled: a — horizontal displacements U_x ; b — sediments U_y

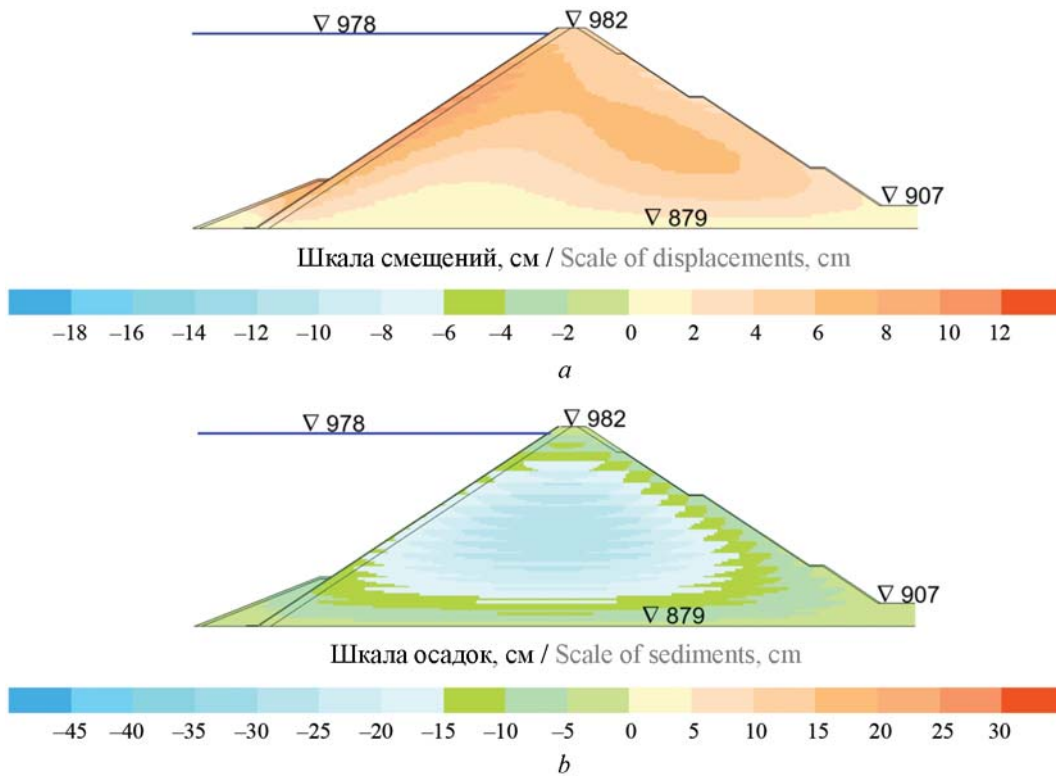


Рис. 4. Перемещения плотины с БЭ на момент окончания наполнения водохранилища: a — горизонтальные смещения; b — осадки

Fig. 4. Displacement of a concrete faced dam at the time when the reservoir is filled: a — horizontal displacements; b — sediments

Табл. 3. Максимальные перемещения конструкций плотины при основном сочетании нагрузок
 Table 3. Maximal displacements of dam constructions if exposed to the principal combination of loads

Параметр Parameter	Плотина с АФД проектного профиля Standard profile dam with an asphalt concrete diaphragm	Плотина с АФД уширенного профиля Extended profile dam with an asphalt concrete diaphragm	Плотина с БЭ Concrete faced rockfill dam
Максимальная осадка, см Maximal settlement, cm	53,7	46,2	26
Максимальное смещение, см Maximal displacement, cm	24,8	20,8	11

Расчеты НДС позволили оценить также работоспособность ПФЭ плотины.

Было выявлено, что АФД находится в благоприятном НДС. Ее максимальное горизонтальное смещение составляет 23,5 см. Она испытывает изгиб и сжатие, вертикальные сжимающие напряжения не превышают 2 МПа. Эти напряжения выше, чем гидростатическое давление, соответственно опасности гидравлического разрыва диафрагмы нет.

Тем не менее следует отметить, что полученные в диафрагме напряжения выше, чем в теле плотины, из-за того, что при рассмотренных характеристиках асфальтобетон является более жестким, чем окружающие грунты. Возможна и обратная ситуация.

В неблагоприятном прочностном состоянии находится только контакт АФД с опорной бетонной плитой. Часть этого контакта раскрывается — ширина раскрытия составляет около 30 % от полной ширины контакта. Можно рекомендовать изменить геометрию нижней части диафрагмы, выполнив уширение в сторону НБ.

Напряженное состояние БЭ более неблагоприятно. Он работает на изгиб и восприятие продоль-

ных сил. Максимальный прогиб БЭ (в направлении перпендикулярно к верховому откосу) — 15,8 см. В нижней части экран испытывает растягивающие напряжения в направлении вдоль откоса (рис. 5). На низовой грани за счет изгиба растягивающие напряжения выше, чем на верховой. Максимальное растягивающее напряжение — 3,8 МПа, оно много выше расчетного сопротивления бетона на растяжение. Для обеспечения прочности экрана необходимо предпринять целый ряд мероприятий. Основная мера — это снижение деформируемости каменной наброски. Как известно, к устройству плотин с БЭ предъявляются повышенные требования по качеству укладки каменной наброски. Дополнительными мерами по обеспечению прочности БЭ служат увеличение толщины нижней части БЭ, а также армирование БЭ.

Результаты определения сейсмических нагрузок

Для обоих вариантов типа плотины были определены 30 низших ФСК. Выявлено, что для плотины с БЭ характерны более высокие частоты колебаний по сравнению с плотиной с АФД (рис. 6).

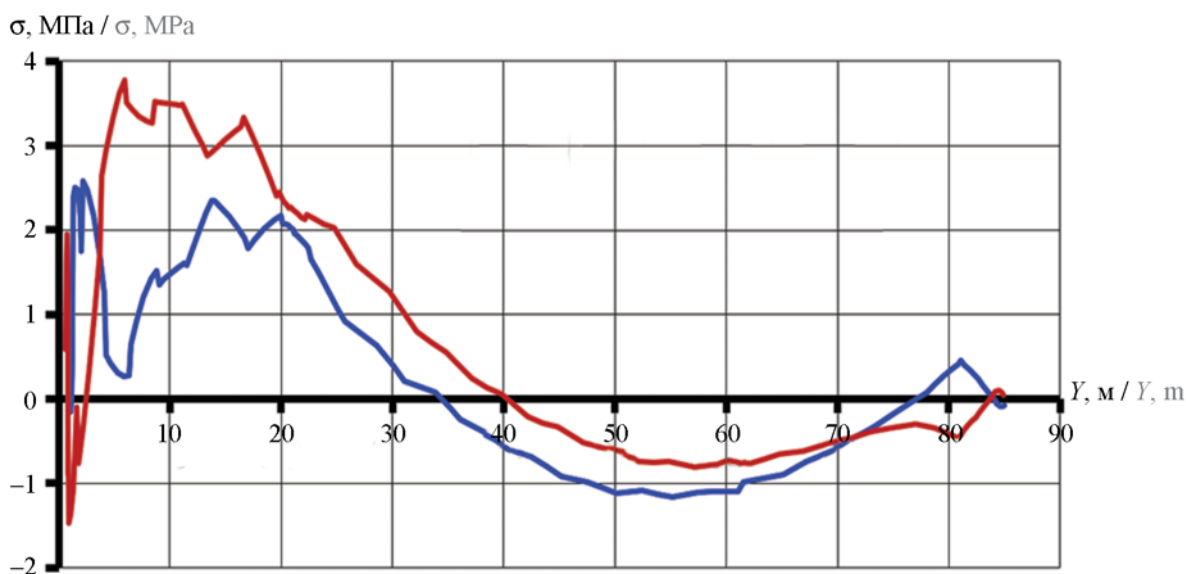


Рис. 5. Распределение по высоте продольных напряжений в БЭ: — верховая грань; — низовая грань
 Fig. 5. Vertical distribution of longitudinal stresses in a concrete face: — upper limit; — lower limit

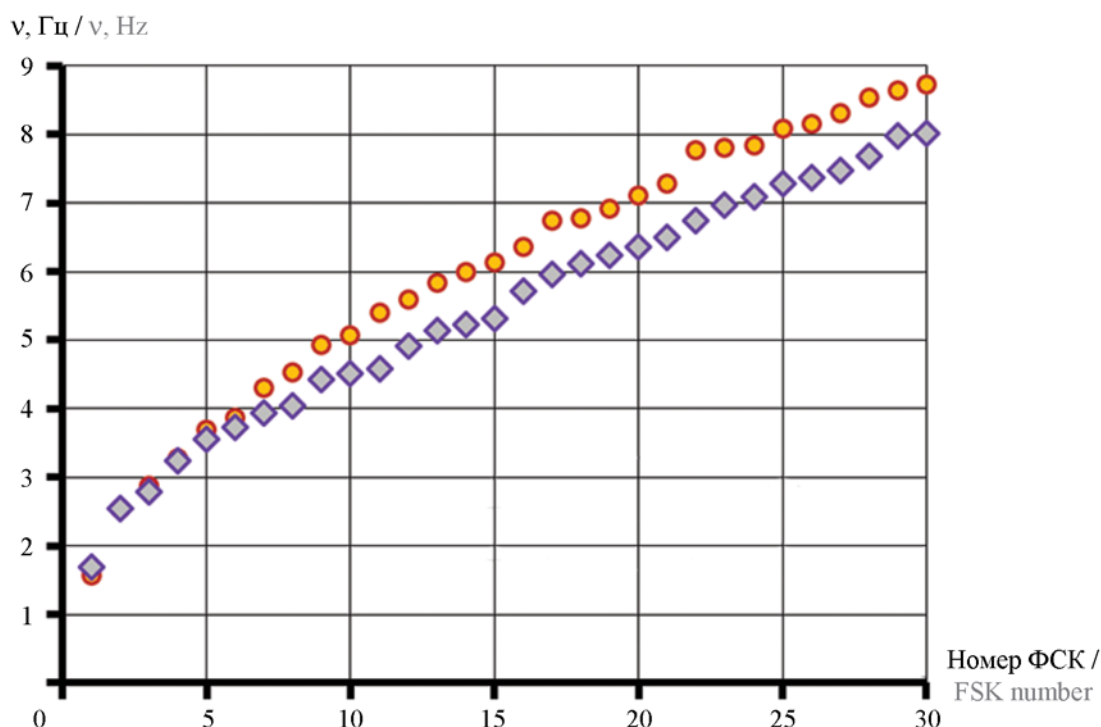


Рис. 6. Частоты собственных колебаний плотины: ● — АФД; ◆ — БЭ

Fig. 6. Frequencies of natural vibrations of a dam: ● — asphalt concrete diaphragm; ◆ — concrete face

Частота основного тона колебаний плотины с АФД составляет 1,57 Гц, для плотины с БЭ — 1,69 Гц. Поскольку частоты первой и тридцатой ФСК отличаются друг от друга примерно в 5 раз, количество ФСК достаточно для расчета сейсмических сил.

Первые шесть форм собственных колебаний двух вариантов плотины показаны на рис. 7, 8.

Сейсмические нагрузки рассчитывались только для случая горизонтального направления ускорения основания. По результатам расчетов максимальные сейсмические ускорения испытывает гребень плотины. Величина ускорения составляет примерно 80 % от ускорения основания и различается для рассмотренных типов плотин. Было выявлено, что плотина с АФД является более восприимчивой к сейсмическому воздействию. Максимальное ускорение гребня плотины с АФД (проектного профиля) составило 0,35 g (рис. 9, а), а плотины с БЭ — 0,31 g (рис. 9, б). Для уширенного профиля плотины с АФД максимальное ускорение гребня плотины — 0,32 g.

Результаты расчета НДС плотины при особом сочетании нагрузок

Вычисленные по линейно-спектральной методике сейсмические силы были приложены к сооружению как статические. При расчете НДС на основное сочетание нагрузок учитывалась возможность проявления в грунте пластических деформаций. Соответственно, полученные в результате расчета перемещения плотины можно рассматривать как остаточные, которые сохраняются после прекраще-

ния действия сейсмических сил. Эти перемещения показаны на рис. 10, 11, они позволяют оценить работоспособность плотины при сейсмических нагрузках.

Расчет проводился для двух случаев. Первый случай — когда сейсмические силы направлены в сторону НБ, второй — в сторону верхнего бьефа (ВБ).

В результате расчета выявлено, что плотина с АФД существенно более восприимчива к сейсмическим силам, чем плотина с БЭ. Например, при направлении сейсмических сил в сторону НБ максимальное остаточное смещение плотины с АФД составило 24 см (рис. 10, а), а плотины с БЭ — 10 см (рис. 11, а).

При направлении сейсмических сил в сторону ВБ характерно еще большее различие в остаточных смещениях двух вариантов плотины. В плотине с БЭ остаточные смещения распределены равномерно, их максимальное значение — 10 см (рис. 11, б).

Для плотины с АФД при сейсмическом воздействии в сторону ВБ присуще нарушение целостности верховой части гребня плотины. Эта часть плотины, ослабленная при восприятии статических сил, получает высокие смещения в сторону ВБ. Они превышают 35 см (рис. 10, б). Происходит образование зоны разуплотнения грунта с верховой стороны от АФД.

Таким образом, плотина с АФД проектного профиля не обладает необходимой надежностью при сейсмическом воздействии.

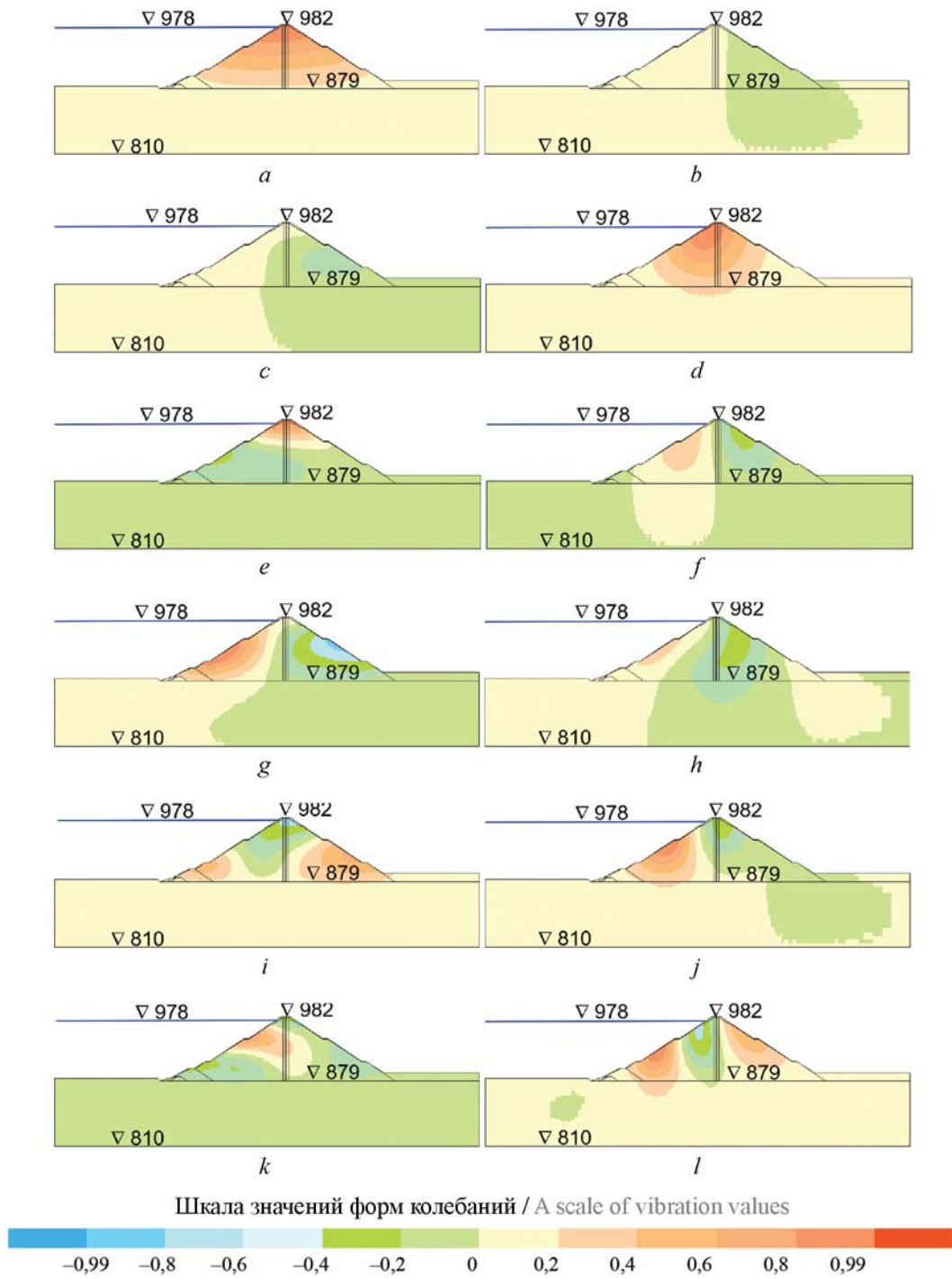


Рис. 7. Формы собственных колебаний поперечного сечения плотины с АФД (при УВБ = НПУ и $m = 1,5$): *a* — U_x первой ФСК; *b* — U_y первой ФСК; *c* — U_x второй ФСК; *d* — U_y второй ФСК; *e* — U_x третьей ФСК; *f* — U_y третьей ФСК; *g* — U_x четвертой ФСК; *h* — U_y четвертой ФСК; *i* — U_x пятой ФСК; *j* — U_y пятой ФСК; *k* — U_x шестой ФСК; *l* — U_y шестой ФСК

Fig. 7. Forms of natural vibrations of the cross-section of a dam with an asphalt concrete diaphragm (with WL = NPL and at $m = 1.5$)

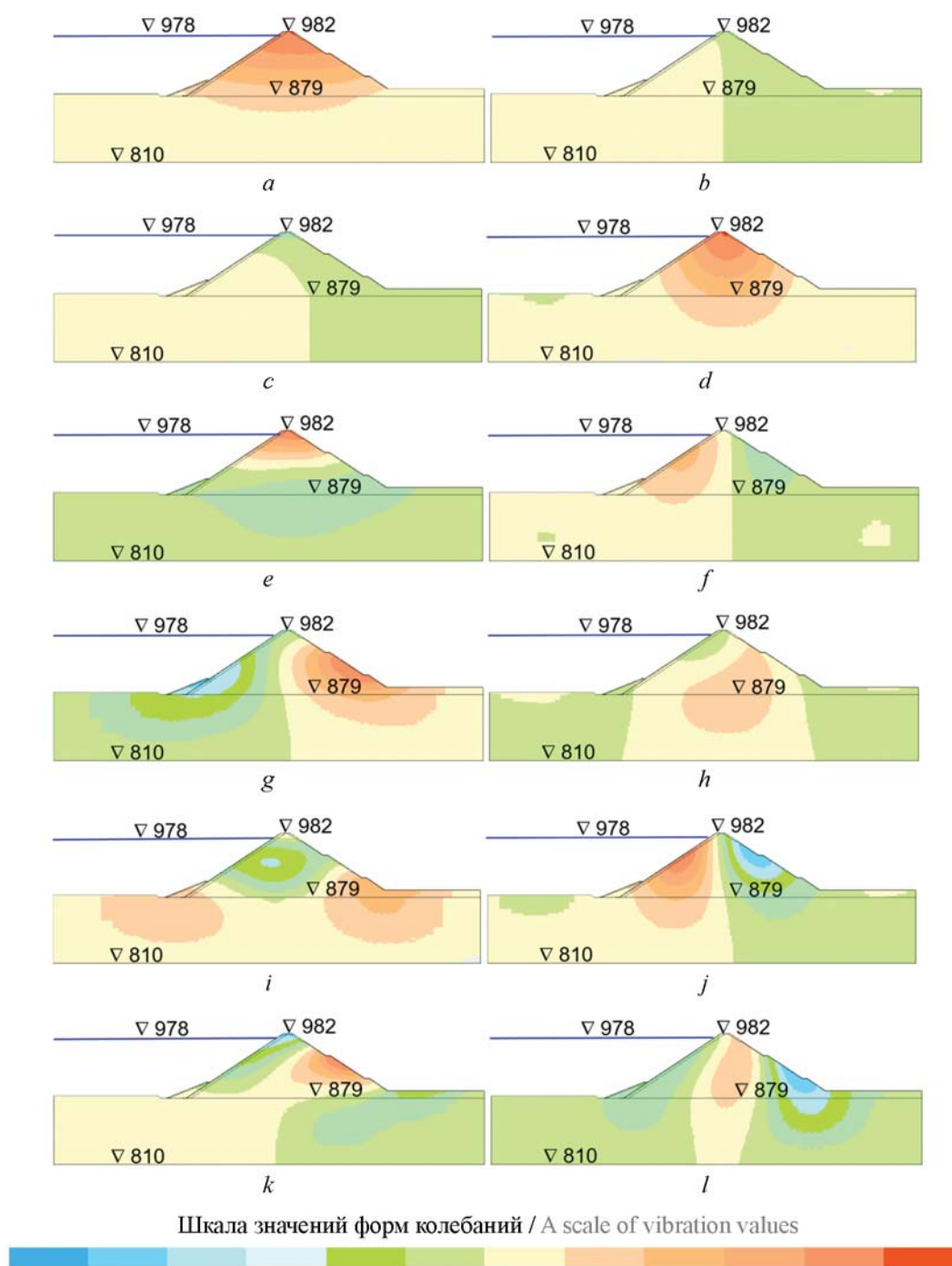


Рис. 8. Формы собственных колебаний поперечного сечения плотины с бетонным экраном (при УВБ = НПУ): *a* — U_x первой ФСК; *b* — U_y первой ФСК; *c* — U_x второй ФСК; *d* — U_y второй ФСК; *e* — U_x третьей ФСК; *f* — U_y третьей ФСК; *g* — U_x четвертой ФСК; *h* — U_y четвертой ФСК; *i* — U_x пятой ФСК; *j* — U_y пятой ФСК; *k* — U_x шестой ФСК; *l* — U_y шестой ФСК

Fig. 8. Forms of natural vibrations of the cross section of a dam with a concrete face (with WL = NPL)

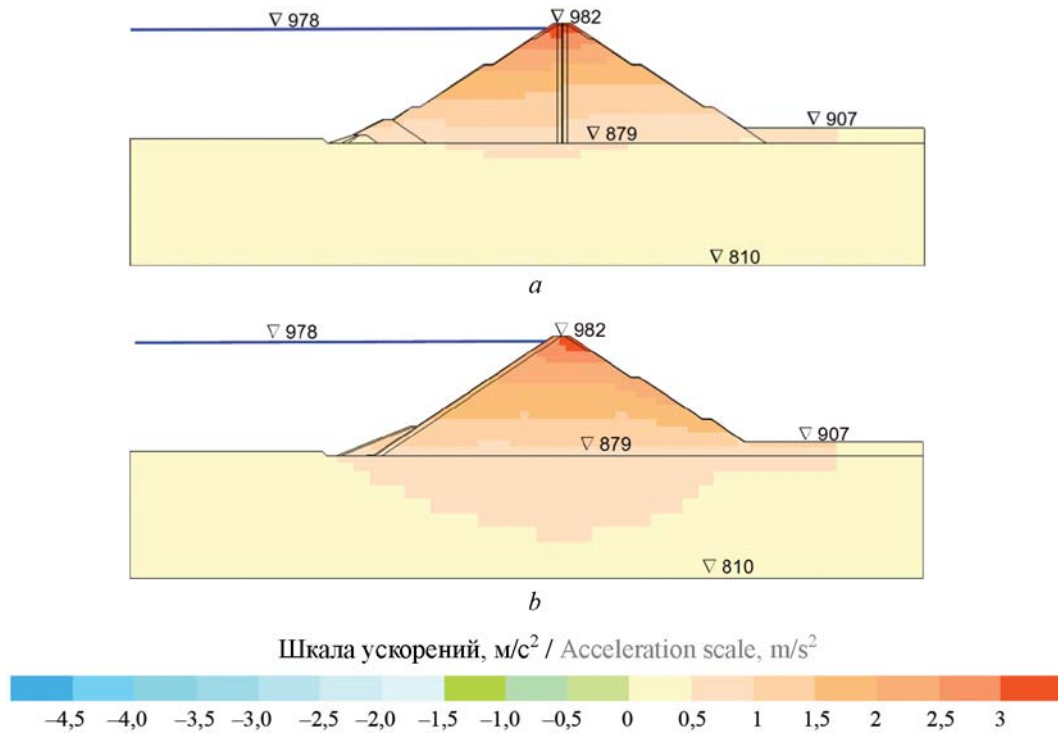


Рис. 9. Распределение горизонтальных ускорений в поперечном сечении плотины: *a* — каменно-набросная плотина с АФД; *b* — каменно-набросная плотина с БЭ

Fig. 9. Distribution of horizontal accelerations in the cross section of a dam: *a* — rockfill dam with an asphalt concrete diaphragm; *b* — concrete faced rockfill dam

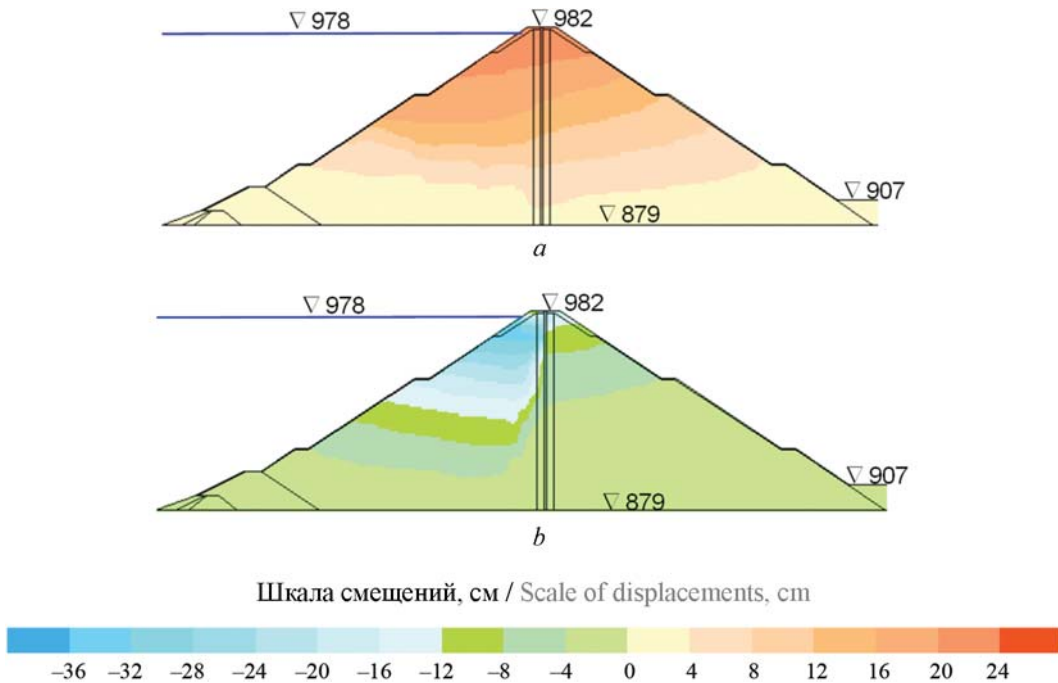


Рис. 10. Остаточные смещения плотины с асфальтобетонной диафрагмой (при $m = 1,5$) после землетрясения: *a* — при сейсмическом воздействии в сторону НБ; *b* — при сейсмическом воздействии в сторону ВБ

Fig. 10. Residual displacements of a dam having an asphalt concrete diaphragm (at $m = 1.5$) after an earthquake: *a* — under the seismic impact towards the downstream; *b* — under the seismic impact towards the upstream

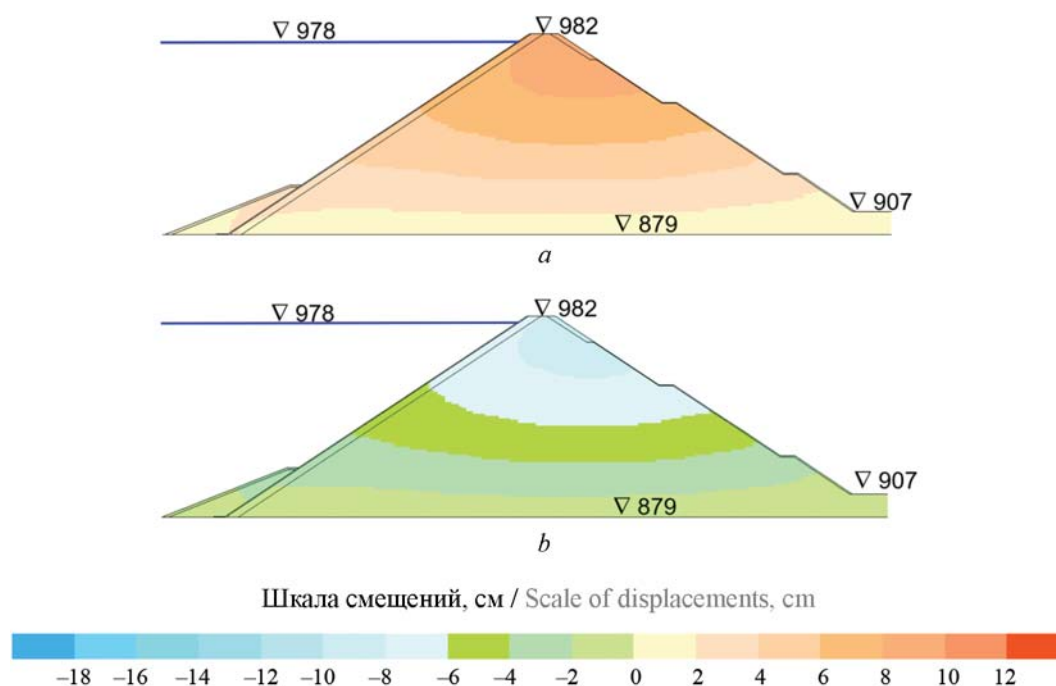


Рис. 11. Остаточные смещения плотины с бетонным экраном после землетрясения: *a* — при сейсмическом воздействии в сторону НБ; *b* — при сейсмическом воздействии в сторону ВБ

Fig. 11. Residual displacements of a dam with a concrete face after an earthquake: *a* — under the seismic impact towards the downstream; *b* — under the seismic impact towards the upstream

Оценка устойчивости откосов

Расчеты устойчивости верхового и низового откосов плотины при основном сочетании нагрузок (только при действии статических сил) показали, что запас устойчивости больше, чем нормативный (1,25) (табл. 4). Коэффициент устойчивости откосов плотины с АФД (при $m = 1,5$) составляет: верхового — 1,29, низового — 1,63. У плотины с БЭ запас устойчивости верхового откоса выше. Коэффициент устойчивости откосов плотины с БЭ: верхового — 2,36, низового — 1,64.

Опасность для обеспечения устойчивости откосов представляют сейсмические воздействия. По результатам расчетов при восприятии сейсмических сил наиболее вероятна потеря устойчивости

по незаглубленным, плоским поверхностям скольжения. По этой причине для оценки устойчивости может быть использована простая формула, позволяющая определить коэффициент устойчивости при действии сейсмических сил [19].

$$k_{уст} = \frac{(\cos \alpha - \sin \alpha \cdot a) \operatorname{tg} \varphi}{\sin \alpha + \cos \alpha \cdot a},$$

где α — угол наклона поверхности скольжения; a — отношение горизонтальной сейсмической силы к собственному весу массива обрушения или горизонтальное ускорение в долях от ускорения свободного падения; φ — угол внутреннего трения на рассматриваемой поверхности скольжения.

Табл. 4. Коэффициенты устойчивости откосов вариантов плотины

Table 4. Stability ratios for different options of dam slopes

Сочетание нагрузок Combination of loads	Основное сочетание Standard combination		Особое сочетание Special combination	
	Верховой Upper	Низовой Lower	Верховой Upper	Низовой Lower
Плотина с АФД ($m = 1,5$) Dam with an asphalt concrete diaphragm ($m = 1.5$)	1,291	1,631	0,770	0,970
Плотина с АФД ($m = 1,8$) Dam with an asphalt concrete diaphragm ($m = 1.8$)	1,441	1,658	0,824	1,146
Плотина с БЭ Concrete faced dam	2,360	1,639	1,339	0,862

Исходные данные для расчета по этой формуле могут быть приняты следующим образом. Максимально возможный угол наклона поверхности скольжения равен углу наклона откоса. При заложении откосов, равном 1,5, он составляет 33,7°. Угол внутреннего трения в горной массе для незаглубленных поверхностей скольжения можно принять 53°.

В плотине с АФД максимальное значение сейсмического ускорения составляет $A = 0,35$ g, оно больше, чем в плотине с БЭ, $A = 0,31$ g. Расчет показывает, что коэффициент устойчивости откосов при сейсмическом воздействии: в плотине с АФД — 1,00, а в плотине с БЭ — 1,08. В обоих случаях коэффициент устойчивости меньше нормативного (1,125), однако, если в плотине с АФД устойчивость не обеспечивается вовсе, то в плотине с БЭ лишь не обеспечивается запас устойчивости.

Расчеты устойчивости по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения несколько отличаются от приближенной оценки, но принципиально не изменяют сделанных выводов. По результатам расчетов для плотины с АФД (при $m = 1,5$) коэффициент устойчивости верхового откоса будет 0,77, а низового — 0,97 (рис. 12). Коэффициент устойчивости верхового откоса плотины с БЭ — 1,34, низового — 0,86 (рис. 13).

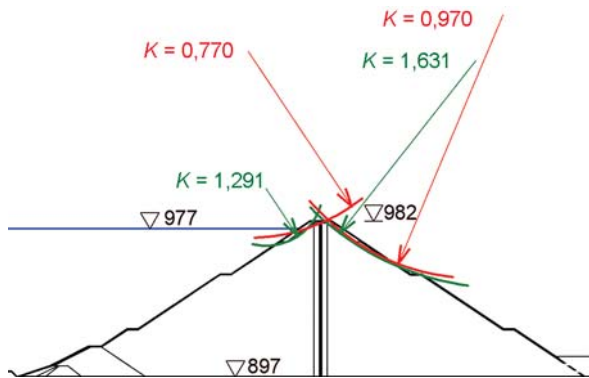


Рис. 12. Коэффициенты устойчивости откосов плотины с АФД ($m = 1,5$)

Fig. 12. Stability coefficients of slopes of a dam with an asphalt concrete diaphragm ($m = 1.5$)

Таким образом, в обоих вариантах плотины сейсмостойкость не обеспечивается, но у плотины с АФД она существенно ниже. Для обеспечения устойчивости откосов плотины должен быть изменен ее профиль. Поэтому для плотины с АФД был еще один вариант профиля, в котором верхняя часть имеет заложение откосов 1,8. Расчеты показали, что уширение профиля уменьшает максимальное сейсмическое ускорение с 0,35 до 0,32 g. Это способствует повышению устойчивости откосов.

Коэффициент устойчивости низового откоса (при направлении сейсмического воздействия в сто-

рону НБ) составил 1,15 (рис. 14). Он выше нормативного, что позволяет говорить об обеспечении необходимого уровня надежности плотины.

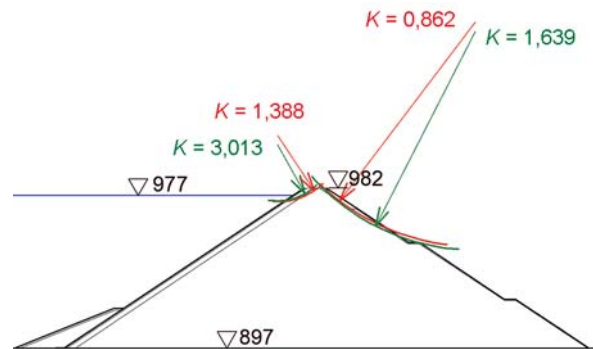


Рис. 13. Коэффициенты устойчивости откосов плотины с БЭ

Fig. 13. Stability coefficients of slopes of a concrete faced dam

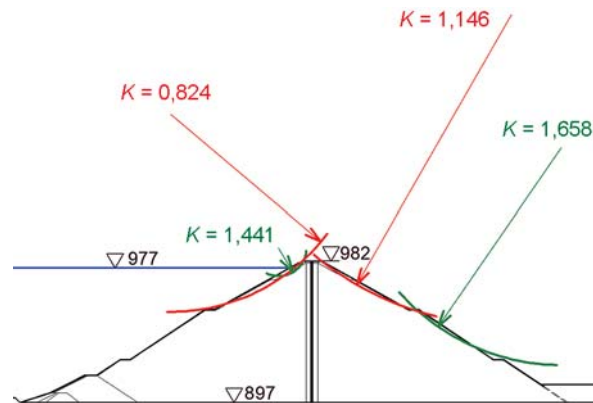


Рис. 14. Коэффициенты устойчивости откосов плотины с АФД (при заложении откосов $m = 1,8$)

Fig. 14. Stability coefficients of slopes of a dam with an asphalt concrete diaphragm (when the slopes are designed at $m = 1.8$)

Однако коэффициент устойчивости верхового откоса (при направлении сейсмического воздействия в сторону ВБ) составил лишь 0,82. Устойчивость откоса не обеспечивается из-за неблагоприятного напряженного состояния верховой упорной призмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам исследования работоспособности двух вариантов типа ПФЭ каменно-набросной плотины в рассматриваемых условиях (высота плотины 85 м, сейсмичность 9 баллов) были сделаны следующие выводы:

1. Использование в качестве ПФЭ АФД не обеспечивает сейсмостойкость плотины. При воспри-

ятии сейсмических сил в плотине с АФД могут возникать зоны потери прочности и нарушений сплошности.

2. По сравнению с плотиной АФД плотина БЭ является более работоспособной, что объясняется благоприятными условиями грунтов в ее теле. Каменно-набросная плотина с БЭ имеет меньшие деформации при восприятии нагрузок основного и особого сочетания. Но у плотины с БЭ есть существенный недостаток — недостаточная надежность ПФЭ. Для того чтобы обеспечить работоспособность плотины с БЭ, необходимо предпринять меры по снижению возможных растягивающих напряжений в экране до приемлемого уровня. К таким мерам относятся снижение деформируемости каменной наброски и увеличение толщины экрана.

3. Для строительства грунтовой плотины в рассматриваемых условиях необходимо решить проблему обеспечения устойчивости ее откосов при сейсмическом воздействии. В верхней части плотины, в которой возникают высокие сейсмические ускорения, рекомендуется выполнить откосы более пологими (заложение 1,8 и более).

4. По результатам исследований, выполненных в плоской постановке, с точки зрения надежности вариант плотины с БЭ — более предпочтительный, чем вариант с АФД. Учет пространственных условий формирования НДС может улучшить работоспособность обоих вариантов конструкции грунтовой плотины. Тем не менее следует учитывать, что в условиях узкого створа сейсмические нагрузки на плотину могут существенно возрасти.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rasskazov L.N., Borisonov P.V., Chubatov I.V. Stress-strain state in the deformation of the rogun dam during the construction Period // Power Technology and Engineering. 2018. Vol. 52. Issue 2. Pp. 172–180. DOI: 10.1007/s10749-018-0928-y
2. Yao F.-H., Guan S.-H., Yang H., Chen Y., Qiu H.-F., Ma G. et al. Long-term deformation analysis of Shuibuya concrete face rockfill dam based on response surface method and improved genetic algorithm // Water Science and Engineering. 2019. Vol. 12. Issue 3. Pp. 196–204. DOI: 10.1016/j.wse.2019.09.004
3. Ma H., Chi F. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams // Engineering. 2016. Vol. 2. Issue 3. Pp. 332–339. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.03.010
4. Wang L.-B., Yan Q. Analyze on development prospects of 300 m level ultra-high CFRD from Shuibuya high CFRD // 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2010. DOI: 10.1109/appeec.2010.5448667
5. Karlsen L.E., Krogh R.M., Johansen P.M. Dam construction for Norway's largest hydropower reservoir // International Journal on Hydropower and Dams. Issue 2 (3). Pp. 27–30.
6. Wang W., Hoeg K., Zhang Y. Design and performance of the Yele asphalt-core rockfill dam // Canadian Geotechnical Journal. 2010. Vol. 47. Issue 12. Pp. 1365–1381. DOI: 10.1139/T10-028
7. Alicescu V., Pierre Tournier J., Kara R., Rosculet D. Development of La Romaine complex in Northern Quebec, Canada; Behavior of asphalt core rockfill dams // Association of State Dam Safety Officials Annual Conference 2016, Dam Safety. 2016. Issue 1. Pp. 618–635.
8. Feng S., Wang W., Hu W., Deng Y., Yang J., Wu S. et al. Design and performance of the Quxue asphalt-core rockfill dam // Soils and Foundations. 2020. Vol. 60. Issue 4. Pp. 1036–1049. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.06.008
9. Радченко В.Г., Абрамова Е.В. Самая высокая в мире каменно-набросная плотина с асфальтобетонной диафрагмой // Гидротехника. XXI век. 2018. № 2 (34). С. 8–11.
10. Gao J., Dang F., Ma Z. Investigation for the key technologies of ultra-high asphalt concrete core rockfill dams // Soils and Foundations. 2019. Vol. 59. Issue 6. Pp. 1740–1757. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.07.013
11. Gao J., Dang F., Ma Z., Xue Y., Ren J. Improvement methods for reduction of the high stress of ultra-high asphalt concrete core dams // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Issue 21. P. 4618. DOI: 10.3390/app9214618
12. Uspenskii V.V., Kuznetsov E.I. Analysis and prediction of asphalt-concrete core wall settlement of the Boguchany HPP rockfill dam during the period of construction completion // Power Technology and Engineering. 2017. Vol. 50. Issue 5. Pp. 501–505. DOI 10.1007/s10749-017-0739-6
13. Ляпичев Ю.П., Рвигимба Ф. Расчет напряженного состояния Богучанской грунтовой плотины с применением новой двухфазной модели асфальтобетона // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2003. № 2. С. 58–61.
14. Fang C., Liu Z. Stress-strain analysis of Aikou rockfill dam with asphalt-concrete core // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2011. Vol. 3. Issue 2. Pp. 186–192. DOI: 10.3724/SP.J.1235.2011.00186
15. Hong Z., Hongyan Z., Jianke D. Nonlinear static analysis of an asphalt concrete core dam for comparison of three constitutive models // Archives of Civil Engineering. 2012. Vol. 58. Issue 4. Pp. 503–519. DOI: 10.2478/v.10169-012-0027-7
16. Wang W., Hu K., Feng S., Zhao R. A case study on asphalt core construction rate for the Zhaobishan embankment dam // Case Studies in Construction

Materials. 2020. Vol. 13. P. e00418. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00418

17. Dang F., Gao J., Yang C., Ma Z. Measures to reduce tensile stress in high asphalt concrete core walls // Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering. 2019. Vol. 38. Issue 3. Pp. 154–164.

18. Девяткин С.В., Саинов М.П. Расчетное обоснование конструкции противофильтрационной сте-

ны в основании грунтовой плотины ГЭС «Голубое озеро» // Вестник Евразийской науки. 2020. Т. 12. № 3. С. 3.

19. Кудрявцев Г.М., Саинов М.П., Куксов А.С., Пасечник К.Д. Влияние напряженного состояния каменно-набросной плотины с тонким экраном на устойчивость ее откосов // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 6. С. 139.

Поступила в редакцию 21 декабря 2020 г.

Принята в доработанном виде 15 февраля 2021 г.

Одобрена для публикации 15 февраля 2021 г.

О Б АВТОРАХ: **Алексей Анатольевич Подвысоцкий** — кандидат технических наук, начальник отдела; **Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука**; 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 51; podvisockii@hydroproject.com;

Михаил Петрович Саинов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 427608; SainovMP@mgsu.ru;

Андрей Юрьевич Кириченко — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26 ; ankirich3nko@yandex.ru.

REFERENCES

1. Rasskazov L.N., Borisonov P.V., Chubатов I.V. Stress-strain state in the deformation of the rogun dam during the construction period. *Power Technology and Engineering*. 2018; 52(2):172-180. DOI: 10.1007/s10749-018-0928-y

2. Yao F.-H., Guan S.-H., Yang H., Chen Y., Qiu H.-F., Ma G. et al. Long-term deformation analysis of Shuibuya concrete face rockfill dam based on response surface method and improved genetic algorithm. *Water Science and Engineering*. 2019; 12(3):196-204. DOI: 10.1016/j.wse.2019.09.004

3. Ma H., Chi F. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams. *Engineering*. 2016; 2(3):332-339. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.03.010

4. Wang L.-B., Yan Q. Analyze on development prospects of 300m level ultra-high CFRD from Shuibuya high CFRD. *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2010. DOI: 10.1109/appeec.2010.5448667

5. Karlsen L.E., Krogh R.M., Johansen P.M. Dam construction for Norway's largest hydropower reservoir. *International Journal on Hydropower and Dams*. 2(3):27-30.

6. Wang W., Hoeg K., Zhang Y. Design and performance of the Yele asphalt-core rockfill dam. *Canadian Geotechnical Journal*. 2010; 47(12):1365-1381. DOI: 10.1139/T10-028

7. Alicescu V., Pierre Tournier J., Kara R., Roscullet D. Development of La Romaine complex in Northern Quebec, Canada; Behavior of asphalt core rockfill dams.

Association of State Dam Safety Officials Annual Conference 2016, Dam Safety. 2016; 1:618-635.

8. Feng S., Wang W., Hu W., Deng Y., Yang J., Wu S. et al. Design and performance of the Quxue asphalt-core rockfill dam. *Soils and Foundations*. 2020; 60(4):1036-1049. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.06.008

9. Radchenko V.G., Abramova E.V. The world's tallest rock fill dam with asphalt diaphragm. *Hydraulic Engineering. XXI Century*. 2018; 2(34):8-11. (rus.).

10. Gao J., Dang F., Ma Z. Investigation for the key technologies of ultra-high asphalt concrete core rockfill dams. *Soils and Foundations*. 2019; 59(6):1740-1757. DOI: 10.1016/j.sandf.2019.07.013

11. Gao J., Dang F., Ma Z., Xue Y., Ren J. Improvement methods for reduction of the high stress of ultra-high asphalt concrete core dams. *Applied Sciences*. 2019; 9(21):4618. DOI: 10.3390/app9214618

12. Uspenskii V.V., Kuznetsov E.I. Analysis and prediction of asphalt-concrete core wall settlement of the Boguchany HPP rockfill dam during the period of construction completion. *Power Technology and Engineering*. 2017; 50(5):501-505. DOI 10.1007/s10749-017-0739-6

13. Liapichev Yu.P., Rvigimba F. Application of the new two-phase model of asphaltic concrete for analysis of behavior of the rockfill dam with asphaltic concrete core. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2003; 2:58-61. (rus.).

14. Fang C., Liu Z. Stress-strain analysis of Aikou rockfill dam with asphalt-concrete core. *Journal of*

Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2011; 3(2):186-192. DOI: 10.3724/SP.J.1235.2011.00186

15. Hong Z., Hongyan Z., Jianke D. Nonlinear static analysis of an asphalt concrete core dam for comparison of three constitutive models. *Archives of Civil Engineering*. 2012; 58(4):503-519. DOI: 10.2478/v.10169-012-0027-7

16. Wang W., Hu K., Feng S., Zhao R. A case study on asphalt core construction rate for the Zhao-bishan embankment dam. *Case Studies in Construction Materials*. 2020; 13:e00418. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00418

17. Dang F., Gao J., Yang C., Ma Z. Measures to reduce tensile stress in high asphalt concrete core walls. *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering*. 2019; 38(3):154-164.

18. Deviatkin S.V., Sainov M.P. Design validation of structural design of the seepage-control wall in the foundation of embankment dam “Blue Lake” HPP. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020; 12(3):3. (rus.).

19. Kudryavtsev G.M., Sainov M.P., Kuksov A.S., Pasechnik K.D. Influence of the stress state of a rock-fill dam with a thin screen on the stability of its slopes. *Naukovedenie Internet Journal*. 2017; 9(6):139. (rus.).

Received December 21, 2020.

Adopted in revised form on February 15, 2021.

Approved for publication on February 15, 2021.

BIONOTES: **Aleksei A. Podvysotckii** — Candidate of Technical Sciences, Head of Department; **Design and survey and research Institute Hidroproekt named after S.Ya. Zhuk**; 51 Volokolamskoe avenue, Moscow, 125993, Russian Federation; podvisockiiaa@hydroproject.com;

Mikhail P. Sainov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 427608; SainovMP@mgsu.ru;

Andrey Yu. Kirichenko — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ankirich3nko@yandex.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 005.334:69.003

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.220-241

Система ключевых индикаторов рисков изменения капитальных затрат инвестиционно-строительного проекта

Д.А. Власов^{1,2}, А.О. Габриелов¹

¹ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ «ВШЭ»);
г. Москва, Россия;*

² *Объединенная металлургическая компания (ОМК); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях нарастающей конкуренции как на внутреннем, так и на зарубежных рынках, реализации существенного количества проектов инвестиционной программы, в том числе крупных стратегических инвестиционных проектов, а также дефицита и дороговизны финансовых ресурсов, одной из ключевых задач для отечественного производственного предприятия становится снижение рисков превышения бюджета реализуемых проектов. Настоящая работа направлена на создание подхода к разработке системы ключевых индикаторов рисков (КИР) инвестиционно-строительного проекта, применение которого позволит менеджменту принимать управленческие решения заблаговременно до реализации рисков событий и тем самым повысить вероятность достижения целевых показателей бюджета капитальных затрат проекта.

Материалы и методы. Проведен анализ существующих подходов, инструментов и методов построения системы КИР. Приведена классификация рисков проекта с помощью диаграммы Ишикавы, в предложенном подходе использованы инструменты и методы теории рисков (идентификация и оценка рисков, КИР) и инструменты регрессионно-корреляционного анализа.

Результаты. Представлен алгоритм разработки системы КИР, а также предложен дифференцированный по критерию значимости проекта подход к формированию перечня КИР.

Выводы. Применение подхода позволит для проектов высокой значимости более детально и с учетом специфики формировать перечень КИР для мониторинга в ходе реализации проекта, а для прочих проектов применять стандартный набор инструментов и методов, которые требуют минимального отвлечения человеческих и временных ресурсов рабочей группы. Вместе с разработкой подхода авторами описан перечень возможных КИР изменения капитальных затрат проекта, структурированных по факторам риска.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инвестиционно-строительный проект, ключевые индикаторы риска, риск изменения капитальных затрат проекта

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Власов Д.А., Габриелов А.О. Система ключевых индикаторов рисков изменения капитальных затрат инвестиционно-строительного проекта // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 220–241. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.220-241

A system of key indicators enabling the forecasting of changes in the capital costs of a construction project

Dmitry A. Vlasov^{1,2}, Alexander O. Gabriellov¹

¹ *National Research University Higher School of Economics (HSE University); Moscow, Russian Federation;*

² *United Metallurgical Company; Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Reduction of project cost overruns is a key objective of Russian production facilities against the background of tightening domestic and international market competition, a spike in the number of projects implemented within the framework of the investment programme, including large strategic investment projects, scarcity and high costs of sources of financing. The mission of this research is to offer an approach to the development of a system of key risk indicators of an construction project that will allow the management team to make decisions ahead of the occurrence of risk-bearing events to reduce cost overruns and to stay within the pre-set budget values in terms of capital costs of a project.

Materials and methods. The co-authors have analyzed currently used approaches, instruments and methods, applicable to the development of the system of key project indicators, and classified project risks using the Ishikawa diagram. Their approach encompasses instruments and methods of the risk theory (identification and assessment of risks and key project indicators), as well as instruments of the regression correlation analysis.

Results. The co-authors present an algorithm for the development of a system of key risk indicators and an approach to the listing of key project indicators broken down by project significance criteria.

Conclusions. The application of the proposed approach to highly significant projects will ensure a detailed project-specific listing of key project indicators applicable to monitor the project implementation. A standard set of instruments and methods, requiring minimal human resources and time, can be applied to other projects. Besides the new approach, the co-authors offer a description of a list of potential key project indicators that enable to forecast changes in capital costs, broken down by risk factors.

KEYWORDS: construction project, key risk indicators, risk of changes in project capital costs

FOR CITATION: Vlasov D.A., Gabrielov A.O. A system of key indicators enabling the forecasting of changes in the capital costs of a construction project. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(2):220-241. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.220-241 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существует значительное количество инструментов и подходов, позволяющих сформировать бюджет капитальных затрат проекта, осуществлять его мониторинг, а также оценивать ключевые риски его отклонения от плановых значений, базируясь на статистической информации или экспертных оценках.

Однако, несмотря на степень проработки и планирования бюджета капитальных затрат, применение традиционных инструментов мониторинга, идентификации и анализа рисков в процессе реализации проекта, в большинстве случаев фактический бюджет претерпевает существенные отклонения от плановых значений, что в ряде случаев может приводить к приостановке проекта, невозможности реализации и даже банкротству инвестора.

В таких ситуациях важно получать заблаговременную и комплексную информацию, которая даст возможность принимать взвешенные управленческие решения, а также разрабатывать превентивные мероприятия и «гибкие» стратегии реагирования на будущие рискованные события.

Инструментом, позволяющим менеджменту получать необходимую и своевременную информацию для принятия управленческих решений, является система ключевых индикаторов рисков (далее — КИР). Благодаря ее использованию появляется возможность принимать управленческие решения не только в случае реализации рискованного события или в непосредственной близости от него, а заблаговременно в моменты «срабатывания» индикаторов и триггеров, которые сигнализируют об изменении вероятности или тяжести потенциальных последствий реализации рискованного события на рассматриваемом горизонте. М. Тисе отмечает, что разработка и внедрение КИР — один из основных способов повышения эффективности традиционных методов риск-менеджмента компании, которых в ряде случаев может быть недостаточно [1].

В рамках данной статьи авторами предлагается подход к мониторингу и контролю капитальных затрат инвестиционно-строительных проектов (ИСП), основанный на системе КИР, который должен создать предпосылки для снижения негативного влияния рисков на бюджет проекта и успешность его осуществления в целом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ рекомендаций и подходов к управлению рисками с использованием системы КИР

В настоящий момент одним из немногих отечественных источников, раскрывающих особенности построения и использования системы мониторинга рисков на основе ключевых индикаторов, являются рекомендации по стандартизации Р 50.1.090-2014¹.

Под ключевым индикатором риска понимают «количественный показатель источника (фактора) риска», мониторинг реализации которого необходимо проводить на протяжении жизненного цикла (ЖЦ) ИСП. Так, например, в качестве количественного показателя может выступать число дней, работников, денежная величина, процент, коэффициент, продолжительность или значение из заданного рейтинга или шкалы. Соответственно, на основе получаемой в ходе мониторинга КИР количественной информации, инвестор или команда управления проектом может принимать управленческие решения, позволяющие снизить вероятность и (или) последствия реализации риска, своевременно принять меры по его недопущению.

Во многих ситуациях одного индикатора может быть недостаточно для принятия управленческого решения о работе с риском, поэтому в общем случае следует говорить о системе, включающей совокупность КИР, всесторонне характеризующих складывающуюся ситуацию. А для эффективного применения такой системы требуются формализованный и исполняемый порядок мониторинга КИР, требования к источникам информации, механизмы ее сбора и обработки, определенная структура ответственных с четким описанием их ролей и обязанностей.

Согласно стандарту, главная задача при построении системы КИР — определение такого набора показателей, который предоставляет необходимую информацию о потенциальных опасных рискованных событиях, способных оказать влияние на достижение целей предприятия или проекта.

¹ Рекомендации по стандартизации Р 50.1.090-2014 «Менеджмент риска. Ключевые индикаторы риска». М.: Стандартинформ, 2015. С. 20.

Для решения данной задачи может быть использован следующий порядок действий:

- определение целей;
- выявление и анализ рисков, которые могут повлиять на достижение целей;
- определение КИР.

Для выявления эффективного набора КИР в первую очередь стоит сформировать основные цели, а также установить ключевые риски для мониторинга в ходе реализации проекта. Для ключевых рисков следует провести анализ опасных событий, т.е. определить фактор (факторы) риска, для которых в дальнейшем указать события промежуточные и первичные (ключевые индикаторы и триггеры риска). Чем ближе КИР к первопричине опасного события, тем больше времени до реализации рискового события и вероятность, что руководство сможет предпринять превентивные действия для предотвращения наступления рискового события.

На рис. 1 приведен укрупненный пример осуществления мониторинга достижения целей ресторана на основе КИР.

Авторы выделяют следующую классификацию индикаторов:

- косвенные индикаторы — позволяющие судить об изменении уровня рисков путем отслеживания косвенных событий. Например, количество платежных операций не соответствует количеству проведенных платежей;
- причинно-следственные индикаторы — связанные с первопричинами опасных событий. Например, превышение стоимости запланированных работ;
- контрольные индикаторы эффективности — необходимые для текущего мониторинга исполне-

ния регламентов или контроля исполнения нормативов. Например, доля поставщиков, использующих зашифрованную передачу данных;

- индикаторы объема — позволяют отслеживать изменение измеримых показателей. Например, количество заявок на открытие счета через интернет.

Авторы COSO [2] предложили подход, призванный помочь менеджменту в разработке эффективных КИР с целью повышения осведомленности о рисках, для увеличения эффективности процесса управления рисками предприятия и повышения вероятности реализации стратегии компании.

Авторы исследования обращают внимание на то, что необходимо различать ключевые показатели эффективности (КПЭ) и КИР. Так, КПЭ — это результаты проделанной работы за определенный период, например, объем продаж за отчетный период, объем отгрузок клиентам, количество нарушений и др. Важно понимать, что КПЭ не представляют информацию, которая может быть использована в качестве индикатора раннего предупреждения риска, так как в большинстве своем КПЭ основываются на результатах, которые уже получены. В свою очередь, КИР представляют собой метрики раннего предупреждения о повышении вероятности реализации риска в различных бизнес-процессах компании, т.е. они позволяют определить возможное недостижение требуемого значения КПЭ.

Индикатор риска сигнализирует об изменении профиля риска, его влияния и вероятности, а также возможности достижения целей, в то время как показатель эффективности разрешает оценить достижение целей [3]. L. Baker считает, что для разработки и внедрения системы индикаторов рисков

Наименование шага The name of the step	Пример Example
1 Определение целей Goal setting	<i>рост прибыли и предотвращение потерь ресторана</i> <i>restaurant profit growth and loss prevention</i>
2 Идентификация ключевых рисков и факторов рисков Identification of key risks and risk factors	<i>снижение количества посетителей и дохода ресторана (фактор риска — снижение трафика в месте расположения ресторана)</i> <i>reduction in the number of guests and restaurant revenues (the risk factor: pedestrian traffic reduction in the restaurant area)</i>
3 Определение КИР Identification of key project indicators	<i>планы по закрытию ближайших транспортных узлов (например, станции метро) или планы по проведению капитального ремонта улицы, на которой располагается ресторан</i> <i>planned shutdown of adjacent transport hubs (i.e., metro stations) or planned general overhauls in the street that accommodates the restaurant</i>
4 Мониторинг КИР, разработка мероприятий The monitoring of key project indicators, scheduling of actions	<i>отслеживание планов городского благоустройства и развития транспортной системы, развитие сервисов доставки</i> <i>tracking urban landscaping/transportation system development plans, development of delivery service systems</i>

Рис. 1. Пример формирования КИР для ресторана

Fig. 1. Development of a system of key risk indicators for a restaurant

проектов целесообразно понимать КПЭ проекта. Помимо этого, менеджеру проектов стоит понимать риски, осуществлять их мониторинг, а также вести проактивное управление для достижения планируемых значений показателей эффективности, что возможно в случае интеграции систем КПЭ проекта с системой КИР [4].

Подход COSO для построения системы КИР — это последовательность шагов, в частности определение:

- целевых показателей (например, увеличение выручки или снижение издержек);
- стратегических инициатив, необходимых для достижения целевых показателей;
- потенциальных рисков, которые могут оказывать значимое влияние на одну или все стратегические инициативы;
- метрик, которые можно использовать в качестве КПЭ выполнения стратегических инициатив.

Исследователи отмечают, что эффективный метод для разработки КПЭ заключается в анализе уже реализовавшихся рисков для выявления их:

- корневых причин;
- промежуточных событий;
- последствий реализации рисков.

В противном случае целесообразно задействовать экспертов, являющихся владельцами процессов или хорошо разбирающихся в той или иной области деятельности компании для определения «узких мест» и последующей разработки индикаторов рисков.

Система КИР позволяет увеличить вероятность достижения целей, поскольку управление рисками в таком случае осуществляется заблаговременно.

Несмотря на разработку структурированного подхода к построению системы КИР, авторы стандарта не предоставляют инструментов для определения индикаторов, влияющих на КПЭ, а также опускают рассмотрение организационных рекомендаций по внедрению и использованию системы КИР [2].

S. Scandizzo предложил подход, позволяющий в рамках бизнес-процессов предприятия выстраивать систему КИР для ключевых операционных рисков. Подход состоит из шести основных этапов:

1. Идентификация ключевых бизнес-процессов.

Бизнес-процесс должен быть представлен в глубокой детализации, начиная от организационной структуры и заканчивая конкретными деталями выполнения задач. Детализация позволяет определять критичные элементы и потенциальные

ошибки / неэффективности процессов. В конечном итоге риск-менеджер должен понимать всю последовательность процессов, а также точки принятия управленческих решений. Необходимо знать, кто является владельцем процесса, все входные и выходные данные, взаимозависимости процессов.

2. Анализ драйверов риска.

Источником возникновения риска при выполнении бизнес-процесса могут являться: персонал, процесс, техника и внешние события.

3. Анализ факторов риска.

В любом процессе разные факторы могут быть потенциальным «узким» местом. Так, например, в бэк-офисе количество компьютерной техники может быть «узким» местом, в то время как во фронт-офисе в процессе торговли критичные люди являются ключевым фактором. Таким образом, выделяются 4 фактора: количество, качество, критичность или сбой.

4. Выявление рисков.

Что может повлиять на выполнение бизнес-процесса? Ответ на данный вопрос позволяет определить риски процесса. Важное правило, которого следует придерживаться при идентификации рисков, — не исключать, на первый взгляд, маловероятные или незначительные риски. Исключать риски целесообразно только после их оценки.

5. Определение потерь и их анализ.

Данный шаг в подходе — ключевой не только в связи с последующей категоризацией и статистическим анализом потерь, вызванных реализацией риска, но и в связи с разработкой сдерживающих мероприятий. Независимо от того, как выполнен анализ потерь, на базе исторических данных или экспертных оценок, важно, чтобы полученные оценки регулярно обновлялись по мере выполнения процессов.

6. Идентификация и анализ КИР.

КИР формируются на основе предыдущих шагов, в частности, анализа драйверов рисков, самих рисков и оценки потерь от их реализации. КИР ранжируются исходя из их предиктивной способности. При этом при формировании системы КИР следует учитывать обязательные требования к входящим в нее показателям. Ключевые требования к КИР представлены в табл. 1 [5].

Вопрос достаточности индикаторов является значимым и не имеет однозначного ответа. При установлении достаточного количества индикаторов целесообразно учитывать количество и спе-

Табл. 1. Ключевые требования к КИР

Table 1. Key requirements applicable to key risk indicators

Требование Requirement	Описание Description
Релевантность Relevance	Индикаторы должны быть связаны с частотой риска и (или) последствиями его реализации Indicators must be connected with risk frequency and/or risk implementation consequences

Требование Requirement	Описание Description
Полнота Comprehensiveness	В систему КИР должны быть включены показатели, охватывающие все основные факторы риска The system of key risk indicators shall have the indicators comprising each principal risk factor
Достаточность Sufficiency	Из системы КИР должны быть исключены сильно коррелирующие индикаторы Highly correlated factors shall be excluded from the system of key risk indicators
Измеримость Measurability	Индикаторы должны, насколько это возможно, иметь объективную и независимую количественную оценку, а также быть проверяемыми The indicators shall be subject to objective and independent measurements and verifications, to the extent feasible
Своевременность Timeliness	В системе КИР должны быть индикаторы, которые возможно определить заблаговременно, до наступления рискованных событий, чтобы иметь возможность принимать превентивные управленческие решения The system of key risk indicators shall have the indicators whose values are identifiable well ahead of the occurrence of risk-bearing events, to have enough time to take preventive actions
Простота мониторинга Simple monitoring	Мониторинг индикаторов не должен быть слишком сложным и дорогим, чтобы эффект от его использования не был меньше затрат на него The monitoring of indicators shall not be too complicated and expensive, so that the cost of its application did not exceed its effect
Проверяемость Verifiability	Индикаторы и их источники должны быть правильно представлены и задокументированы Indicators and their sources shall be properly presented and documented

цифику выявленных ключевых рисков, наличие данных, необходимых для использования КИР, стоимость мониторинга и целевую аудиторию, которая будет использовать информацию².

D. Tessier считает, что система КИР должна быть простой для понимания и использования, а значит, должна быть сбалансированной по объему. Также состав КИР требуется регулярно пересматривать в целях своевременного реагирования на рыночные и операционные изменения [6].

Существуют различные классификации индикаторов рисков. Так, в статье S. Scandizzo выделяются:

- описательные индикаторы связаны с влиянием или потерями от реализации операционного сбоя. Выражаются в таких характеристиках, как размер, объем, количество. Примеры индикаторов: количество транзакций, размер активов, объем торговли;
- индикаторы выполнения показывают, насколько хорошо тот или иной процесс работает. По этой причине могут быть применены для оценки вероятности реализации того или иного операционного сбоя. Типовые примеры индикаторов выполнения: количество ошибок расчета, объем потерь, количество часов простоя системы;
- индикаторы контроля связаны с действиями менеджмента. Основная особенность индикаторов заключается в том, что менеджмент может прогно-

зировать их изменение и таким образом понимать, что будет в ближайшей перспективе. Примеры индикаторов: доля сложных продуктов в портфеле производства, возраст ИТ систем.

Описательные индикаторы в наибольшей степени ориентированы на оценку последствий риска, но обладают минимальной предиктивной способностью. Индикаторы выполнения, напротив, в большей степени направлены на вероятность, но вместе с описательными индикаторами позволяют дать оценку последствий реализации риска. Индикаторы контроля основаны на действиях менеджмента и в этой связи дают возможность оценить вероятность будущих событий исходя не из статистики, а из видения менеджеров.

Пример построения системы КИР на основе предложенного S. Scandizzo подхода приведен в табл. 2 [5].

В случае, если значение индикатора ниже ожидаемого, тогда оценка индикатора «1». За индикаторами с такими значениями необходимо продолжать наблюдать. Когда значение индикатора выше ожидаемого значения и ниже порогового, оценка индикатора «2». Данная оценка является ранним предупредительным сигналом, который характеризует, что на основе исторического опыта и оценки менеджмента текущее значение индикатора хуже ожиданий, но предпринимать управленческие решения по-прежнему не стоит. Если значение индикатора оказывается выше ожидаемого и выше порогового значения, тогда присваивается наивысшая оценка «3». Эта оценка говорит о том, что в настоящий

²Institute of Operational Risk: Key Risk Indicators. Operational Risk Sound Practice Guidance. 2010. P. 41.

Табл. 2. Фрагмент примера системы КИР для процесса проведения переговоров и заключения сделки с контрагентом (драйвер риска — персонал)
Table 2. A KRI system applicable to the process of deal negotiating and closing (personnel as the risk driver)

Фактор риска Risk factor	Риск Risk	Потери Losses	Ключевой индикатор риска Key risk indicator	Единица измерения Measurement unit	Значение Value	Изменение, % (за квартал) Change, % (quarterly)	Ожидаемое значение Anticipated value	Пороговое значение Limit value	Оценка Assessment	Вес Significance
Количество (достаточность) персонала Personnel numbers (sufficiency)	Неспособность заключить необходимое количество сделок и достичь целевых параметров Inability to close the pre-set number of deals and accomplish the pre-set objectives	Упущенная выгода/потеря клиентов Profit loss/loss	Процент не достоящего числа сотрудников работающих сотрудников The percent value of unfilled positions in respect of the total number of filled positions	%	1,5	+15	5	10	1	1
Качество (компетентный персонал) Personnel quality (competent personnel)	Потери, вызванные ошибками Losses caused by mistakes	Потеря рынка Market loss	Количество сорванных сделок The number of failed deals	#	154	+5	150	250	2	1
Критичность (ключевой персонал) Criticality (key personnel)	Потеря клиентов, вызванная потерей ключевого персонала Loss of clients caused by the loss of the key personnel	Упущенная выгода/потеря клиентов Lost profit/loss of clients	Зависимость бизнеса от персонала (например, индекс Херфиндаля) Reliance on particular employees (i.e., the Herfindahl index)	%	30	-5	20	35	2	2
Сбой (недопустимое поведение) Failure (inacceptable conduct)	Мошенничество Fraud	Прямые финансовые потери или непредвиденные потери доли рынка Direct financial losses or unpredictable market share losses	Нетипичная структура торговли, доходы выше рыночных Irregular structure of sales, revenues exceeding market figures	%	50	+75	25	40	3	3

момент ситуация выходит за рамки привычного и риск может реализоваться. Требуется детальное погружение менеджмента в текущую ситуацию.

Предложенный S. Scandizzo подход для выстраивания системы КИР операционных рисков предприятия представляет собой комплексное решение, предполагающее, в первую очередь, выделение ключевых бизнес-процессов, для каждого из которых выполняется анализ рисков и определение индикаторов рисков в разрезе четырех драйверов (персонал, процесс, техника и внешние события) и четырех факторов рисков (количество, качество, критичность и сбой). В статье приведены не только примеры построения системы КИР, но и интерпретации результатов. В целом, несмотря на то, что подход ориентирован на построение системы КИР операционных рисков, отдельные его составляющие могут быть использованы при построении системы КИР проектных рисков [5].

В дополнение к классификации, рассмотренной в статье S. Scandizzo, индикаторы бывают опережающие и запаздывающие. Первые позволяют оценить результативность управления рисками и фактический уровень их реализации, вторые — прогнозировать их возникновение в будущем на основе отслеживания факторов и тенденций их изменения. Существует проблема несбалансированности систем показателей в сторону превалирования запаздывающих, поскольку разработка и главное обоснование опережающих индикаторов — задача более сложная. Но именно наличие в системе достаточного количества опережающих индикаторов дает возможность повысить эффективность управления рисками за счет своевременного реагирования [7].

Н. Mouatassim, А. Ibenrissoul предложили подход к идентификации КИР операционных рисков. Так, подход предполагает реализацию следующих шагов:

1. Определение периметра рисков для управления. Целесообразно сосредотачиваться на ключевых рисках.

2. Определение целевой аудитории процесса управления на основе КИР. Данный шаг позволит выявить индикаторы, в наибольшей степени релевантные конечному пользователю информации.

3. Определение участников процесса генерации индикаторов ключевых рисков. В состав участников, по мнению авторов, уместно привлекать сотрудников, ответственных за отслеживание и управление рисками. Они должны быть осведомлены о целях разработки системы КИР, методологии определения индикаторов и установления пороговых значений.

4. Обучение сотрудников, участвующих в процессе генерации КИР, методологии их выявления. Данный шаг предполагает обучение сотрудников не только непосредственно порядку определения

КИР, но и основам управления рисками, терминологии, порядку презентации результатов.

5. Проведение практических семинаров по идентификации и определению пороговых значений индикаторов рисков.

В свою очередь, формирование системы КИР авторы предлагают осуществлять с учетом следующей последовательности шагов:

1. Формирование инфраструктуры автоматического сбора информации по индикаторам, для которых это применимо.

2. Проверка точности автоматического сбора данных об изменении индикаторов.

3. Определение порядка мониторинга индикаторов в ручном режиме.

4. Внедрение порядка использования КИР. Предполагается установление участников мониторинга КИР, объяснение целей процесса и возможных действий по результатам мониторинга.

5. Обучение участников процесса.

6. Постепенное масштабирование системы. Предлагается внедрять систему с пилотного проекта [8].

В соответствии с предложениями, разработанными Правительством Австралии³, регулярная отчетность по изменению КИР может быть полезна владельцам рисков, менеджерам по управлению рисками, а также членам Правления предприятия. Отчетность по КИР может быть включена в регулярный отчет по рискам для информирования и принятия управленческих решений. При подготовке отчетности рекомендуется использовать цветовую индикацию для обращения внимания участников к наиболее важным рискам.

Анализ существующих практик построения и применения систем КИР для решения задач мониторинга и контроля параметров инвестиционно-строительных проектов

Построение и использование системы мониторинга и контроля рисков, основанной на применении КИР, приходится, в основном, на капиталоемкие проекты тяжелой промышленности, реализация рисков в которых влечет значимые не только финансовые, но и репутационные, экологические и прочие последствия.

Электро- и газораспределительная компания *Midwestern Utilities* организовала комплексную систему управления рисками, в основе которой лежит метод «галстук-бабочка». После экспертного определения причин, влияющих на реализацию риска, и последствий проводится идентификация опережающих индикаторов риска. Индикаторы должны быть простыми в использовании, а также иметь метрики, позволяющие осуществлять их измерение.

³ Australian Government. Understanding and Developing Key Risk Indicators // Comcover information sheet. 2016. P. 5.

Для каждого из них эксперты устанавливают границы изменения значений в соответствии с цветовой шкалой «красный», «желтый» и «зеленый». Благодаря цветовой шкале процесс мониторинга рисков становится более наглядным и простым. Также эксперты определяют весовые приоритеты по шкале «высокая значимость», «средняя значимость» и «низкая значимость» в зависимости от влияния индикатора на вероятность реализации риска [9].

Так, исследование N. Tamim, D. Laboreurer, R. Mentzer [10] посвящено разработке системы опережающих КИР проектов бурения нефтегазовых скважин. По мнению авторов, выявление КИР, которые дадут возможность на раннем этапе выявить события, реализация которых может привести к критическим последствиям для проекта, является необходимой задачей. Определение КИР позволит принимать своевременные управленческие решения и, как следствие, снизит риск возникновения инцидентов в процессе реализации проектов.

Авторы предлагают осуществлять категоризацию индикаторов аварий и инцидентов, а также разработку индикаторов барьеров реализации рисков. Индикаторы инцидентов и аварий делятся на две группы: краткосрочные индикаторы и индикаторы долгосрочной операционной и организационной эффективности. Организационные факторы преимущественно связаны с планированием, тогда как операционные сочетают этапы планирования и выполнения работ. Исследователи указывают, что для создания целостного перечня индикаторов требуется, в первую очередь, проводить анализ причин и иницирующих событий, главным образом влияющих на отклонения стоимости проектов, для которых впоследствии разрабатываются индикаторы.

В качестве краткосрочных индикаторов они предлагают выделять группу технических (операционных) индикаторов. Приводятся такие примеры: поломка оборудования, утечка нефти, изменение плотности бурового раствора. В качестве долгосрочных индикаторов рисков выделяются группы операционных, человеческих (организационных) индикаторов, а также индикаторы системы организации. Примеры операционных индикаторов: «количество превышений операционных лимитов», «количество незапланированных изменений плотности бурового раствора». Среди примеров организационных индикаторов выделяют «количество обнаруженных несоответствий», а для индикаторов системы организации — «количество совещаний по безопасности между компаниями-партнерами», «количество отклонений от плана бурения скважины».

Барьеры, основным предназначением которых является снижение вероятности и последствий реализации рисков, делятся на операционные и организационные. К операционным барьерам могут относиться, например, инструменты и технологии, позволяющие повысить контроль за реализацией

работ проекта. К числу организационных барьеров можно отнести, например, проведение тренингов, регулярную оценку рисков, аудит, управление изменениями.

Помимо классификации индикаторов и примеров индикаторов рисков нефтегазовых проектов авторы разработали алгоритмическую схему использования системы индикаторов рисков, а также осуществили разработку опережающих индикаторов рисков для нефтегазового проекта.

J. Vinnem [11] занимался разработкой индикаторов рисков для проектов строительства морских нефтегазовых установок. В рамках своей работы он, в первую очередь, определяет требования к разработке индикаторов рисков. По его мнению, к основным критериям эффективной системы индикаторов рисков относятся:

- сочетание запаздывающих и предикативных индикаторов;
- наличие доступа ко всей необходимой информации по индикаторам;
- индикаторы интуитивно понятны;
- индикаторы не требуют сложных вычислений;
- источники информации, используемой для расчета значений индикаторов, не противоречивы;
- отражают изменение вероятности и (или) последствий рисков;
- индикаторы чувствительны к изменениям;
- отражает тенденцию;
- индикатором сложно манипулировать.

Автор предлагает подход, в основе которого лежит идентификация рисков проекта, для наиболее значимых из которых впоследствии предлагается разрабатывать систему индикаторов. Для совершенствования системы индикаторов рисков, в свою очередь, целесообразно осуществлять регулярный аудит посредством электронного опроса экспертов и участников проекта.

Исследование J. Sipila, P. Auerkari, S. Holmstrom [12] направлено на выявление опережающих индикаторов природно-климатических, организационных, человеческих рисков проекта строительства подземного хранилища угля. Путем использования метода экспертных оценок разрабатывается перечень опережающих индикаторов, каждый из которых поддается количественной оценке. Например, для риска самовоспламенения угля предлагается индикатор «хранение угля дольше года» или «увеличение температуры угля более 40 градусов». Каждый из предложенных индикаторов является предикативным и простым для мониторинга, а значит, может быть использован в проекте.

В работе M.R. Hallowell, J.W. Hinze, K.C. Baud [13], ориентированной на повышение безопасности строительства объектов, предложен перечень опережающих индикаторов рисков. Помимо наименований опережающих индикаторов, авторы ука-

зывают способы измерения их значений, а также предоставляют информацию об источниках информации для расчетов значений индикаторов рисков. Выбор индикаторов осуществлен на основе сбора и анализа первичной и вторичной информации различными качественными методами. Исследовано 19 кейсов, проведен контент-анализ 14 докладов проектов по безопасности, а также неоднократно использован метод мозгового штурма с 25 экспертами по промышленной безопасности, которые являлись подрядчиками/субподрядчиками или поставщиками. Стоит заметить, что при изучении кейсов авторы задавали вопросы, касающиеся следующих тем:

- помимо предоставления статистики травм и инцидентов, как вы измеряете эффективность безопасности и осуществляете мониторинг системы безопасности?
- как вы узнаете, в каком состоянии находится система безопасности проекта в настоящее время, если не опираться на статистику?

Индикаторы на основе 14 докладов определялись путем анализа описаний проектов, а также усилий, предпринимаемых для предотвращения инцидентов в процессе строительства. Впоследствии на основе результатов анализа докладов, а также использования метода мозгового штурма эксперты сгенерировали 50 КИР. В дальнейшем были отобраны наиболее значимые индикаторы таким образом, что каждому эксперту предлагали независимо и анонимно выбрать 10 наиболее релевантных индикаторов из предложенного списка. На следующем шаге проводилось обсуждение в кругу экспертов, цель которого прийти к единому и обоснованному перечню индикаторов рисков. Индикаторы отображены по следующим критериям:

- индикатор направлен на прогнозирование изменения риска;
- индикатор является измеримой формой усилий, которые многие подрядчики и собственники уже осуществляли, но не отслеживали и не измеряли;
- совокупность индикаторов покрывает исследуемые риски проекта.

Авторы утверждают, что метод мозгового штурма в рамках исследования применен по причине того, что фактически отсутствуют практики разработки системы опережающих индикаторов рисков в строительной промышленности, а значит, отсутствуют необходимые статистические данные. Эксперты осуществляли идентификацию и описание потенциальных опережающих индикаторов, планировали, как можно измерить индикаторы, а также разрабатывали план действий в случае их срабатывания.

Таким образом, авторы приведенных выше исследований сходятся во мнении, что, в первую очередь, целесообразно осуществлять анализ рисков проектов, для наиболее значимых из которых

впоследствии необходимо разрабатывать ключевые индикаторы. Однако общим недостатком указанных работ является качественная обоснованность выбора индикаторов рисков, а также отсутствие возможности прогнозировать капитальные затраты проекта.

В отличие от вышеприведенных трудов, Shahandashti [14] провел исследование, в результате которого на основе количественных методов обработки данных и прогнозирования сформировал перечень индикаторов рисков, а также разработал модель для прогнозирования индекса затрат на строительство (Construction Cost Index). Индекс затрат на строительство представляет собой взвешенную сумму средних значений цен стоимости труда, стали, цемента и пиломатериалов в 20 городах США. В рамках своей работы автор ставит следующие цели:

- идентифицировать опережающие макроэкономические и рыночные индикаторы индекса затрат на строительство;
- разработать модель, которая позволяла бы использовать ретроспективную информацию об изменении индекса затрат на строительство и значения опережающих индикаторов для прогнозирования индекса затрат на строительство.

В первую очередь, автор путем проведения литературного обзора выделил 16 индикаторов рисков, которые отражают национальные макроэкономические условия, энергозатраты и маркетинговые условия реализации проекта строительства, а именно:

- ставка кредита;
- количество строящихся новых объектов;
- количество разрешений на строительство;
- уровень безработицы;
- индекс потребительских цен;
- индекс цен производителей;
- валовый внутренний продукт (далее — ВВП);
- неявный ценовой дефлятор ВВП;
- денежная масса;
- расходы на строительство;
- ставка по федеральным фондам;
- индекс Dow Jones (Industrial);
- цена нефти;
- уровень занятости в строительстве;
- среднечасовая заработная плата;
- среднее количество часов в неделе.

Впоследствии путем проведения корреляционного анализа динамики индекса затрат на строительство с каждым из выше представленных индикаторов рисков автор подтвердил, что данные индикаторы имеют тесную связь с индексом затрат на строительство, а значит, могут рассматриваться в качестве предварительного перечня индикаторов рисков. Результаты теста Грейнджера показали, что индекс потребительских цен, стоимость нефти и индекс цен производителей имеют высокую корреляцию с индексом затрат на строительство, причем во всех сценариях лагов. Автор сделал вывод

о возможности использования данных индексов в качестве индикаторов рисков для прогнозирования индекса затрат на строительство. Также количество разрешений на строительство и количество строящихся объектов влияют на индекс затрат на строительство в краткосрочном периоде (с незначительным лагом), следовательно, они также могут применяться в качестве опережающих индикаторов.

В результате проведения исследования автор с использованием метода коррекции ошибок разработал модель, которая на основе значений индикаторов, а именно индекса потребительских цен и индекса цен производителей, позволяет прогнозировать индекс затрат на строительство.

В. Сизикова, В. Гаврилина, В. Битюцкий [15] предложили подход к построению и применению системы КИР для управления операционными банковскими рисками.

В соответствии с подходом, в первую очередь стоит получить оценки индексов КИР отдельных бизнес-линий (например, корпоративное финансирование, торговля и продажи, розничные банковские операции, коммерческие банковские операции, платежи и расчеты, агентские услуги, управление

активами, розничные брокерские услуги), которые впоследствии с использованием предопределенных весовых коэффициентов агрегируются для получения оценки общего индекса.

Предполагается, что система КИР каждой бизнес-линии должна включать в себя оценки КИР в четырех группах:

- кадры (отражает риски, связанные с сотрудниками);
- системы (отражает риски, связанные со сбоями систем и непрерывностью бизнеса);
- процессы (отражает риски, связанные с внутренними банковскими процессами);
- внешние (отражает риски, связанные с внешними для банка событиями/процессами).

Значимость каждой из групп зависит от уровня потерь, присущего группе. Потери оцениваются либо на основе внутренней информации по убыткам, либо на основе экспертного мнения (например, владельцем бизнес-линии).

В табл. 3 приведен фрагмент системы КИР для бизнес-линии [15].

Рассмотренные теоретические подходы и практические решения построения систем КИР преиму-

Табл. 3. Фрагмент системы КИР

Table 3. An excerpt from the KRI system

Наименование группы индексов КИР A group of KRI indexes	Наименование КИР KRI type	Единица измерения Measurement unit	Алгоритм расчета Calculation algorithm
Кадры Personnel	Коэффициент текучести кадров Personnel turnover ratio	Соотношение, % Ratio, %	Число сотрудников, уволившихся за последние 12 месяцев, к общему числу сотрудников (средний показатель за последние 12 месяцев). При этом возможно расставить разные пороговые значения в зависимости от департамента (например, для колл-центра допустимые значения текучести кадров будут выше, чем для риск-менеджмента) The number of employees who left the company during the last 12 months in relation to the total number of employees (the average 12-month indicator). Different limit values may be applicable to different departments (i.e., the values of the personnel turnover will be higher for the call center than those applicable to the risk management staff)
Процессы Processes	Процент выявленных ошибок в общем количестве операций The percent of identified mistakes in relation to the total number of operations, in %	Соотношение, % Ratio, %	Количество операций с ошибками к общему количеству операций (за последние 12 месяцев) The number of faulty operations versus the total number of operations (within the last 12 months)

Наименование группы индексов КИР A group of KRI indexes	Наименование КИР KRI type	Единица измерения Measurement unit	Алгоритм расчета Calculation algorithm
Системы Systems	Время простоя сервера The out-of-service time of the server	Часы Hours	Время простоя, умноженное на критичность данных часов, за последние 12 месяцев The out-of-service time multiplied by the criticality of these hours within the last 12 months
Внешние External	Число успешных вирусных атак The number of successful virus attacks	Количество Quantity	Число зафиксированных хакерских/вирусных атак на банковские системы за последние 12 месяцев The number of registered cyber/virus attacks on banking systems within the last 12 months

щественно направлены на выстраивание системы КИР для достижения целей проектов или текущей деятельности. Данные подходы предполагают выполнение определенной последовательности шагов, при этом авторы не упоминают об инструментах и методах для возможности их практического использования, как, например, инструменты и методы идентификации рисков или индикаторов, методы определения граничных значений индикаторов, вопросы частоты мониторинга КИР и организационные модели. Более того, авторами предложены критерии обязательного соответствия индикаторов для построения эффективной системы КИР, однако упущены из анализа вопросы определения достаточного набора КИР. Также остается открытым вопрос целесообразности применения индикаторов рисков для всех проектов инвестиционной программы предприятия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построение системы мониторинга и контроля капитальных затрат инвестиционно-строительного проекта на основе ключевых индикаторов рисков

Система мониторинга и контроля капитальных затрат ИСП на основе КИР должна охватывать все стадии его ЖЦ, поскольку на каждой из них могут появляться, усиливаться и реализовываться критичные для размера капитальных затрат и успешности проекта в целом риски.

Существуют различные подходы к выделению стадий ЖЦ ИСП. Так, в практике реализации ИСП зачастую можно встретить выделение трех этапов [16]:

- предынвестиционный этап;
- инвестиционный этап;
- этап эксплуатации объекта.

В статье D. Willar, E. Waney, N. Senduk представлены 4 основные стадии инфраструктурного проекта [17]:

- планирование проекта;
- выбор поставщиков услуг;
- строительство;
- сдача строительного объекта.

По мнению автора, стадии ЖЦ проекта могут различаться в зависимости от масштаба проекта и модели его выполнения.

В исследовании А.А. Морозенко рассматривается следующая декомпозиция типового ИСП [18]:

- подготовка проекта;
- проектирование;
- строительство.

Особую важность должен иметь первый этап, на котором осуществляется проработка инвестиционной идеи проекта, оценка ее экономической перспективности, выгод и рисков. Только после подтверждения экономической целесообразности проекта осуществляется переход на этап проектирования. На данном этапе выполняется детальная проработка проекта, в которую входит разработка проектно-сметной документации, а также определение условий строительства, в частности, выявление ресурсной базы строительства, решение логистических задач, связанных со строительством. После завершения проектирования следует этап строительства [18].

В рамках данной статьи рассматриваются стадии проработки и реализации проекта. Так, на стадии проработки основными задачами являются определение варианта реализации, целевых значений бюджета и сроков реализации, формируются требования к результату проекта, ведется оценка экономического эффекта и рисков проекта. На стадии реализации проекта проводятся планирование и выполнение проектно-исследовательских, строительного-монтажных

работ, работ по выбору и поставке оборудования, пусконаладочных работ проекта. Описываемые в статье стадии идентичны стадиям ЖЦ, представленным в публикации А.А. Морозенко, однако стадия проектирования включена в стадию реализации проекта.

Для разработки КИР предполагается использование подхода, дифференцированного по критерию значимости проекта для предприятия. Целесообразность дифференцированного подхода обоснована необходимостью длительного и детального изучения предстоящих работ и погружения в специфику проектов, что сложно выполнимо для всех проектов инвестиционной программы в связи с ограниченностью человеческих и финансовых ресурсов предприятия, длительностью настройки системы КИР для кон-

кретного проекта и неоправданностью затрат на эту работу в сравнении с возможным влиянием таких проектов на показатели компании в целом.

В общем виде подход к определению КИР представлен в табл. 4.

Первоочередными и обязательными задачами до перехода к разработке системы КИР являются идентификация и анализ рисков изменения капитальных затрат проекта, определение факторов рисков желтой зоны. В рамках статьи данные вопросы детально не рассматриваются.

На рис. 2 приведены основные возможные риски изменения капитальных затрат проекта в разрезе стадий ЖЦ.

Ядром предложенного подхода по разработке системы КИР являются шаги:

Табл. 4. Подход к построению системы КИР проекта

Table 4. An approach to the design of the KRI system

Номер п/п Item number	Наименование шага Step number	Характеристика шага Step characteristics
1	Определение значимости проекта Project significance identification	<p>Проект относится к значимым, если соответствует одному из критериев:</p> <ul style="list-style-type: none"> • включен в перечень приоритетных проектов предприятия; • относится к категории проектов с высоким бюджетом; • привлечено льготное финансирование (например, финансирование фонда развития промышленности); • обладает технической новизной (отсутствие компетенций рабочей группы по строительству объектов или закупаемому в рамках проекта оборудованию) <p>The project is considered significant, if it meets one of the following criteria:</p> <ul style="list-style-type: none"> • listed as a top-priority corporate project; • included into the category of high budget projects; • a low-interest investment project (i.e., if the funding is provided by an industrial development fund); • a technologically advanced project (the work group in charge of construction works and project equipment purchase do not have sufficient competencies)
2	Идентификация рисков Identification of risks	<p>Формирование реестра возможных рисков проекта с использованием доступных источников информации (мнение экспертов, база накопленного опыта, внешние ресурсы)</p> <p>Listing potential project-related risks using public sources of information (expert opinions, expertise, independent resources)</p>
3	Оценка рисков проекта Project risk assessment	<p>Осуществление качественной оценки рисков проекта, составление перечня рисков в разрезе зон (красная, желтая, зеленая).</p> <p>Для рисков красной зоны следует разрабатывать и реализовывать мероприятия по снижению.</p> <p>Для рисков желтой зоны целесообразно формировать систему КИР</p> <p>The qualitative assessment of project risks, making lists of project risks broken down by risk zones (red, yellow, green).</p> <p>Red zone risks need immediate development and implementation of actions aimed at risk mitigation.</p> <p>Yellow zone risks need a system of KRIs to be developed</p>

Номер п/п Item number	Наименование шага Step number	Характеристика шага Step characteristics
4	Определение перечня возможных индикаторов рисков Listing potential risk indicators	Выполнение шага необходимо для формирования полного перечня индикаторов рисков желтой зоны проекта. Рациональные к применению инструменты и методы зависят от значимости проекта This step allows to make an exhaustive list of yellow zone risk indicators for a project. Rational instruments and methods to be applied depend on project significance
5	Оценка релевантности КИР KRI relevance assessment	Выполнение шага требуется для исключения из дальнейшего анализа: <ul style="list-style-type: none"> • КИР, не имеющих или имеющих слабую связь с риском; • сильно коррелирующих КИР. Целесообразные к применению инструменты и методы зависят от значимости проекта и доступности ретроспективных данных по изменению КИР This step is needed to exclude the following variables from any further analysis: <ul style="list-style-type: none"> • KRIs having no or insignificant relation to risks; • Highly correlated KRIs. Expedient instruments and methods depend on project significance and accessibility of historical data needed to change the KRI values
6	Формирование системы КИР KRI system compilation	КИР, включаемые в систему, должны быть релевантными, измеримыми, простыми для мониторинга. Количество используемых индикаторов должно быть достаточным. Помимо определения КИР, необходимо определить порядок их мониторинга KRIs, entered into the system, must be relevant, measurable and easily traceable. The number of indicators must be sufficient. The monitoring procedure must be developed apart from the identification of KRIs
7	Мониторинг и совершенствование системы КИР KRI system monitoring and improvement	Целесообразность данного шага заключается в анализе релевантности, достаточности, простоты мониторинга КИР, а также совершенствовании порядка мониторинга индикаторов The expediency of this step consists in the analysis of the relevance, sufficiency, KRI monitoring procedure simplicity, as well as the improvement of the monitoring procedure applicable to indicators

- определение перечня возможных индикаторов рисков;
- оценка релевантности КИР;
- формирование системы КИР.

Предлагаемые авторами статьи инструменты и методы для реализации указанных шагов показаны в табл. 5. В качестве источника возможных инструментов управления рисками был использован ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011⁴.

В рамках шагов подхода для проектов высокой значимости представлен набор инструментов, методов и принципов. В зависимости от наличия ресурсов (информационных, человеческих, времен-

ных и т.д.) перечень применяемых инструментов на шаге 1 для проекта может быть скорректирован. Для прочих проектов приведен минимальный и достаточный набор инструментов и методов на каждом этапе подхода.

Рассмотренный дифференцированный подход в отличие от подходов, приведенных в исследованиях авторов аналогичных работ, предлагает набор конкретных инструментов и методов, а также принципов, применение которых позволит для проектов высокой значимости более детально и с учетом специфики формировать перечень КИР для мониторинга в ходе реализации проекта, а для прочих проектов представлен стандартный набор инструментов и методов, которые требуют минимального отвращения человеческих и временных ресурсов.

⁴ ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска. М. : Стандартинформ, 2012. 74 с.

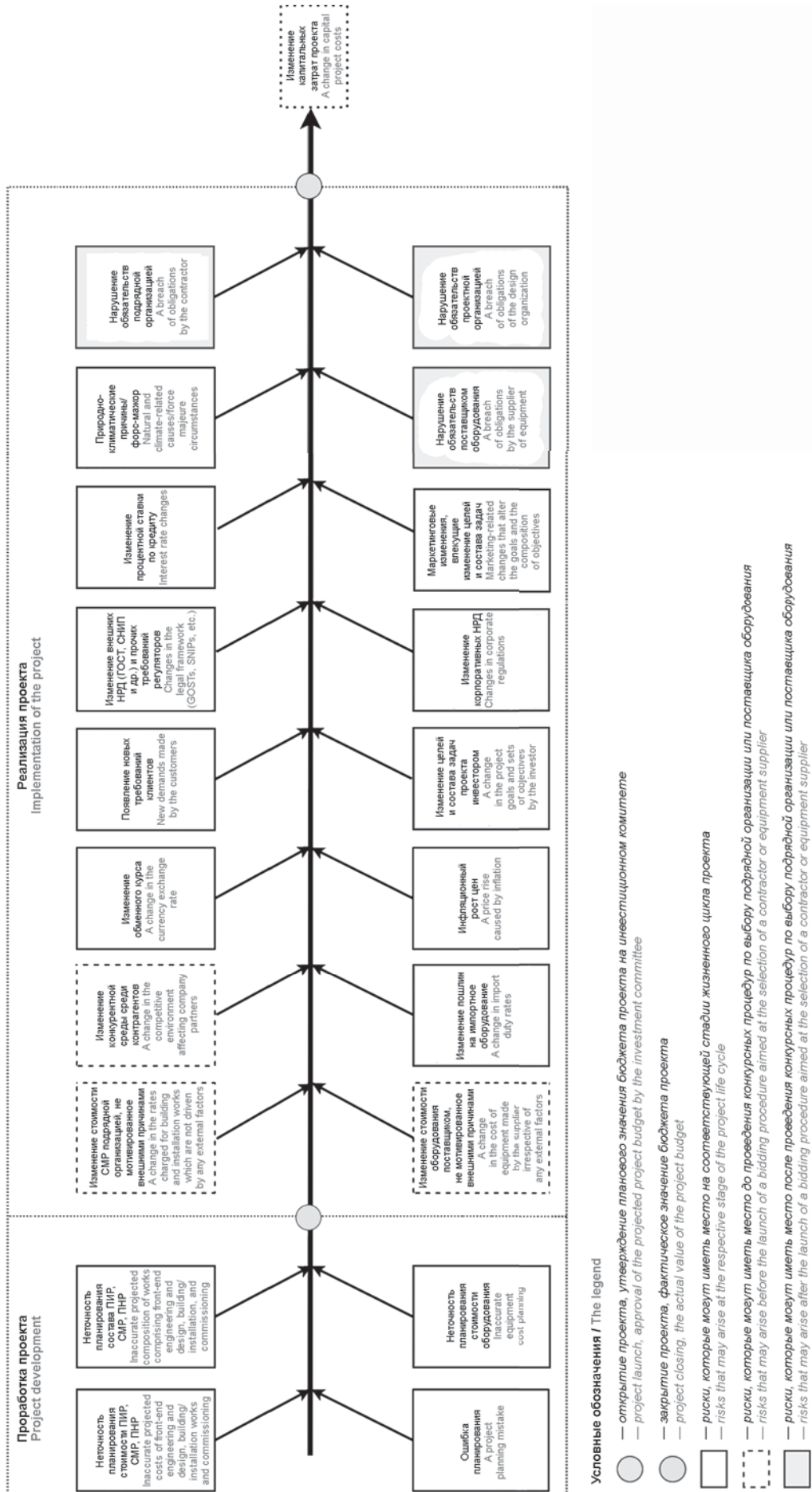


Рис. 2. Основные возможные риски изменения капитальных затрат ИСП
Fig. 2. Key potential risks of changes in the capital costs of an construction project

Табл. 5. Подход к определению КИР факторов рисков проекта желтой зоны
Table 5. An approach to the identification of yellow zone KRIs

Номер п/п Number	Наименование шага Step name	Описание шага (для проектов высокой значимости) Step description (for highly significant projects)	Описание шага (для прочих проектов) Step description (for other significant projects)	Ожидаемый результат Anticipated result
1	Определение перечня возможных КИР Making a list of potential KRIs	<p>Инструменты:</p> <ul style="list-style-type: none"> • мозговой штурм/метод SWIFT; • структурированное интервью/опросы/анкетирование; • анализ документации, в том числе иерархической структуры работ проекта, результатов планирования (предпроектной проработки); • контрольные списки (типовой перечень факторов рисков и соответствующих КИР), перечни-подсказки (PESTLE, SPECTRUM, TECOP) <p>Instruments:</p> <ul style="list-style-type: none"> • brainstorming/SWIFT method; • structured interview/polls/questionnaire surveys; • the analysis of documents, including the analysis of hierarchized project works and planning outcomes (feasibility study); • check lists (a standard list of risk factors and KRIs), lists that serve as tips (PESTLE, SPECTRUM, TECOP) 	<p>Инструменты:</p> <ul style="list-style-type: none"> • контрольные списки (типовой перечень факторов рисков и соответствующих КИР); • перечни-подсказки (PESTLE, SPECTRUM, TECOP); • мозговой штурм <p>Instruments:</p> <ul style="list-style-type: none"> • check lists (a standard list of risk factors and KRIs); • lists that serve as tips (PESTLE, SPECTRUM, TECOP); • brainstorming 	Перечень возможных КИР A list of potential KRIs
2	Оценка релевантности КИР KRI relevance assessment	<p>Инструменты и методы:</p> <p>имеются ретроспективные данные или известна зависимость изменения индикаторов и капитальных затрат проектов:</p> <ul style="list-style-type: none"> • корреляционно-регрессионный анализ; • анализ чувствительности; <p>отсутствуют ретроспективные данные или неизвестна зависимость изменения индикаторов и капитальных затрат проектов:</p> <ul style="list-style-type: none"> • экспертные оценки специалистов <p>Instruments and methods:</p> <p>historical data is available or dependence of changes in indicators and capital costs is identified:</p> <ul style="list-style-type: none"> • regression correlation analysis; • sensitivity analysis; <p>historical data is not available or dependence of changes in indicators and capital costs is not identified:</p> <ul style="list-style-type: none"> • expert opinions issued by specialists 	<p>Инструменты:</p> <ul style="list-style-type: none"> • экспертные оценки специалистов <p>Instruments:</p> <ul style="list-style-type: none"> • expert opinions issued by specialists 	Перечень релевантных КИР A list of relevant KRIs

3	<p>Формирование системы КИР Formation of a system of KRIs</p>	<p>Основные принципы отбора КИР для формирования системы:</p> <ul style="list-style-type: none"> • релевантность: индикаторы должны иметь логическую/корреляционную и логическую/математическую связь; • измеримость: индикаторы должны иметь объективное количественное измерение; индикаторы должны быть проверяемыми; • простота мониторинга: мониторинг индикаторов не должен быть сложным и дорогим; • достаточность: исключение взаимозаменяемых и коррелирующих индикаторов <p>The main principles underlying the selection of KRIs for the system:</p> <ul style="list-style-type: none"> • relevance: indicators must have logical/correlational and logical/mathematical connections; • measurability: indicators must be objectively measurable; indicators must be verifiable; • monitoring simplicity: the monitoring of indicators must be neither difficult, nor expensive; • sufficiency: no interchangeable or correlated indicators 	<p>Основные принципы системы:</p> <ul style="list-style-type: none"> • релевантность: индикаторы должны иметь логическую связь; • измеримость: индикаторы должны иметь объективное количественное измерение; • простота мониторинга: мониторинг индикаторов не должен быть сложным и дорогим; • достаточность: исключение взаимозаменяемых индикаторов <p>Basic principles of the system:</p> <ul style="list-style-type: none"> • relevance: indicators must be logically binding; • measurability: indicators must be objectively measurable; indicators must be verifiable; • simple monitoring: the monitoring of indicators must be neither difficult, nor expensive; • sufficiency: no interchangeable or correlated indicators 	<p>Перечень КИР List of KRIs</p>
---	--	---	---	--------------------------------------

В табл. 6 приведены возможные варианты индикаторов рисков, влекущих изменения капитальных затрат проекта. Набор индикаторов рисков может варьироваться в зависимости от конечного пользователя. Указанные в табл. 6 возможные индикаторы рисков целесообразно использовать руководителю проекта в ходе его реализации.

Стоит заметить, что отклонения на этапе реализации проекта могут происходить как по причинам, возникшим непосредственно на стадии реализации проекта, так и по причинам, которые имели место при проработке проекта. В табл. 6 рассмотрены риски и индикаторы, имеющие различную природу возникновения.

По результатам выявления КИР проекта необходимо определить порядок их мониторинга, который включает:

- организационную модель разработки и мониторинга КИР;
- граничные значения изменения индикаторов;
- источники информации для мониторинга и контроля КИР;
- периодичность мониторинга КИР;
- порядок проверки релевантности выявленных ранее связей;

- порядок агрегирования индикаторов для предоставления информации топ-менеджменту;
- формат отчетности по результатам регулярного мониторинга для разных заинтересованных сторон (руководитель проекта; топ-менеджмент предприятия).

Разработанный подход требует апробации и дальнейшей проработки в части вопросов установления целесообразности использования тех или иных КИР в целях прогнозирования изменения значения риска и решения вопросов, связанных с порядком мониторинга КИР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При осуществлении инвестиционной деятельности в условиях реализации множества проектов инвестиционной программы значимым вопросом является недопущение увеличения стоимости капитальных вложений, которое может повлиять не только на достижение параметров эффективности отдельных проектов, но в ряде случаев привести к потере позиции предприятия на рынке или снижению устойчивости.

Табл. 6. Перечень возможных индикаторов рисков, влекущих изменение капитальных затрат проекта

Table 6. The list of potential risk indicators that may cause changes in project capital expenditure

Номер п/п Number	Наименование риска Risk type	Наименование фактора риска Risk factor	Наименование возможных индикаторов Potential indicators
1	Неточность планирования состава ПИР, СМР проекта Inaccurate projected composition of works comprising front-end engineering and design, building/installation within the framework of the project	Неточность экспертных оценок Inaccurate expert opinions	Процент запланированных работ с использованием проектов-аналогов к общему объему работ проекта Percent of scheduled items of work using similar projects in respect of the total amount of the project work
			Число проведенных совещаний с участием специалистов рабочей группы по определению состава СМР проекта Number of meetings held, if attended by work group specialists focused on the listing of construction and installation works
			Наличие навязанной даты окончания предпроектной проработки и вынесения проекта на инвестиционный комитет The feasibility study completion date and the date of the project presentation to the investment committee are imposed and unrealistic
		Неточность в выборе проекта-аналога при определении состава СМР проекта Inaccurate choice of a similar project selected as a benchmark for constructing and installation works	Процент работ текущего проекта, идентичных работам проекта-аналога Percent of works comprising the current project, identical to those of a similar project

Продолжение табл. 6 / Continuation of Table 6

Номер п/п Number	Наименование риска Risk type	Наименование фактора риска Risk factor	Наименование возможных индикаторов Potential indicators
1	Неточность планирования состава ПИР, СМР проекта Inaccurate projected composition of works comprising front-end engineering and design, building/installation within the framework of the project	Недостаточная детализация состава СМР проекта Insufficiently elaborated composition of construction and installation works	Процент работ проекта, спланированных укрупненно Percent of project works scheduled in less detail
			Средний процент отклонения стоимости согласно ТКП подрядных организаций от стоимости ТКП, имеющего медианную стоимость The average cost discrepancy (in %) between the one in the request for proposal filed by potential contractors, and the one specified in the request for proposal that has a median value
2	Неточность планирования стоимости ПИР, СМР, оборудования проекта Inaccurate projected costs of project engineering/surveying/construction/installation works/equipment	Неточность планирования стоимости СМР, вызванная использованием норм ГЭСН Inaccurate projected costs of construction and installation works due to the employment of State Itemized Construction Estimates	Число месяцев с момента последнего обновления норм ГЭСН Number months since the most recent revision of State Itemized Construction Estimates
		Недостаточная детализация технического задания на ПИР, СМР, поставку оборудования Insufficiently detailed request for proposal in terms of engineering/surveying/construction/installation works	Процент работ проекта, спланированных укрупненно Percent of works scheduled with insufficient attention to detail Средний процент отклонения стоимости согласно ТКП контрагентов от стоимости ТКП, имеющего медианную стоимость The average discrepancy (in %) in the project costs specified in the request for proposal filed by potential project partners and in the request for proposal that has a median value
		Конкурентное поле поставщиков оборудования/подрядных организаций The competitive field of equipment suppliers	Наличие навязанной даты окончания предпроектной проработки и вынесения проекта на инвестиционный комитет The feasibility study completion date and the date of the project presentation to the investment committee are imposed and unrealistic Количество подрядных организаций/поставщиков, зарегистрированных в базе подрядных организаций/поставщиков предприятия Number of contractors/suppliers in the database of contractors/suppliers of the company
3	Ошибка планирования состава работ и стоимости (человеческий фактор)	Нарушение требований нормативно-регламентирующих документов (ГОСТ, СНиП, внутренние регламенты, распоряжения)	Число проектов, находящихся на одновременной проработке специалиста

Продолжение табл. 6 / Continuation of Table 6

Номер п/п Number	Наименование риска Risk type	Наименование фактора риска Risk factor	Наименование возможных индикаторов Potential indicators
3	A mistake in the list of work items and costs (human error)	A breach of applicable regulatory documents (GOSTs, SNIPs, local legal acts and memorandums)	Number of projects analyzed by one specialist at a time
4	Нарушение обязательств подрядной организацией A breach of responsibilities by the contractor	Существенное затягивание подрядной организацией сроков выполнения СМР проекта (как следствие, поиск нового подрядчика) The failure by the contractor to meet the deadlines of construction and installation works (and respective search for a new contractor)	Среднее число специалистов, задействованных на проекте в разрезе видов работ (в течение периода) Average number of specialists involved in the project broken down by the types of assignments (within a certain period)
			Среднее число часов работы специалистов, задействованных на проекте в разрезе видов работ (в течение периода) Average number of working hours of specialists involved in the project broken down by the types of work (within a certain period)
			Число существенных затягиваний выполнения задач подрядчиком на прошлых проектах в рамках предприятия Number of contractor's failures to meet the deadlines in the course of prior projects
5	Нарушение обязательств подрядной организацией/ поставщиком оборудования/ проектировщиком A breach of responsibilities by the contractor/equipment supplier/design company	Банкротство контрагента The bankruptcy of a partner	Процент изменения значения Z-оценки Альтмана (или другого индикатора кредитоспособности) относительно значения, рассчитанного во время тендерной процедуры A percent change in the Altman Z score (or any other solvency indicator) in relation to the value obtained in the course of bidding
			Процент общего числа специалистов подрядной организации к количеству параллельно реализуемых проектов на предприятии Percent of the total number of specialists employed by the contractor to the number of projects simultaneously implemented by the company
6	Нарушение обязательств поставщиком оборудования A breach of responsibilities by the equipment supplier	Поставка оборудования с техническими характеристиками, отличными от указанных в техническом задании Supply of equipment whose specifications differ from those specified in the request for proposal	Число выездов поставщика оборудования на площадку будущего монтажа оборудования до начала проектирования Number of visits to the equipment installation site by the equipment supplier before the commencement of the design process
		Существенное затягивание проектирования (как следствие, поиск нового поставщика оборудования)	Число дней отклонения выполнения работ по проектированию согласно плана-графика проекта

Окончание табл. 6 / End of Table 6

Номер п/п Number	Наименование риска Risk type	Наименование фактора риска Risk factor	Наименование возможных индикаторов Potential indicators
6	Нарушение обязательств поставщиком оборудования A breach of responsibilities by the equipment supplier	A failure to meet the design deadlines (and consequent search for a new equipment supplier)	Number of days of failure to comply with the schedule of design works pursuant to the project schedule
		Увеличение рублевой стоимости оборудования A rise in the cost of equipment in RR (Russian rubles)	Процент изменения валютного курса в период после подписания договора поставки Percent of the currency rate change in the aftermath of the supply agreement execution

В настоящий момент на многих отечественных производственных предприятиях внедрена и используется методология, позволяющая на регулярной основе идентифицировать и анализировать риски инвестиционных проектов, разрабатывать корректирующие мероприятия. Тем не менее зачастую бюджет проекта, включая капитальные затраты, претерпевает изменения в процессе реализации.

В рамках исследования представлен порядок основных шагов разработки системы КИР:

- определение значимости проекта;
- идентификация рисков;
- оценка рисков проекта;
- определение перечня возможных индикаторов рисков;
- оценка релевантности КИР;
- формирование системы КИР;
- мониторинг и совершенствование системы КИР.

Для каждого из указанных шагов приведена описательная характеристика, указаны особенности реализации шага. Ядром предложенного подхода по разработке системы КИР являются шаги по выявлению перечня возможных индикаторов рисков, оценки релевантности и формированию системы КИР. Так, различный набор инструментов и методов при формировании перечня КИР предлагается для проектов высокой значимости и прочих проектов инвестиционной программы. Применение подхода позволит для первой группы проектов более детально и с учетом специфики формировать перечень

КИР для мониторинга в ходе реализации проекта, а для прочих проектов использовать стандартный набор инструментов и методов, которые требуют минимального отвлечения человеческих и временных ресурсов рабочей группы. Вместе с разработкой подхода в статье приведен перечень возможных КИР изменения капитальных затрат проекта, структурированных по факторам риска.

По результатам определения КИР проекта необходимо установить порядок их мониторинга, который включает:

- организационную модель разработки и мониторинга КИР;
- граничные значения изменения индикаторов;
- источники информации для мониторинга и контроля КИР;
- периодичность мониторинга КИР;
- порядок агрегирования индикаторов для предоставления информации топ-менеджменту;
- формат отчетности по результатам регулярного мониторинга для разных заинтересованных сторон (руководитель проекта, топ-менеджмент предприятия);
- порядок реагирования и разработки оперативных и (или) системных мероприятий.

Разработанный подход требует апробации и дальнейшей проработки в части вопросов определения целесообразности использования тех или иных КИР в целях прогнозирования изменения значения риска и решения вопросов, связанных с порядком мониторинга КИР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tice M. Key risk indicators — a link between risk management, operations and strategy // Keeping Good Companies. 2011. Vol. 63. Issue 3. Pp. 153–157.
2. Beasley M., Branson B., Hancock B. Developing key risk indicators to strengthen enterprise risk management // Committee of Sponsoring Organization of the Treadway Commission (COSO). 2010.
3. Scarlat E. Indicators and metrics used in the ERM // The Bucharest Academy of Economic Studies. 2010. P. 14.
4. Baker L. Integrating key risk and performance indicators // Internal Auditor. 2016. P. 4.
5. Scandizzo S. Risk mapping and key risk indicators in operational risk management //

Economic Notes. 2005. Vol. 34. Issue 2. Pp. 231–256. DOI: 10.1111/j.0391-5026.2005.00150.x

6. Tessier D. Cracking open key risk indicators // National Underwriter Property & Casualty Insurance. 2012. Vol. 116. Issue 17. P. 25.

7. Zheng L., Baron C., Esteban P., Xue R., Zhang Q., Yang S. Using Leading Indicators to Improve Project Performance Measurement // Journal of Systems Science and Systems Engineering. 2019. Vol. 28. Issue 5. Pp. 529–554. DOI: 10.1007/s11518-019-5414-z

8. Mouatassim H., Ibenrissoul A. Proposal for an implementation methodology of key risk indicators system: Case of investment management process in Moroccan asset management company // Journal of Financial Risk Management. 2015. Vol. 04. Issue 03. Pp. 187–205. DOI: 10.4236/jfrm.2015.43015

9. Boyd S.R., Moolman J.A., Nwosu N.J. Risk reporting & key risk indicators. A case study analysis // Enterprise risk management initiative. 2016. 34 p.

10. Tamim N., Laboureur D.M., Mentzer R.A., Hasan A.R., Mannan M.S. A framework for developing leading indicators for offshore drillwell blowout incidents // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 106. Pp. 256–262. DOI: 10.1016/j.psep.2017.01.005

11. Vinnem J.E. Risk indicators for major hazards on offshore installations // Safety Science. 2010. Vol. 48. Issue 6. Pp. 770–787. DOI: 10.1016/j.ssci.2010.02.015

12. Sipila J., Auerkari P., Holmstrom S., Vela I. Early warning indicators for challenges in underground coal storage // Risk Analysis. 2014. Vol. 34. Issue 12. Pp. 2089–2097. DOI: 10.1111/risa.12273

13. Hallowell M.R., Hinze J.W., Baud K.C., Wehle A. Proactive construction safety control: measuring, monitoring, and responding to safety leading indicators // Journal of Construction Engineering and Management. 2013. Vol. 139. Issue 10. P. 04013010. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000730

14. Shahandashti S.M. Analysis of construction cost variations using macroeconomic, energy and construction market variables (dissertation). 2014. 130 p.

15. Сизикова В., Гаврилина В., Битюцкий В. Методика разработки системы индексов ключевых индикаторов риска // Риск-менеджмент в кредитной организации. 2016. № 4 (24). С. 54–69.

16. Асаул А.Н., Грахов В.П. Интегративное управление в инвестиционно-строительной сфере. СПб.: Гуманистика, 2007. 248 с.

17. Willar D., Waney E., Senduk N. The execution of infrastructure project life-cycle // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 258. P. 02017. DOI: 10.1051/mateconf/201925802017

18. Морозенко А.А. Особенности жизненного цикла и этапы разработки инвестиционно-строительного проекта // Вестник МГСУ. 2013. № 6. С. 223–228.

Поступила в редакцию 19 августа 2020 г.

Принята в доработанном виде 27 января 2021 г.

Одобрена для публикации 27 января 2021 г.

О Б А В Т О Р А Х: Дмитрий Александрович Власов — аспирант Высшей школы бизнеса; **Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ «ВШЭ»);** 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20; менеджер дирекции по инвестициям и новым проектам; **Объединенная металлургическая компания (ОМК);** 115184, г. Москва, ул. Озерковская набережная, д. 28, стр. 2; SPIN-код: 3590-5464, ResearcherID: W-2436-2017, ORCID: 0000-0002-8839-1194; dmitryvlasov1994@yandex.ru;

Александр Олегович Габриелов — кандидат экономических наук, доцент, департамент финансового менеджмента Высшей школы бизнеса; **Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ «ВШЭ»);** 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20; SPIN-код: 3858-7069, ResearcherID: M-5925-2015, ORCID: 0000-0003-2363-8747; agabriellov@hse.ru.

REFERENCES

1. Tice M. Key risk indicators — a link between risk management, operations and strategy. *Keeping Good Companies*. 2011; 63(3):153-157.

2. Beasley M., Branson B., Hancock B. Developing key risk indicators to strengthen enterprise risk management. *Committee of Sponsoring Organization of the Treadway Commission (COSO)*. 2010.

3. Scarlat E. Indicators and metrics used in the ERM. *The Bucharest Academy of Economic Studies*. 2010; 14.

4. Baker L. Integrating key risk and performance indicators. *Internal Auditor*. 2016; 4.

5. Scandizzo S. Risk mapping and key risk indicators in operational risk management. *Economic Notes*. 2005; 34(2):231-256. DOI: 10.1111/j.0391-5026.2005.00150.x

6. Tessier D. Cracking open key risk indicators. *National Underwriter Property & Casualty Insurance*. 2012; 116(17):25.

7. Zheng L., Baron C. Using leading indicators to improve project performance measurement // *Journal*

of *Systems Science and Systems Engineering*. 2019; 28(5):529-554. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11518-019-5414-z>.

8. Mouatassim H., Ibenrissoul A. Proposal for an implementation methodology of key risk indicators system: Case of investment management process in Moroccan asset management company. *Journal of Financial Risk Management*. 2015; 04(03):187-205. DOI: 10.4236/jfrm.2015.43015

9. Boyd S.R., Moolman J.A., Nwosu N.J. Risk reporting & key risk indicators — A case study analysis. *Enterprise risk management initiative*. 2016; 34.

10. Tamim N., Laboureur D.M., Mentzer R.A., Hasan A.R., Mannan M.S. A framework for developing leading indicators for offshore drillwell blowout incidents. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 106:256-262. DOI: 10.1016/j.psep.2017.01.005

11. Vinnem J.E. Risk indicators for major hazards on offshore installations. *Safety Science*. 2010; 48(6):770-787. DOI: 10.1016/j.ssci.2010.02.015

12. Sipila J., Auerkari P., Holmstrom S., Vela I. Early warning indicators for challenges in underground coal storage. *Risk Analysis*. 2014; 34(12):2089-2097. DOI: 10.1111/risa.12273

13. Hallowell M.R., Hinze J.W., Baud K.C., Wehle A. Proactive construction safety control: Measuring, monitoring, and responding to safety leading indicators. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2013; 139(10):04013010. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000730

14. Shahandashti S.M. *Analysis of construction cost variations using macroeconomic, energy and construction market variables (dissertation)*. 2014; 130.

15. Sizikova V., Gavrilina V., Bityutskiy V. Methodology for developing a system of indices of key risk indicators. *Risk Management in a Credit Institution*. 2016; 4(24):54-69. (rus.).

16. Asaul A.N., Grakhov V.P. *Integrative management in the investment and construction sector*. St. Petersburg, Humanistics, 2007; 248. (rus.).

17. Willar D., Waney E., Senduk N. The execution of infrastructure project life-cycle. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 258:02017. DOI: 10.1051/matec-conf/201925802017

18. Morozenko A.A. Features of the life cycle and phases of development of an investment construction project. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2013; 6:223-228. (rus.).

Received August 19, 2020.

Adopted in revised form on January 27, 2021.

Approved for publication on January 27, 2021.

BIONOTES: **Dmitry A. Vlasov** — postgraduate student of the Graduate School of Business; **National Research University Higher School of Economics (HSE University)**; 20 Myasnitskaya st., Moscow, 101000, Russian Federation; manager of investments and new projects direction; **United Metallurgical Company**; build. 2, 28 Ozerkovskaya Naberezhnaya st., Moscow, 115184, Russian Federation; SPIN-code: 3590-5464, ResearcherID: W-2436-2017, ORCID: 0000-0002-8839-1194; dmitryvlasov1994@yandex.ru;

Alexander O. Gabrielov — PhD in Economics, Associate Professor, Department of Financial Management of Graduate School of Business; **National Research University Higher School of Economics (HSE University)**; 20 Myasnitskaya st., Moscow, 101000, Russian Federation; SPIN-code: 3858-7069, ResearcherID: M-5925-2015, ORCID: 0000-0003-2363-8747; agabrielov@hse.ru.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

Рецензия на комплекс научных трудов и методических работ, формирующих научно-методологическое и методическое обеспечение цикла образовательных программ в области технической эксплуатации зданий и инженерных систем

Е.А. Король, В.И. Римшин, Д.В. Спицов, О.А. Король, С.Г. Шеина

A review of a set of research and methodological works that serve as the scientific-methodological and teaching support for a succession of education programmes in technical maintenance of buildings and utility systems

E.A. Korol, V.I. Rimshin, D.V. Spitsov, O.A. Korol, S.G. Sheina

Комплекс взаимосвязанных научных трудов и методических работ в области технической эксплуатации зданий и инженерных систем охватывает большой спектр вопросов, относящихся к формированию комфортной и безопасной среды жизнедеятельности на эксплуатационной стадии жизненного цикла объектов недвижимости: а именно, технических решений и технологий по содержанию, обслуживанию и ремонту зданий и их инженерных систем; эксплуатационных мероприятий и их влияния на качество строительных объектов и окружающую среду. Все работы базируются на актуализированных и новых нормах и правилах технической эксплуатации строительных объектов. В них гармонизированы научные принципы и методы планирования эксплуатационных мероприятий, предназначенных для обеспечения надежности, экономичности и безопасности функционирования эксплуатируемых объектов на основе развития методов мониторинга и оценки их технического состояния.

Безопасная и комфортная эксплуатация зданий — неотъемлемая часть государственной политики по обеспечению граждан как жильем, так и всеми необходимыми для жизни и деятельности материальными ресурсами и нематериальными услугами. В этой связи глобальной целью технической эксплуатации является обеспечение качественного функционирования объекта в течение его нормативного срока службы при рациональном использовании природных и материальных ресурсов.

В научных трудах приводятся результаты исследований основополагающих характеристик качественного функционирования объекта эксплуатации, которыми служат параметры эксплу-

атационного качества, представляющие собой интегральное понятие совокупности свойств, закладываемых на этапе проектирования зданий и сооружений с учетом его функционального назначения и условий работы, реализуемых в процессе возведения и поддерживаемых в течение нормативного срока службы с учетом постоянного воздействия различных эксплуатационных нагрузок, техногенных и природно-климатических факторов.

Особую значимость представляет тот факт, что научные труды положены в основу обновления содержательной части образовательных программ в области технической эксплуатации зданий и инженерных систем, которые в обобщенном и систематизированном формате внедрены в многоуровневый образовательный процесс высших учебных заведений Ассоциации строительных вузов для обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры (по направлению «Строительство») и аспирантуры (по направлению «Техника и технологии строительства») по принципу трансфера технологий в образовательный процесс.

Таким образом, в научных исследованиях и разработках заложена база для формирования теоретического курса по дисциплинам «Техническая эксплуатация зданий и инженерных систем» и «Основы технической эксплуатации объектов строительства» и связанных с ними дисциплин. Материалы, представленные в комплексе научных и методических трудов, позволяют сформировать общепрофессиональные и профессиональные компетенции в области организации и осуществления технической эксплуатации, обслуживания и ремонта, проведения технического надзора и экспертизы

технического состояния объектов строительства и жилищно-коммунального хозяйства.

Комплекс научных трудов и методических работ опубликован также и в электронном виде и доступен для широкого круга пользователей. Все издания выполнены на высоком профессиональном уровне, имеют практическую и методическую

значимость для подготовки высококвалифицированных кадров, что позволяет рекомендовать авторов комплекса работ (докторов технических наук Е.А. Король, В.И. Римшина и С.Г. Шеину и кандидатов технических наук Д.В. Спицова и О.А. Королья) к выдвижению для участия в Конкурсе на медали и дипломы РААСН.

Игорь Любимович Шубин,
доктор технических наук,
член-корреспондент РААСН,
директор НИИСФ РААСН

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 литературы.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

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 указываются 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 должно 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 ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы 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 литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы 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 литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, 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.

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 литературы 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 ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы 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 литературы 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 литературы редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 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.

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

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

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.

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, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

ЛИТЕРАТУРА (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:

ЛИТЕРАТУРА

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 теплопереноса 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.

Віonotes: **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.

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

(наименование банка получателя платежа)

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2021 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

(наименование банка получателя платежа)

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2021 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 14-23), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

